

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ქეთევან დადიანი

ჰიპერკონცენტრირებული ლვარცოფის მდგრადობა და
ნაგებობაზე ზემოქმედების შესაძლებლობები

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა „მშენებლობა“

შიფრი 0732

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

2022 წ.

საავტორო უფლება © 2022 წელი ქეთევან დადიანი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

სამშენებლო ფაკულტეტი

წყალმომარაგების, წყალარინების, თბოაირმომარაგების და შენობების

საინჟინრო აღჭურვის დეპარტამენტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავაცანით ქეთევან დადიანის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ჰიპერკონცენტრირებული ღვარცოფის მდგრადობა და ნაგებობაზე ზემოქმედების შესაძლებლობები“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ----- საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

_____, _____ 2022 წელი

ხელმძღვანელი:	გივი გავარდაშვილი ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი
რეცენზენტი:	ზურაბ გვიშიანი პროფესორი
რეცენზენტი:	დავით კერესელიძე პროფესორი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2022 წ.

ავტორი: ქეთევან დადიანი

დასახელება: „ჰიპერკონცენტრირებული ღვარცოფის მდგრადობა და ნაგებობაზე ზემოქმედების შესაძლებლობები“

სადოქტორო პროგრამა: „მშენებლობა“

ხარისხი: მისანიჭებელი კვალიფიკაცია — აკადემიური დოქტორი

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

ღვარცოფის გარემოზე ზემოქმედება გლობალური სახითაა წარმოდგენილი და დიდ ზიანს აყენებს ეკოლოგიურ წონასწორობას.

წყალშემკრებ აუზებში ჰიდროგრაფიული ქსელის შესწავლის ანალიზით იკვეთება ღვარცოფული ხასიათის სადინარების მაღალი ენერგეტიკული პოტენციალი; ფორმირებული ღვარცოფების რეჟიმების ცვლილების განსაკუთრებულობები, ფიქსირებულ ღვარცოფთა ცვლადი კვეთის სადინარებში მოძრაობა და სიმტკიცის თვალსაზრისით სატრანსპორტო მონაკვეთებზე კალაპოტების მდგრადობის რღვევა; ფორმირებულ ღვარცოფებზე შემხვედრი წინააღმდეგობების ზემოქმედება; სატრანზიტო მონაკვეთებში ნაკადის ცვლად კვეთში მოძრაობის შემთხვევებში მოძრავი ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ტალღის ხასიათის ფორმირება; სადინარებში შემხვედრი წინააღმდეგობებით ნაკადის მდგრადობის როგორც ნელცვლადი ისე უეცარი შეცვლის შესაძლებლობები.

ღვარცოფსადინარებში ნაკადის მდგრადობისა და ნაგებობებზე ზემოქმედების კვლევების საფუძველზე, ინოვაციური მოდელების გამოყენებით, ფორმირების, სადინარში მოძრაობის და შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების, სრულყოფილად აღწერის მიზნით შერჩეული იქნა მათემატიკური მოდელები, დაზუსტდა ღვარცოფული პროცესების გაანგარიშების მეთოდოლოგია, კერძოდ:

– ზღვრული წარმოშობის მოდელის საფუძველზე და მდგრადობის განმსაზღვრელი ფაქტორების სხვადასხვა ვარიანტების გამოყენებით დადგენილ იქნა წონასწორობის რღვევის და მდგრადობის განმსაზღვრელი კრიტერიუმები სათანადო უტოლობების შერჩევით; გრუნტების მექანიკის კანონებზე დაყრდნობით და ჰიდრაულიკაში ნაკადის ცვლადი ხარჯის განსაზღვრის მოდელების ანალოგების გამოყენებით მიღებულია კერიდან ღვარცოფის წონასწორობის რღვევის შედეგად ტალღის სახით ფორმირებული ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის და გავრცელების სიგრძეზე ინოვაციური დამოკიდებულებები; ღვარცოფთა სადინარში დაუმყარებელი

