

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ირინა კლიმიაშვილი

ღვარცოფულ კერებში დაგროვილი მასის მდგრადობის
რღვევისა და მოსალოდნელი ხარჯის პროგნოზი

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად წარდგენილი
დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი

2016 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
სამშენებლო ფაკულტეტის წყალმომარეგების, წყალარინების,
თბოაირმომარაგებისა და შენობათა საინჟინრო აღჭურვის დეპარტამენტში.

ხელმძღვანელი: **ნიკოლოზ ნაცვლიშვილი**
პროფესორი, ტ.მ.დ.

თანახელმძღვანელი: **ირმა ინაშვილი**
პროფესორი, ტ.მ.კ., აკადემიური დოქტორი

რეცენზენტები: **დავით კერესელიძე**
პროფესორი, ტ.მ.დ.

ზურაბ ლობჯანიძე
ასოცირებული პროფესორი, ტ.მ.კ.,
აკადემიური დოქტორი

დაცვა შედგება 2016 წლის 2 ივლისს 15 საათზე საქართველოს ტექნიკური
უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სასწავლო, სამეცნიერო და
საექსპერტო ლაბორატორიის აუდიტორიაში. I კორპუსი, III სართული.

მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 72.

დისერტაციის გაცნობა შესაძლებელია სტუ-ს ცენტრალურ
ბიბლიოთეკაში, ხოლო ავტორეფერატისა – ფაკულტეტის ვებ-გვერდზე.

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

შესავალი

ნაშრომის საერთო დახასიათება

თემის აქტუალურობა. დედამიწაზე მიმდინარე კლიმატის ცვლილებამ ადამიანთა ყურადღება მიაპყრო გარემოს მდგომარეობაზე, ვინაიდან ბუნება მყისვე რეაგირებს მიმდინარე პროცესებზე. როგორც ცნობილია, კლიმატის ცვლილების ფონზე მიმდინარე გლობალური დათბობა, უპირველეს ყოვლისა, იწვევს ყინულოვანი საფრის ინტენსიურ დნობას და შესაბამისად ისეთი სტიქიურ-დამანგრეველი პროცესების აქტივაციას, როგორც არის წყალდიდობები, ზვავები და კატასტროფული ღვარცოფები.

ღვარცოფის შესწავლის პრობლემა ძირითადად უკანასკნელ ასწლეულში წარმოიშვა მთაგორიანი რელიეფის მქონე ქვეყნებში. ბოლო 10 წლის მონაცემებით, საქართველოში ეროზიულ-ღვარცოფული პროცესების ექსტრემალურ გააქტიურებას დასაშვებ ფონს ზემოთ ადგილი ჰქონდა რაჭა-ლეჩხუმში, სამეგრელოს მთისწინეთში, აჭარაში, ზემო იმერეთსა და კახეთში, მცხეთა-მთიანეთში, ნაწილობრივ ბორჯომის, ახალციხე-ასპინძის, მესტიის რაიონებში და თბილისის ტერიტორიაზე.

საქართველოს გარემოს დაცვის სამინისტროს მონაცემებით, 1995-2009 წლებში საქართველოში ფიქსირებულია ღვარცოფული მოვლენების 1494 შემთხვევა, მისგან მიყენებული მიახლოებითი ზარალი 1189 მლნ. ლარს შეადგენს. ამასთან, სამწუხაროდ დაფიქსირებულია ადამიანთა მსხვერპლიც (49 ადამიანი). აქედან გამომდინარე ეროზიულ-ღვარცოფულ მოვლენებთან ბრძოლა უმნიშველოვანეს პრობლემას წარმოადგენს.

საქართველოს კლასიკური ღვარცოფსადინარის მაგალითს მდინარე დურუჯის აუზი წარმოადგენს, რომლის ვიდეო-ვიზუალური აგეგმვა მიუთითებს, რომ ერთ ჰექტარ ფართობზე ეროზიის ინტენსიობამ, განსაკუთრებულ შემთხვევებში, შეიძლება 50 ტონემდე მიაღწიოს, რაც დასაშვებ ნორმაზე 25-ჯერ მეტია და იგი სატრანზიტო ადგილებში 20 მეტრიანი ღვარცოფის ტალღის გავლის მიზეზიც შეიძლება გახდეს.

დღევანდელი მონაცემებით გარემოს დაცვითი ღონისძიებების გამოყენების დონე არის დაბალი და ადგილი აქვს წყლისა და მიწის რესურსების საკმაოდ დიდ დანაკარგს. მოსალოდნელი ანომალიების გაუთვალისწინებლად ხდება გარემოს დაცვითი ღონისძიებების პროექტირება-მშენებლობა. ექსპლუატაციაში მყოფი მათი უმრავლესობა მოძველებულია, საექსპლუატაციოდ უვარგისია, სისტემისა და გარემოს დაცვითი ღონისძიებების კონსტრუქციული მდგრადობის რესურსი სავალალო მდგომარეობაშია. ეროზიული მოვლენების შედეგად შევსებულია ღვარცოფწარმომქმნელი კერების ქვაბულების დიდი ნაწილი, მძიმე მდგომარეობაშია და რეგულირებას მოითხოვს ღვარცოფსადინართა კალაპოტები, სავალალო მდგომარეობაშია ან არ არსებობს ღვარცოფსარეგულაციო ნაგებობები.

თუ გავითვალისწინებთ იმ გარემოებას, რომ ეროზიულ-ღვარცოფული პროცესები პერიოდულ ცვალებადობას (გააქტიურება და დროებითი სტაბილიზაცია) განიცდის, ამიტომ შეუძლებელია მათი საშიშროების რისკის ალბათობის შესახებ საიმედო ინფორმაციის მიწოდება პერიოდულად სიტუაციის შეფასების, მოსალოდნელი სტიქიის იდენტიფიკაციის და მათი შესაძლო გააქტიურების მიზეზ-შედეგობრივი ფაქტორების ფუნდამენტალური შესწავლის გარეშე, რომელიც საფუძვლად უნდა დაედოს რისკების საშიშროების შეფასებას, მათი სივრცობრივი საზღვრების და განვითარების დადგენას.

ღვარცოფების ჩამოყალიბება, მათი დინამიკისა და გამოტანის კონუსებზე მოძრაობის პირობების განსაკუთრებულობა, სხვა მოვლენებისაგან განსხვავებულობა, პროცესების საანგარიშო მოდელების შერჩევა-ადაპტირება, განსაკუთრებულ მიდგომებს, ცალკეული ამოცანების გადაწყვეტის საანგარიშო სქემების სწორად შერჩევას მოითხოვს.

აქედან გამომდინარე, ღვარცოფსაცავებში მიმდინარე პროცესები, მათი საანგარიშო მახასიათებლების ცვლილების პროგნოზირება, სატრანზიტო უბნებზე და გამოტანის კონუსებზე მოძრაობის პირობების

შეფასება, შესაბამისი საიმედო ღვარცოფსაწინააღმდეგო საინჟინრო ნაგებობებისა და კონსტრუქციების შესარჩევად გამოყენებული მეთოდების გაღრმავება-დაზუსტება გარემოს დაცვისა და უსაფრთხოების აქტუალურ პრობლემად რჩება.

სამუშაოს მიზანი. სადისერტაციო ნაშრომის მიზანია - ღვარცოფული პროცესების კვლევა, მათი საანგარიშო მახასიათებლების დადგენა-დაზუსტება და შესაბამისი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების შერჩევა. კერძოდ, ღვარცოფსაცავების პარამეტრების ცვლილების კანონზომიერებებისა და ღვარცოფსადინარებში მიმდინარე პროცესებს შეფასების თეორიული მეთოდების სრულყოფა; ღვარცოფწარმომქმნელ კერებში დაგროვილი მასის დეფორმაციების, ღვარცოფსადინართა კალაპოტების დეფორმაციების გამომწვევი ფაქტორების, ნაკადის მოძრაობის პირობების ანალიზი და მათი საანგარიშო დამოკიდებულებების შემუშავება; მიღებული შედეგებისა და კომპიუტერული მოდელირების გამოყენებით დრეკადი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარიერების საპროექტო პარამეტრების გაანგარიშება კონსტრუქციის მახასიათებლების, მასზე მოსული დატვირთვის, სიმტკიცის მარაგის კოეფიციენტისა და ღვარცოფული კერიდან დაძრული მასის მახასიათებლების დროსთან კავშირში გათვალისწინებით.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები. კვლევის ობიექტს წარმოადგენდა საქართველოს მთისა და მთისწინა ზონების წყალშემკრები აუზების ღვარცოფსაცავები და ღვარცოფსადინარები, კერძოდ მდ. დურუჯის წყალშემკრები აუზი.

კვლევის პერიოდში ჩატარებული მათემატიკური, თეორიული და რიცხვითი ექსპერიმენტების დროს გამოყენებულ იქნა საინჟინრო ჰიდროლოგიაში, ჰიდრაულიკაში, გეოდეზიაში, გრუნტების მექანიკაში და ჰოდროტექნიკურ მელიორაციაში, საყოველთაოდ აღიარებული სამეცნიერო-ტექნიკური მიდგომები და მეთოდები. ჰიდრაულიკური

მოდელირება განხორციელებულ იქნა კომპიუტერული პროგრამა GIS-ისა და DEBFLOW-ის გამოყენებით.

ნაშრომის ძირითადი შედეგები და მეცნიერული სიახლე:

- ღვარცოფულ კერებში დაგროვილი მასის წონასწორობის რღვევის თეორიული კვლევის შედეგად დაგენილია, რომ ღვარცოფის ხარჯის, სიღრმის და სიჩქარის დროსთან კავშირი პარაბოლური ხასიათისაა და რეოლოგიური მახასიათებლების ცვლილებით ისინი ერთმანეთისგან მნიშვნელოვნად განსხვავებულია. როცა ბმულობის ეკვივალენტური სიღრმე იზრდება, ადგილი აქვს ამ პარამეტრების სიდიდეთა მნიშვნელოვნად შემცირებას, ხოლო შინაგანი ხახუნის კუთხის ზრდით მოვლენის სურათს შებრუნებული სახე გააჩნია;
- თეორიული კვლევების შედეგად, არასტაციონალურობის საფუძველზე, მიღებულია ღვარცოფსაცავში დაგროვილი ღვარცოფული მასის სიმაღლის, ღვარცოფის ხარჯისა და მისი გადაადგილების სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულებები.
- ხარისხობრივი ფუნქციების გამოყენებით, მიღებულია ღვარცოფულ კერაში დაგროვილი ღვარცოფული მასის სიმაღლის, ღვარცოფის ხარჯისა და მისი გადაადგილების სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულებები. კვლევის შედეგებმა დაადასტურა, რომ თეორიულად და ექსპერიმენტული მასალის საფუძველზე მიღებულ K-ს მნიშვნელობებს შორის განსხვავება არ აღემატება 10%-ს.
- მიღებული დამოკიდებულებების საფუძველზე, კონკრეტული პარამეტრებისთვის, ღვარცოფის მოძრაობის დროში ცვლილების კანონზომიერება ტალღის გავრცელების ზონაში, საშუალებას იძლევა შეირჩეულ იქნას შესაბამისი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობა.
- კალაპოტის სწორკუთხა კვეთის შემთხვევაში, ნაკადის მოძრაობის მიმართულებით, სრული ენერჯის ცვლილების საფუძველზე და რეალური რეოლოგიური მახასიათებლების გათვალისწინებით

მიღებულია ბმული ღვარცოფის დამყარებული არათანაბარი მოძრაობის განტოლება; ნაკადის თანაბარი მოძრაობის რეჟიმისათვის გამოყენილია მოძრაობის სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულება;

- რეოლოგიური მახასიათებლების ცვლილების გათვალისწინებით, დადგენილია, რომ როცა ბმულობის ეკვივალენტური სიღრმე ნაკადის სიღრმის ტოლია, მაშინ ღვარცოფული მასის მოძრაობას ადგილი არ აქვს, ხოლო შინაგანი ხახუნის კუთხის ცვლილებით, ანუ მისი გაზრდით, ნაკადის მოძრაობის სიჩქარე მცირდება.
- დადგენილია, რომ ბმული ღვარცოფის თავისუფალი ზედაპირის მკვეთრი ნახტომისებრი ცვლილებები ხდება არა მხოლოდ ღვარცოფსაცავებისა და ღვარცოფის მასის მიერ წარმოქმნილი კაშხლების გარღვევის შემთხვევაში, არამედ ყოველთვის, როდესაც ნაკადი მძაფრიდან წყნარ რეჟიმში გადადის.
- დამოკიდებულებებით მიღებული შედეგებისა და კომპიუტერული პროგრამა DEBFLOW-ს გამოყენებით მდ. არაგვის ღვარცოფული აუზისთვის გაანგარიშებულია დრეკადი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარიერების საპროექტო პარამეტრები, კონსტრუქციის მახასიათებლების, მასზე მოსული დატვირთვის, სიმტკიცის მარაგის კოეფიციენტისა და ღვარცოფული კერიდან დამრული მასის მახასიათებლების დროსთან კავშირში გათვალისწინებით.

შედეგების გამოყენების სფერო. ნაშრომში შემუშავებული ცალკეული კონკრეტული ამოცანების შედეგები დიდ დახმარებას გაუწევს ღვარცოფმცოდნეობაში, გარემოს დაცვაში, საინჟინრო ეკოლოგიაში, ჰიდრაულიკაში, ჰიდროგეოლოგიაში, ჰიდროტექნიკურ მელიორაციაში, და სხვა მომიჯნავე დარგებში მოღვაწე მეცნიერებს სამომავლო კვლევების განხორციელებაში და პრაქტიკოს ინჟინრებს ღვარცოფსაწინააღმდეგო ღონისძიებების შერჩევაში. მიღებული შედეგები საფუძვლად დაედება ეროზიულ-ღვარცოფული პროცესების სარეგულაციო დამცავი

ლონისძიებების საპროექტო ნორმებს და საინჟინრო ამოცანების ოპტიმალურ გადაწყვეტას.

დისერტაციის მოცულობა და სტრუქტურა. სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლის, 3 თავისა და ძირითადი დასკვნებისაგან. იგი მოიცავს 138 ნაბეჭდ გვერდს, მათ შორის 10 ნახაზს და 9 ცხრილს; გამოყენებულია 84 დასახელების ლიტერატურა.

დისერტაციის ძირითადი შედეგები თავების მიხედვით

სადისერტაციო ნაშრომის პრიველ თავში „ღვარცოფული მოვლენების შესწავლის თანამედროვე მდგომარეობა და ლიტერატურული მიმოხილვა“ განხილულია ღვარცოფული მოვლენების შესწავლის თანამედროვე მდგომარეობა და მოცემულია ლიტერატურული წყაროების ანალიზი. შესწავლილია ღვარცოფული მოვლენების კლასიფიკაცია დინამიკისა და სტრუქტურის მიხედვით. აღწერილია მსოფლიოს და საქართველოს ძირითადი ღვარცოფული აუზები.

აღსანიშნავია, რომ ღვარცოფების მოძრაობის კლასიფიკაციის ჩამოყალიბებაზე, მრავალი მეცნიერი მუშაობდა, რომელთა შორის აღსანიშნავია: მ. მ. აიზენბერგი, ა. ნ. ოლიფეროვი, კ. რ. ბეგიშვილი, ი. ბ. ვინოგრადოვი, მ. ს. გაგოშიძე, ი. ვ. ეგიაზაროვი, ბ. ნ. ივანოვი, ვ. ფ. პეროვი, ს. მ. ფლეიშმანი, ა. ი. შეკო და სხვ.

დღეისათვის შემუშავებულია ღვარცოფების კლასიფიკაცია შემდეგი კრიტერიუმებით: მოძრაობის რეჟიმის მიხედვით, გამოტანილი მყარი მასის ანუ სიმძლავრის მიხედვით, ნაგებობებზე მათი ზემოქმედების სიმძლავრის ხასიათით; ღვარცოფული აუზების კლასიფიკაცია: მორფოლოგიური სხვაობის მიხედვით, მათი სათავის სიმაღლის მიხედვით, ღვარცოფების განმეორადობის მიხედვით, რომელიც ხასიათდება ღვარცოფების წარმოქმნის ინტენსიობით ან ღვარცოფაქტივობით და ა.შ.

კავკასიონზე განვითარებული ღვარცოფული მოვლენების შესწავლა XIX საუკუნის მეორე ნახევრიდან დაიწყო და დღეისათვის, დაგროვილია კვლევების მასალები და დიდი გამოცდილება, განსაკუთრებით გავლილი ღვარცოფების პარამეტრების განსაზღვრისა და ღვარცოფებისგან დაცვის ღონისძიებების შემუშავება-გატარების კუთხით.

კავკასიონის ღვარცოფების შესწავლის ისტორიაში შეიძლება გამოყოფილ იქნას 2 პერიოდი: ეპიზოდური კვლევების პერიოდი, რომელიც იწყება XIX საუკუნის შუა პერიოდიდან და გრძელდება XX საუკუნის 50-60

იან წლებამდე; სისტემატიური კვლევების თანამედროვე პერიოდი, რომელიც XX საუკუნის შუა პერიოდიდან დაიწყო.

აღსანიშნავია, რომ ღვარცოფული ნაკადები საქართველოში ცნობილია XVIII საუკუნის ბოლოდან, ხოლო შესწავლა დაიწყო XX საუკუნის 30-იანი წლებიდან. ღვარცოფული ნაკადების გეოგრაფიის ამსახველი პუბლიკაციები კი XX საუკუნის 60-80-იან წლებს ეკუთვნის, რომელთა შორის აღსანიშნავია მ.ს. გაგოშიძის, გ.ნ. ხმაღაძის, გ.ი. ხერხეულიძის, ე.დ. წერეთელის, დ.დ. წერეთელის და სხვა შრომები.

კვლევების შედეგად დადგენილია, რომ საქართველოში, ყველაზე მეტად გავრცელებულია წვიმის გენეზისის მქონე ღვარცოფები. თხიერი შემადგენლით შევსების მიხედვით, ღვარცოფული ნაკადების წარმოშობა შემდეგნაირადაა გადანაწილებული: წვიმები და თავსხმა წვიმები - 79%, მდნარი წყალი - 9%, მყინვარები და მორენები - 6%, ბუნებრივი წყალსაცავების წყალი - 6%. ღვარცოფული მასის შემადგენლობის მიხედვით ჭარბობს ქვატალახიანი და ტალახიანი ღვარცოფები (73%), დანარჩენი ქვაწყლიანია. მოძრაობის მიხედვით არაბმული ღვარცოფები დომინირებს.

ღვარცოფულ მოვლენებთან ბრძოლა შრომატევადი და ეკონომიკურად ძვირი პროცესია. ღვარცოფული ნაკადების სტრუქტურის, ფორმირებისა და მოძრაობის პირობების ანალიზის საფუძველზე შესაძლებელია ღვარცოფსაშიში აუზისთვის ღვარცოფისაგან დაცვის ეფექტური კომპლექსის შემუშავება, რომელიც უნდა მოიცავდეს როგორც ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებს, აგრეთვე ღვარცოფსაწინააღმდეგო ღონისძიებებს.

აღნიშნულ საკითხებზე მიძღვნილ მრავალრიცხოვან შრომათა შორის აღსანიშნავია ისეთი მეცნიერების თეორიულ-ექსპერიმენტული კვლევები როგორებიცაა მ. ა. ველიკანოვი, მ. ა. გაგოშიძე, ი. ვ. ეგიაზაროვი, ს. მ. ფლეიშმანი, ი. ი. ხერხეულიძე, ი. ბ. ვინოგრადოვი, ბ. ფ. პეროვი, მ. ჩ. ზალიხანოვი, ჟ. ბ. ბაინატოვი, ბ. მ. გოლდინი, ე. ვ. ზაპოროჟჩენკო, ო. გ. ნათიშვილი, კ. ნ. ნოსოვი, ა. ნ. ოლიფეროვი, ვ. ი. თევზაძე, გ. ი.

ხერხეულიძე, დ. დ. წერეთელი, გ. ნ. ხმალაძე, ი. გ. ყრუაშვილი, ე. გ. კუხალაშვილი, ა. ი. შეკო, რ. ლ. შუსტერი, დ. რიკენმენი, მ. ზაპა, ტ. ტაკაჰაში და სხვ.

შრომებში მოცემულია იმ ძირითადი პარამეტრებისა მახასიათებლების განსაზღვრის მეთოდები, რომლების გათვალისწინება აუცილებელია როგორც ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების პროექტირების, აგრეთვე ღვარცოფების პროგნოზირების დროს. შემუშავებული და შემოთავაზებულია შემდეგი სიდიდეების საანგარიშო დამოკიდებულებები: ღვარცოფების საშუალო სიმკვრივე და მათი მყარი შემადგენლით ზღვრული გაჯერება; სხვადასხვა სტრუქტურულ-რეოლოგიური ტიპის ღვარცოფის მაქსიმალური და საშუალო სიჩქარე; ღვარცოფული ნაკადისა და გამონატანის მოცულობა; ღვარცოფული კალაპოტის დეფორმაციისადმი წინაღობა; ღვარცოფული ნაკადის წინააღმდეგობაზე დარტყმის ძალა და ა.შ.

მიუხედავად იმისა, რომ კალაპოტურ პროცესებზე არსებობს მრავალგვარი სამეცნიერო ინფორმაცია, ღვარცოფთა ჰიდრავლიკური ამოცანების გადაწყვეტისას აუცილებელია ღვარცოფსაწინააღმდეგო ჰიდროტექნიკა დაფუძნებული იყოს ისეთი გაანგარიშების მეთოდებზე, რომელიც სრულად ასახავს მათ ბუნებას.

ნაშრომის მეორე თავში „**ბმული ღვარცოფების ჩამოყალიბებისა და მოძრაობის თეორიული კვლევა**“ ჩატარებულია ღვარცოფულ კერებში დაგროვილი მასის წონასწორობის რღვევის კვლევა და მათი საანგარიშო დამოკიდებულებებით აღწერის მეთოდების შემუშავება ხარისხობრივი ფუნქციების გამოყენებით.

ღვარცოფულ კერებში, ეროზიულ ღრანტებში, გამოტანის კონუსებზე განთავსებული ღვარცოფული მასის ბმული მდგომარეობის შესწავლის სურათიდან გამოვლინდა ზღვრულ წონასწორობაში მყოფი ღვარცოფის ზედაპირზე გამავალი წირის მრუდის ფორმა. აღმოჩნდა, რომ ღვარცოფწარმომქმნელი მასის სიღრმესა და გავრცელების ზონის სიგრძეს

შორის კავშირი მრუდწირულია და მისი ფორმის ნათლად წარმოჩენის მიზნით ეს კავშირი შეიძლება აღწერილ იქნას ხარისხობრივი დამოკიდებულებით, რომელსაც შემდეგი სახე აქვს:

$$Y = ax^b, \quad (1)$$

სადაც: a და b არის კოეფიციენტი და ხარისხის მაჩვენებელი, რომელთა სიდიდე ღვარცოფთა რეოლოგიურ და ფიზიკურ-მექანიკურ მახასიათებლებთანაა უშუალოდ დაკავშირებული;

Y - ჩამომეწყვრის სიღრმის ცვლილების კოორდინატი (მ);

x - წონასწორული ზედაპირის გავრცელების ზონის სიგრძე (მ).

ჩამომეწყვრილი ფართობის სიდიდე, როცა $a > 0, b > 0$ და $x = L$ შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით:

$$S = LaL^b - \int_0^L ax^b dx = aL^{1+b} - \frac{aL^{1+b}}{1+b}. \quad (2)$$

დამოკიდებულებაში (1), როცა $Y = H, x = L$ და $H = aL^b$, და (2)-ში L -ის სიდიდეს თუ გამოვსახავთ ღვარცოფწარმომქმნელი მასის სიღრმით H -ით, გვექნება:

$$S = \frac{ab}{1+b} \left(\frac{H}{a} \right)^{\frac{1+b}{b}} = \frac{b}{(1+b)a^{\frac{1}{b}}} H^{\frac{1+b}{b}}. \quad (3)$$

როცა კერის სიგანე 1-ის ტოლია, W ჩამომეწყვრის მოცულობა შეიძლება გაანგარიშებულ იქნას ფორმულით:

$$W = \frac{b}{(1+b)a^{\frac{1}{b}}} H^{\frac{1+b}{b}}. \quad (4)$$

თეორიული კვლევებით მიღებულია, რომ როცა ტალღის სიმაღლე უმნიშვნელოა, ღვარცოფული კერიდან დაძრული მასის საანგარიშო დამოკიდებულებას ბრტყელი ნაკადის შემთხვევაში შემდეგი სახე აქვს:

$$q = H^{\frac{3}{2}} \sqrt{\left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \phi g}. \quad (5)$$

შესაბამისად, დაძრული მასის მოცულობის სიდიდეს t დროის გათვალისწინებით იქნება:

$$W = t H^{\frac{3}{2}} \sqrt{\left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \phi g}. \quad (6)$$

თუ (6)-ს გავუტოლებთ (4)-ს, გვექნება:

$$\frac{b}{a^{\frac{1}{b}}(1+b)} H^{\frac{1+b}{b}} = t H^{\frac{3}{2}} \sqrt{\left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \phi g}. \quad (7)$$

ტოლობაში (7), როცა $t = t_0$, შეიძლება განსაზღვრულ იქნას დაძვრის t_0 -ის, სიდიდე:

$$t_0 = \frac{b}{a^{\frac{1}{b}}(1+b) \sqrt{\left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \phi g}}. \quad (8)$$

დამოკიდებულებაში (8) t_0 დროის განსაზღვრა სპეციალური კვლევების ან ექსპერიმენტების ჩატარებას საჭიროებს.

კვლევის არსებული სტატისტიკური მასალების საფუძველზე ღვარცოფსაცავებში ჩამოყალიბებული ღვარცოფის მასის გარღვევის შემთხვევაში მისი მახასიათებლების ცვლილება, კერძოდ, მოცულობის დროსთან კავშირი შეიძლება აღწერილ იქნას დიფერენციალური განტოლებით, ე.ი., მოცულობის ცვლილების პროგნოზირების დროს სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით აღნიშნული პროცესის საანგარიშოდ შერჩეულ მოდელს აქვს სახე:

$$\frac{dW}{dt} = -q, \quad (9)$$

სადაც: q არის ღვარცოფსაცავთან დაძრული ნაკადის ხარჯი ($\text{მ}^3/\text{წმ}$);

t - ღვარცოფსაცავის დაცლის დრო (წმ).

რადგან ღვარცოფსაცავიდან დაძრული მასის მოცულობა დროისა და ხარჯის ნამრავლის ფუნქციას წარმოადგენს, ე.ი.;

$$dw = d(qt) = qdt + tdq. \quad (10)$$

(10) დამოკიდებულების ინტეგრირების საფუძველზე გვექნება:

$$-2\ell nt = \ln q + c. \quad (11)$$

განტოლებაში (11), როცა: $t = t_0$, $W = W_0$, $q = q_0$, $c = 2\ell nt_0 + \ln q_0$, მივიღებთ:

$$\left(\frac{t}{t_0}\right)^2 = \frac{q}{q_0}. \quad (12)$$

როგორც განტოლება (4) გვიჩვენებს, ღვარცოფსაცავიდან ჩამომეწყრილი მყარი მასის მოცულობას სიღრმესთან ხარისხობრივი დამოკიდებულება გააჩნია. თუ შემოვიღებთ აღნიშვნას $\frac{b}{(1+b)a^{\frac{1}{b}}} = A$ და

$\frac{1+b}{b} = K - 1$, მივიღებთ:

$$W = AH^K. \quad (13)$$

განტოლებაში (13), როცა $t = t_0$, მაშინ $W = W_0$, $H = H_0$ და $q = q_0$; როცა დრო t -ს ტოლია, მაშინ $W = W_t$, $H = H_t$ და $q = q_t$.

დაშვების შესაბამისად, ღვარცოფწარმომქმნელი მასის მოცულობის ცვლილება სიღრმესთან კავშირში მიიღებს სახეს:

$$W_0 = AH_0^K, \quad (14)$$

$$W_t = AH_t^K. \quad (15)$$

შესაბამისად, დაძრული მასის ხარჯების საანგარიშო დამოკიდებულებებს ექნება სახე:

$$q_0 = \frac{AH_0^K}{t_0}, \quad (16)$$

$$q_t = \frac{AH_t^K}{t}. \quad (17)$$

(16)-ისა და (17)-ის გათვალისწინებით (12)-ში, გვექნება:

$$t = t_0 \left(\frac{H_0}{H_t} \right)^K. \quad (18)$$

ღვარცოფულ მასაში წნევის სიღრმეზე განაწილების თავისებურებიდან გამომდინარე მიღებულია, რომ:

$$P = \frac{\gamma H^2}{2} \left(1 - \frac{h_0}{H} \right)^2 \varphi. \quad (19)$$

(19) განტოლების ორივე მხარეს თუ გავყოფთ γ -ზე, მივიღებთ ზღვრული წონასწორული მდგომარეობის შესაბამის ღვარცოფის მოცულობას:

$$W = \frac{H_0^2}{2} \left(1 - \frac{h_0}{H_0} \right)^2 \varphi. \quad (20)$$

საწყის მომენტში, როცა $t = t_0$, ღვარცოფის დაძრული მასის შესაბამისი ხარჯის სიდიდეს ექნება სახე:

$$q_0 = \frac{H_0^2}{2t_0} \left(1 - \frac{h_0}{H_0} \right)^2 \varphi. \quad (21)$$

ხოლო t მომენტისათვის უწყვეტობის საფუძველზე, ხარჯის საანგარიშო დამოკიდებულებას ექნება სახე:

$$q_t = \frac{H_t^2}{2t} \left(1 - \frac{h_0}{H_t}\right)^2 \varphi. \quad (22)$$

განტოლებას (21) თუ გავუტოლებთ (5)-ს, მივიღებთ:

$$H_0^{\frac{3}{2}} \sqrt{\left(1 - \frac{h_0}{H_0}\right)} \varphi g = \frac{H_0^2}{2t_0} \left(1 - \frac{h_0}{H_0}\right)^2 \varphi. \quad (23)$$

(23) განტოლებიდან t_0 დრო, რომელიც დაძვრის საწყის მომენტს შეესაბამება, ტოლი იქნება:

$$t_0 = \frac{1}{2} H_0^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{h_0}{H_0}\right) \sqrt{\left(1 - \frac{h_0}{H_0}\right) \frac{\varphi}{g}}. \quad (24)$$

განტოლებიდან (18) t დროის შესაბამისი H_t ღვარცოვის სიღრმის საანგარიშო დამოკიდებულებას ენება სახე:

$$H_t = H_0 \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\frac{1}{K}}. \quad (25)$$

(24)-ის გათვალისწინებით (25)-ში, გვექნება:

$$H_t = \left(\frac{1}{2t}\right)^{\frac{1}{K}} H_0^{\frac{1+2K}{2K}} \left(1 - \frac{h_0}{H_0}\right)^{\frac{3}{2K}} \left(\frac{\varphi}{g}\right)^{\frac{1}{2K}}. \quad (26)$$

დაძვრული მასის ხარჯის დროსთან კავშირი გამოისახება ფორმულით:

$$q_t = \left(\frac{1}{t}\right)^2 \frac{\varphi}{2} H_0^{\frac{1+2K}{2}} \sqrt{\left(1 - \frac{h_0}{H_0}\right)^7 \frac{\varphi}{g}}. \quad (2.1.27)$$

ხოლო დაძვრული მასის სიჩქარის დროსთან კავშირს ექნება სახე:

$$V_t = \left(\frac{1}{2t}\right)^{\frac{2K-1}{K}} \varphi H_0^{\frac{2K^2-K-1}{2K}} \left(1 - \frac{h_0}{H_0}\right)^{\frac{7K-3}{2K}} \left(\frac{\varphi}{g}\right)^{\frac{K-1}{K}}. \quad (27)$$

თეორიულად A -ს მნიშვნელობა $A = \left(1 - \frac{h_0}{H_0}\right)^2 \varphi$ -ს, ხოლო $K = 2$ -ს.

A -სა და K -ს მიღებული მნიშვნელობების სიზუსტის შემოწმების მიზნით მიზანშეწონილად მივიჩნიეთ გვესარგებლა სავლე ექსპერიმენტული კვლევის მასალებით.

ექსპერიმენტული კვლევის მასალად გამოყენებულ იქნა მდ. არაგვის ღვარცოფული ხასიათის შენაკადებზე ნაკადის გავლის შედეგად გამოტანილი მყარი მასალის მონაცემები, რადგან ეს შენაკადები ღვარცოფების შესწავლის თვალსაზრისით კლასიკურ ხასიათს ატარებს.

უმცირეს კვადრატა მეთოდის გამოყენებით β შინაგანი ხახუნის კუთხის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის ჩამომეწყრვის ფართობის სიმალესთან კავშირი გამოისახება დამოკიდებულებებით:

$$S_1 = 1.68H^{1.82}, \quad \text{როცა } \beta = 35^\circ; \quad (29)$$

$$S_1 = 2.04H^{1.82}, \quad \text{როცა } \beta = 25^\circ; \quad (30)$$

$$S_1 = 2.61H^{1.82}, \quad \text{როცა } \beta = 15^\circ; \quad (31)$$

$$S_1 = 3.37H^{1.82}, \quad \text{როცა } \beta = 5^\circ. \quad (32)$$

მიღებული განტოლებების საფუძველზე, შესაბამისად, K -ს მნიშვნელობა $K = 1.81$, ხოლო A -ს საანგარიშო დამოკიდებულებას აქვს სახე:

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{1 + 0,625 \operatorname{tg} \beta}{0,08 + 0,55 \operatorname{tg} \beta} \right)^{0,64}. \quad (33)$$

კვლევის შედეგებმა დაადასტურა, რომ თეორიულად და ექსპერიმენტული მასალის საფუძველზე მიღებულ K -ს მნიშვნელობებს შორის განსხვავება არ აღემატება 10%-ს, ე.ი., თუ თეორიულად მიღებულ A -სა და K -ს მნიშვნელობებს გავითვალისწინებთ (26), (27) და (28) განტოლებებში, მივიღებთ:

$$H_t = \sqrt{\frac{1}{2t}} H_0^{1.25} \left(1 - \frac{h_0}{H_0}\right)^{0.75} \left(\frac{\varphi}{g}\right)^{0.25}, \quad (34)$$

$$q_t = \left(\frac{1}{2t}\right)^2 H_0^{2.5} \left(1 - \frac{h_0}{H_0}\right)^{3.5} \sqrt{\frac{\varphi}{g}}, \quad (35)$$

$$V_t = \frac{\varphi}{(2t)^{1.5}} H_0^{0.25} \left(1 - \frac{h_0}{H_0}\right)^{2.75} \left(\frac{\varphi}{g}\right)^{0.25}. \quad (2.1.36)$$

გამომდინარე ზემოაღნიშნულიდან, შეიძლება დავასკვნათ, რომ ღვარცოფის ხარჯის, სიღრმის და სიჩქარის დროსთან კავშირი პარაბოლური ხასიათისაა და რეოლოგიური მახასიათებლების ცვლილებით ისინი ერთმანეთისგან მნიშვნელოვნად განსხვავებულია. როცა ბმულობის ეკვივალენტური სიღრმე იზრდება, ადგილი აქვს ამ პარამეტრების სიდიდეთა მნიშვნელოვნად შემცირებას, ხოლო შინაგანი ხახუნის კუთხის ზრდით მოვლენის სურათს შებრუნებული სახე გააჩნია.

ღვარცოფსაცავის უეცარი გარღვევის შემთხვევაში, გადმოდინებული ხარჯის განგარიშების დროს მართებულია შემდეგი სახის განტოლების გამოყენება:

$$\frac{dW}{dt} = -q, \quad (37)$$

სადაც: q არის ღვარცოფსაცავიდან გადმოდინებული ხარჯის სიდიდე ($\text{მ}^3/\text{წმ}$);

W - ღვარცოფსაცავის მოცულობა (მ^3);

t - ღვარცოფსაცავის დონის დაწევის ხანგრძლივობა (წმ).

ღვარცოფსაცავის უეცარი გარღვევის მომენტში პროცესი შემდეგნაირად შეიძლება დახასიათდეს: როცა $t = 0$, დაძრული მოცულობა W -ის, ხოლო გარღვევის შემდეგ მისი მნიშვნელობა $W(t)$ -ს ტოლია.

გარკვეულ კვეთში ღვარცოფის ღვარცოფსაცავიდან გადმოდინებას თუ წარმოვიდგენთ, როგორც ანალოგს ფართე ზღურბლიან წყალსაშვზე წყლის გადადინებისა, მაშინ დაძვრის პროცესის დროის მცირე dt მონაკვეთში ღვარცოფსაცავის სიღრმე მცირდება dH სიდიდით. ასეთ პირობებში გარკვეულ კვეთში გადმოდინებული ღვარცოფის მოცულობა ΩdH -ის, ხოლო ღვარსაშვზე H_0 -ის ტოლი იქნება. სტაციონარული პროცესისი შესაბამისად, ღვარცოფის ხარჯის საანგარიშოდ შეიძლება გამოყენებულ იქნას ფორმულა:

$$q = mb\sqrt{2gH_0^{3/2}}, \quad (38)$$

სადაც: b არის ღვარცოფის გარღვეული ნაწილის სიგანე (მ);

m - ხარჯის კოეფიციენტი;

H_0 - ჩამოყალიბებული ღვარცოფის მასის სიმაღლე კერის დასაწყისში (მ);

g - სიმძიმის ძალის აჩქარება (მ/წმ²).

ჩატარებული კვლევების საფუძველზე, ღვარცოფის ხარჯის კოეფიციენტის საანგარიშოდ სიჩქარის Ψ კოეფიციენტის ბმულობის ექვივალენტური h_0 სიღრმისა და შინაგანი ხახუნის β კუთხესთან კავშირში, მიღებულია შემდეგი სახის დამოკიდებულება:

$$m = \Psi \frac{2\Psi^2 - \varphi \frac{h_0}{H_0}}{2\Psi^2 + \varphi} \sqrt{\frac{1 - \varphi \frac{h_0}{H_0}}{2\Psi^2 + \varphi}}. \quad (39)$$

არასტაციონარული პროცესების დროს ტალღის გავრცელების ხარჯის საანგარიშო ფორმულის მიხედვით, ხარჯის კოეფიციენტის საანგარიშო დამოკიდებულებებს, როცა კერის დახრის კუთხე არის 0, შემდეგი სახე აქვს:

$$m = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{h_0}{H_0} \right) \rho \cos \theta}. \quad (40)$$

იმ შემთხვევაში, როცა ღვარცოფწარმოქმნილი კერა ოთხკუთხა პრიზმის სახით არის წარმოდგენილი, (38) განტოლება შემდეგნაირად შეიძლება წარმოვადგინოთ:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dH} \frac{dH}{dt} = \Omega \frac{dH}{dt}, \quad (41)$$

სადაც: Ω არის ღვარცოფსაცავის ხარჯის ზედაპირის ფართობი და $\omega(H) = \Omega$.

განგარიშების გაადვილების მიზნით, თუ ვაწარმოებთ აპროქსიმაციას ღვარცოფსაცავისას გეომეტრიულად ოთხკუთხა პარალელეპიპედთან, როცა $\Omega = const$, შეიძლება დავწეროთ შემდეგი სახის დამოკიდებულება:

$$W(H) = \Omega H. \quad (42)$$

(42) დამოკიდებულებიდან გამომდინარე, მივიღებთ:

$$\Omega \frac{dH}{dt} = -q. \quad (43)$$

ღვარცოფსაცავიდან ჩამომეწყრილი ღვარცოფული მასის ხარჯის საანგარიშო დამოკიდებულება, როცა ტალღის სიმაღლე H -ის ტოლია:

$$q = bH \sqrt{H \left(1 - \frac{h_0}{H} \right) \rho g \cos \theta}, \quad (44)$$

სადაც: b არის ღვარცოფსაცავის გარღვეული ნაწილის სიგანეა(მ);

H - ღვარცოფსაცავიდან წარმოქმნილი ნაკადის სიმაღლე (მ);

- h_0 - ბმულობის შინაგანი ხახუნის კუთხე;
- φ - კოეფიციენტი და შინაგანი ხახუნის კუთხის ფუნქციას წარმოადგენს;
- g - სიმძიმის ძალის აჩქარება (მ/წმ^2);
- $\cos\theta$ - ღვარცოფსაცავის ფუძესთან დახრის კუთხე.

თუ შემოვიღებთ აღნიშვნას $K = \frac{h_0}{H}$, გავამარტივებთ და გარდაავქმნით, მივიღებთ:

$$q = \sqrt{\frac{1-K}{2}} \varphi \cos\theta b \sqrt{2gH}^{3/2}. \quad (45)$$

(45)-ის გათვალისწინებით (43)-ში, გვექნება:

$$\Omega \frac{dH}{dt} = -\sqrt{\frac{(1-K)}{2}} \varphi \cos\theta b \sqrt{2gH}^{3/2}. \quad (46)$$

ცვლადთა განცალგებით და გარდაქმნებით (46) განტოლება მიიღებს სახეს:

$$\frac{dH}{H^{3/2}} = -\frac{\sqrt{\frac{(1-K)}{2}} \varphi \cos\theta b \sqrt{g} dt}{\Omega}. \quad (47)$$

(47) განტოლების ინტეგრირების საფუძველზე გვექნება:

$$H = \left(\frac{\sqrt{(1-K)} \varphi \cos\theta b \sqrt{g} t}{2\Omega} + c \right)^2. \quad (48)$$

ინტეგრირების მუდმივა განისაზღვრება განტოლებით:

$$\frac{1}{\sqrt{H}} = \left(\frac{\sqrt{(1-K)} \varphi \cos\theta b \sqrt{g} t}{2\Omega} + c \right), \quad (49)$$

როცა $t = 0$, $W = W_0$, $H = H_0$ და $c = \frac{1}{\sqrt{H_0}}$.

ინტეგრირების მუდმივას განსაზღვრის შემდეგ, (49) განტოლება, სიღრმის ცვლილების კანონზომიერება $H = f[H(t)]$ ღვარცოფსაცავის დაცლისა დროში, მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$H_{(t)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{H_0}} + \frac{\sqrt{(1-K)\rho g \cos \theta} bt}{2\Omega}\right)^2} \quad (50)$$

შესაბამისად, ღვარცოფის ხარჯი იქნება:

$$q_{(t)} = \sqrt{(1-K)\rho g \cos \theta} b \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{H_0}} + \frac{\sqrt{(1-K)\rho g \cos \theta} bt}{2\Omega}\right)^3}. \quad (51)$$

ბოლო საშუალო სიჩქარის დროში ცვლილებას ექნება შემდეგი სახე:

$$V_{(t)} = \frac{q_{(t)}}{H_{(t)}} = \frac{\sqrt{(1-K)\rho g \cos \theta}}{b \left(\frac{1}{\sqrt{H_0}} + \frac{\sqrt{(1-K)\rho g \cos \theta} bt}{2\Omega}\right)}. \quad (52)$$

მიღებული (50), (51) და (52) დამოკიდებულებები წარმოადგენს ღვარცოფსაცავის შესაძლო გარღვევის შემთხვევაში მისი მახასიათებლების დროში ცვლილების პარამეტრებს.

პარამეტრების $H_{(t)} = f(t)$, $q_{(t)} = f(t)$ და $V_{(t)} = f(t)$ ცვლილებების კანონზომიერების სურათი, როცა ღვარცოფსაცავში დაგროვილი მასის სიმაღლე $H = 3.0$ მ-ს, $b = 100$ მ-ს, სარკის ზედაპირის ფართობი $\Omega = 6000$ მ²-ს, კერის სიგრძე $L = 60$ მ-ს, $\theta = 0^\circ$ -ს, $K = 0.5$, $\beta = 30^\circ$, $\varphi = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{3}{2}\right) = 0.33$, ღვარცოფსაცავის მოცულობა $W = 18000$ მ³-ს, ღვარცოფის ფუძის დახრის კუთხე $\theta = 0^\circ$ -ს და $\cos \theta = 1.1$, შინაგანი ხახუნის კუთხე $\varphi = 30^\circ$ -ს, შესაბამისად $\varphi = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{3}{2}\right) = 0.33$ და

$$K = \frac{\sqrt{\varphi} - 1}{\sqrt{\varphi} + 1} = 0.75.$$

მოცემულ მნიშვნელობების (50), (51) და (52) ფორმულებში შეტანით, პარამეტრების ცვლილების სურათი წარმოდგენილია ქვემოთ მოყვანილ განტოლებებში:

$$H_{(t)} = \frac{1}{(0.578 + 0.0067t)^2}; \quad (53)$$

$$q_{(t)} = 89.9 \left(\frac{1}{0.578 + 0.0067t} \right)^3; \quad (54)$$

$$V_{(t)} = \frac{q_{(t)}}{H_{(t)}}. \quad (55)$$

თეორიული კვლევების შედეგად, არასტაციონალურობის საფუძველზე მიღებულია ღვარცოფსაცავში დაგროვილი ღვარცოფული მასის სიმაღლის, ღვარცოფის ხარჯისა და მისი გადაადგილების სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულებები.

როგორც ცნობილია, ნაკადის მოძრაობის მიმართულებით სრული ენერჯის ცვლილება როგორც ნაკადის, ისე რეოლოგიური მახასიათებლების ცვლილებების ფუნქციას წარმოადგენს. მისი სიდიდე დინების მიმართულებით ყოველთვის ნაკადის მოძრაობის ხარჯზე ხდება. ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე, შეიძლება დავწეროთ:

$$E = Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g}. \quad (57)$$

პირველი განტოლების დიფერენცირებით მივიღებთ:

$$\frac{dE}{dl} = \frac{dZ}{dl} + \frac{d\left(\frac{P}{\gamma}\right)}{dl} + \frac{d\left(\frac{\alpha V^2}{2g}\right)}{dl}, \quad (58)$$

სადაც: E არის ნაკადის სრული ენერჯია;

Z – ღვარცოფის ფუძის დაცილება საფარდ სიბრტყესთან;

$\frac{P}{\gamma}$ – პიეზომეტრული დაწნევა;

$\frac{\alpha V^2}{2g}$ ან $\frac{P}{\gamma} = h_{\alpha}$ – სიჩქარითი დაწნევა.

რადგან, მეორე განტოლებაში, $\frac{dE}{dl}$ წარმოადგენს ნაკადის მოძრაობის წინააღმდეგობის i_f ქანობს, ხოლო $\frac{dZ}{dl}$ კალაპოტის ფუძის i ქანობს, ზემოთ აღნიშნულიდან შეგვიძლია დავწეროთ:

$$-i_f = -i + \frac{dh_{\alpha}}{dl} + \frac{d\left(\frac{\alpha V^2}{2g}\right)}{dl}. \quad (59)$$

რადგან, ბმულ ღვარცოფში, დაწნევასა და ნაკადის სიღრმეს შორის არსებობს დამოკიდებულება:

$$\frac{dh_{\alpha}}{dl} = \varphi \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \frac{dh}{dl}, \quad (60)$$

ხოლო, როცა $\alpha = 1$, შესაბამისად $\frac{\alpha V^2}{2g} = \frac{V^2}{2g}$ და სიჩქარის დაწნევის დიფერენცირებით გვექნება:

$$\frac{d\left(\frac{V^2}{2g}\right)}{dl} = -\frac{Q^2}{g\omega^3} B \frac{dh}{dl} - \frac{Q^2}{g\omega^3} \frac{\partial \omega}{\partial l}. \quad (61)$$

თუ (59) და (60) განტოლებებს გავითვალისწინებთ (61)-ში, მივიღებთ:

$$-i_f = -i + \varphi \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \frac{dh}{dl} - \frac{Q^2}{g\omega^3} B \frac{dh}{dl} - \frac{Q^2}{g\omega^3} \frac{\partial \omega}{\partial l}. \quad (62)$$

(62) განტოლების გარდაქმნით და გამარტივებით, როცა $\omega_{\alpha} = K\omega$, მივიღებთ:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i - i_f - \frac{Q^2}{g\omega^3} \frac{\partial \omega}{\partial l}}{\varphi \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) - \frac{Q^2}{g\omega^3} B}. \quad (63)$$

რადგან, წინააღმდეგობის ქანობი $i_f = \frac{Q^2}{K^2 \omega^2 C^2 R}$, განტოლება (63)

მიიღებს სახეს:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i - \frac{Q^2}{K^2 \omega^2 C^2 R} \left(1 - \frac{K^2 C^2 R}{g \omega^3} \frac{\partial \omega}{\partial l}\right)}{\varphi \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) - \frac{Q^2}{g \omega^3} B}. \quad (64)$$

მიღებული (64) განტოლება წარმოადგენს ნებისმიერი სწორკუთხა ფორმის კალაპოტში მოძრავი ბმული ღვარცოფის დამყარებული არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებას. ანალოგიური სახის ამოცანის გადაწყვეტა მოცემულია სხვადასხვა სამეცნიერო პუბლიკაციებში.

როგორც განტოლების ანალიზი გვიჩვენებს, განტოლების მნიშვნელის 0-თან ტოლობა მიუთითებს კრიტიკული მდგომარეობის რეჟიმზე და ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის პარალელურობაზე ღვარცოფული კალაპოტის ფუძესთან. როცა მრიცხველი 0-ის ტოლია, ე.ი. როცა $\frac{dh}{dl} = 0$, ადგილი აქვს ნაკადის თანაბარი მოძრაობის რეჟიმს. ჩვენს შემთხვევაში, როცა $\frac{dh}{dl} = 0$:

$$i = \frac{Q^2}{K^2 \omega^2 C^2 R}. \quad (65)$$

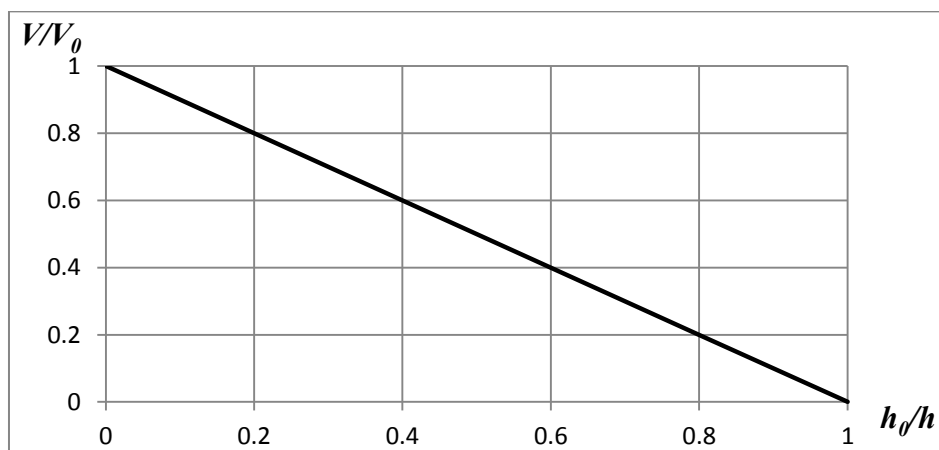
თუ შევიტანთ ხარჯის მნიშვნელობას $Q = \omega V$ (65) განტოლებაში, მოძრაობის სიჩქარის გამოსახულება ბრტყელი ნაკადის შემთხვევაში, ე.ი. როცა $h = R$, მივიღებთ:

$$V = KC\sqrt{hi} = \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \varphi C\sqrt{hi}. \quad (66)$$

როცა, ნაკადის V სიჩქარე ნიუტონური სითხეების სიჩქარის ტოლია, მაშინ:

$$\frac{V}{V_b} = \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \varphi. \quad (67)$$

(67) განტოლების გრაფიკული ილუსტრაცია, როცა $\varphi = 1$, ე.ი. შინაგანი ხახუნის კოეფიციენტი $\beta = 0$, მოცემულია ნახაზზე 1.



ნახ. 1. გრაფიკული დამოკიდებულება $\frac{V}{V_0} = f\left(\frac{h_0}{h}\right)$, როცა $\varphi = 1$.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, შეიძლება დავასკვნათ, რომ კალაპოტის სწორკუთხა კვეთის შემთხვევაში ნაკადის მოძრაობის მიმართულებით, სრული ენერჯის ცვლილების საფუძველზე და რეალური რეოლოგიური მახასიათებლების გათვალისწინებით, მიღებულია ბმული ღვარცოფის დამყარებული არათანაბარი მოძრაობის განტოლება; ნაკადის თანაბარი მოძრაობის რეჟიმისათვის გამოყვნილია მოძრაობის სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულება.

სადისერტაციო ნაშრომის მესამე თავში „ღვარცოფული მოვლენების მოდელირება და ღვარცოფსაწინააღმდეგო ღონისძიებების შემუშავება“ მოცემულია არსებული ღვარცოფსაწინააღმდეგო ღონისძიებების ანალიზი და შეფასება, ღვარცოფსაწინააღმდეგო ელასტიკური ბარიერების გამოყენების სფერო, პროექტირება და ექსპლუატაცია, მდინარე დურუჯის ღვარცოფული აუზის აღწერა და შეფასებულია დღევანდელი მდგომარეობა, ჩატარებულია ღვარცოფსაწინააღმდეგო ელასტიკური ბარიერების კომპიუტერული მოდელირება.

მდ. დურუჯის ღვარცოფული კერის შესასწავლად, გამოყენებულ იქნა აშშ-ს გეოლოგიური სამსახურის (USGS) მიერ Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) და TIRS (Thermal Infrared Sensor) მეშვეობით მიღებული კოსმოდური ფოტოები.

კოსმოსური გადაღებით მიღებული ფოტო მასალის ანალიზისა და მათი GIS პროგრამით დამუშავების შედეგად, დადგენილია რისკის ზონები და შემოთავაზებულია შესაბამისი პრევენციული ღონისძიებების დაგეგმვა.

მდ. დუდუჯის ღვარცოფული აუზის შესწავლის საფუძველზე, პროგრამა DEBFLOW გამოყენებით ჩვენს მიერ განხილულ იქნა 4 ძირითადი სიტუაცია.

სიტუაცია I : ღვარცოფის პირველი ტალღა ზემოქმედებს ბარიერზე ქვედა დიობის ნაწილში. ღვარცოფის შუბლი აღწევს ბადეს. ჰიდროსტატიკური წნევა ($P_{hyd.}$) და დინამიკური კომპონენტა ახდენენ ნაკადის სიმაღლეზე გაფანტულ ზემოქმედებას (h_{fl}) ქვედა მზიდ ბაგირზე. მისი ძალა დამოკიდებულია ღვარცოფული ნაკადის ტიპზე, სიჩქარესა და სიმკვრივეზე.

სიტუაცია II: ღვარცოფული ნაკადის h_{fl} სიმაღლის მქონე მეორე ტალღა გადაფარავს ბარიერის მიერ შეკავებულ პირველ ტალღას. ამ შემთხვევაში ჰიდროსტატიკური წნევა მოქმედებს $2h_{fl}$ სიმაღლით აკუმულირებული დანალექის მეშვეობით. მეორე ტალღის მყარი მასის წნევა დაგროვილ დანალექზე ახდენს დრენირების ეფექტს.

სიტუაცია III: ბარიერი აკავებს მომდევნო ტალღებს. შეკავებული ღვარცოფული ტალღების ჯამური რაოდენობა განისაზღვრება ნაკადისა და ბარიერის სიმაღლით. მიმდევრობა პირველი და მეორე სიტუაციების ანალოგიურია. ყოველი მომდევნო ტალღა გადაფარავს წინამორბედს. ჰიდროსტატიკური წნევა ($P_{hyd.}$) დამოკიდებულია ბარიერის მყარი მასით შევსების სიმაღლეზე, ხოლო დინამიკური ზემოქმედება - მესამე ტალღის სიმაღლეზე (h_{fl}). ჰიდროსტატიკური წნევა ნელნელა მცირდება რაც დამოკიდებულია მყარი მასის მახასიათებლებზე, მის ფილტრაციურ თვისებებსა და შევსების დროზე. საბოლოო ჯამში ჰიდროსტატიკურ წნევა დადის გრუნტის აქტიურ გვერდით წნევამდე.

სიტუაცია IV, გადადინება: მომდევნო ტალღა გადაედინება შევესებულ ბადეზე. იგი ბადეზე ზემოქმედებს ღვარცოფული მასით

გამოწვეული დამატებითი დატვირთვით σ და დამძვრელ T ზემოქმედებას ახდენს. გადადინების დაწყების შემდეგ დატვირთვები არ იზრდება. დაგროვილ მასაზე მოქმედებს გადადინებული მასა და მხები ძაბვები, რომლებიც ზრდის ბარიერზე ჰიდროსტატიკურ წნევას ($\sigma + P_{hyd}$). ჰიდროსტატიკური წნევა მცირდება ღვარცოფული დანალექის ფილტრაციული მახასიათებლებისა და ბარიერის შევსების დროის მიხედვით.

შემუშავებული მოდელები საშუალებას იძლევა გაანგარიშებულ იქნას ელასტიკური ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარიერების პარამეტრები კონსტრუქციის მახასიათებლების, დატვირთვებისა და საჭირო სიმტკიცის მარაგის კოეფიციენტების გათვალისწინებით. აღსანიშნავია, რომ ბარიერების მოდელები და კონსტრუქციები გამოცდილია პრაქტიკაში, რაც კიდევ ერთხელ მიუთითებს გამოთვლების სიზუსტესა და კონსტრუქციის საიმედოობაზე.

ზოგადი დასკვნები

ნაშრომში წარმოდგენილი თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევების შედეგების კრიტიკული ანალიზის საფუძველზე გამოტანილია დასკვნები:

- ხარისხობრივი ფუნქციების გამოყენებით მიღებულია ღვარცოფსაცავში დაგროვილი ღვარცოფული მასის სიმაღლის, ღვარცოფის ხარჯისა და მისი გადაადგილების სიჩქარის საანგარიში დამოკიდებულებები. კვლევის შედეგებმა დაადასტურა, რომ თეორიულად და ექსპერიმენტული მასალის საფუძველზე მიღებულ K-ს მნიშვნელობებს შორის განსხვავება არ აღემატება 10%-ს.
- არასტაციონარულობის საფუძველზე მიღებულია ღვარცოფსაცავში დაგროვილი ღვარცოფული მასის სიმაღლის, ღვარცოფის ხარჯისა და მისი გადაადგილების სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულებები. მიღებული დამოკიდებულებების საფუძველზე, შესაძლებელია განისაზღვროს მახასიათებლების ცვლილების კანონზომიერება ღვარცოფის ტალღის გავრცელების ზონაში და შეირჩეს შესაბამისი ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობა.
- ჩატარებული კვლევების საფუძველზე და ბმული ღვარცოფის რეოლოგიური ბუნებიდან გამომდინარე მიღებულია დამყარებული მოძრაობის დიფერენციალური განტოლება. მიღებულ განტოლებიდან, შესაბამისი დაშვების საფუძველზე, გამოყვანილია ბმული ღვარცოფის არათანაბარი მოძრაობის სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულება, რომლის სიდიდე წყლის ნაკადის სიჩქარეზე ნაკლებია და რეოლოგიური პარამეტრების გავლენით არის გამოწვეული.

ნაშრომის აპრობაცია. სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი დებულებები მოხსენებული იყო საქართველოს სოფლის მეურნეობის მეცნიერებათა აკადემიის 2015 წლის საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციაზე “გლობალური დათბობა და აგრობიომრავალფეროვნება”.

გამოქვეყნებული შრომების სია

1. ი. ყრუაშვილი, ი. ინაშვილი, ი. კლიმიაშვილი, ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარიერების საპროექტო პარამეტრების კომპიუტერული მოდელირება. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია “გლობალური დათბობა და აგრობიომრავალფეროვნება”. საქართველოს სოფლის მეურნეობის მეცნიერებათა აკადემია. გვ. 334-337. 2015.
2. ი. ყრუაშვილი, ე. კუხალაშვილი, ი. ინაშვილი, კ. ბზიავა, ი. კლიმიაშვილი. ბმული ღვარცოფის არათანაბარი მოძრაობის მათემატიკური მოდელი. სტუ, ჰიდროინჟინერია, # 1-2 (17-18). გვ. 42-45, 2014.
3. ი. ყრუაშვილი, ე. კუხალაშვილი, ი. ინაშვილი, ი. კლიმიაშვილი. ღვარცოფულ კერებში დაგროვილი მასის წონასწორობის რღვევის განსაზღვრა ხარისხობრივი ფუნქციების გამოყენებით. სტუ, ჰიდროინჟინერია, # 1-2 (17-18). გვ. 72-80, 2014.
4. ი. ყრუაშვილი, ე. კუხალაშვილი, ი. ინაშვილი, ი. კლიმიაშვილი. არასტაციონალურობის საფუძველზე ღვარცოფსაცავის მახასიათებლების ცვლილების კანონზომიერების განსაზღვრა. სტუ, ჰიდროინჟინერია, # 1-2 (17-18). გვ. 46-53, 2014.

Conclusions

On the base of critical analysis of theoretical and experimental research presented in the work it's possible to draw the following conclusions:

- Using the degree functions, obtained the calculated dependences for determination of the debris flow mass' height in the debris flow's original site, debris flow discharge and moving velocity. The study results confirmed that the difference between values K , obtained on the basis of theoretical and experimental research, does not exceed 10%.
- On the basis of non stationarity there are received the calculated dependences of the debris flow original sites mass height, discharge and speed of movement. On the basis of the obtained equations, we can define the regularity of changes in the zone of the wave propagation, and choose the appropriate construction against debris flow.
- Description of motion conditions of debris-flow and excretion of the relevant equations is a function of many factors. Based on the carried out researches and rheological nature of debris-flow, we obtained differential equation of steady motion. Given appropriate assumptions we obtained calculated dependence of the velocity of non-uniform motion of debris-flow, which value is less then water flow velocity and caused by the influence of rheological parameters.