არათანაბარი მოძრაობის, ქცევის, მდგრადობის ცვლილების, შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ენერგეტიკული ზემოქმედების საანგარიშო პარამეტრების შეფასების და საანგარიშო დამოკიდებულებების გამოყვანის მიზნით, რეოლოგიასთან კავშირში, შედგენილია მოძრაობის მათემატიკური მოდელი დიფერენციალური განტოლების სახით. ზოგიერთი გამარტივებით და დაშვების საფუძველზე ცალკეული მდგრადობის გადაწყვეტის მიზნით გამოყვანილია საანგარიშო დამოკიდებულებები;

– სადინარში ღვარცოფის მოძრაობის შემთხვევისათვის ჰიდრავლიკური რეჟიმის ცვლილებასთან კავშირში, მდგრადობის რღვევისა და ტრასპორტუნარიანობის გაზრდილი შესაძლებლობების დადგენის დროს, რეჟიმების წონასწორულ მდგომარეობაზე დაყრდნობით შეფასებულია მდგრადობის დაკარგვის განმსაზღვრელი კრიტერიუმების უტოლობები. შეფასებულია ნაკადის კვეთის ენერჯის ცვლილების შესაძლებლობები კრიტიკული მდგომარეობასთან კავშირში;

– რეჟიმების ცვლილების კრიტერიალურ უტოლობაზე დაყრდნობით და ღვარცოფის კინემატიკურობიდან გამომდინარე შეფასებულია ღვარცოფის კრიტიკული მდგომარეობა და გამოყვანილია მდგომარეობის განმსაზღვრელი პარამეტრების საანგარიშო დამოკიდებულებები სადინარის კალაპოტის ფორმებთან კავშირში;

– დიფერენციალურ განტოლებების ანალიზზე დაყრდნობით და რეოლოგიის გათვალისწინებით მიღებულია არათანაბარი მოძრაობის ინოვაციური დიფერენციალური განტოლებათა სისტემა. განტოლების ამოხსნის დროს გამოყენებული ინტეგრირების მიახლოებითი მეთოდები; გადაადგილების დროის ფუნქციასთან კავშირში და განტოლებათა სისტემის დეტერმინანტების მეთოდის გამოყენებით მიღებულია პირდაპირი და უკუ ტალღის დიფერენციალური განტოლებები;

– შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედებით ღვარცოფის შემფოთების ზონის შეფასება განხორციელებულია მასალათა გაჭიმვა კუმშვის თეორიებზე დაყრდნობით მიღებულია მისი ღვარცოფის მასაში ტალღის გავრცელების სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულება;

– გამოყვანილია მდგრადობადაკარგული ღვარცოფის პარამეტრების სრულიად ახალი საანგარიშო დამოკიდებულებების სახეები რეოლოგიასთან კავშირში ტალღის ფორმით მოძრაობის დროს.

სადისერტაციო ნაშრომი წარმოდგენილია შესავლით, 4 თავით და ძირითადი დასკვნებით. მათ შორის მოცემულია 12 ნახაზი, 4 ცხრილი და 8 სურათი. გამოყენებულია 107 დასახელების ლიტერატურა.

Abstract

The impact of the flood on the environment is presented globally and causes great damage to the ecological balance.

The analysis of the hydrographical network in the catchment basins reveals the high energy potential of the channels with debris flow character; Peculiarities of change of formed debris flow regimes, movement of fixed debris flows through the variable cross-section ducts and disruption of bed stability on transport sections in terms of strength; Impact of counter resistance on formed debris flows; Formation of the free-surface wave nature of the moving flow in cases of movement through the variable cross-section in transit sections; Possibilities of both slow and abrupt change of flow stability with counter resistance in ducts.

Based on the studies of flow sustainability and impacts on the constructions, using innovative models, mathematical models were selected to comprehensively describe the formation, movement in the duct and the impact on counter obstacles, the methodology for calculating flood processes was specified, namely:

– Based on the marginal origin model and using different variants of sustainability determinants, equilibrium and stability defining criteria were established by selecting appropriate inequalities; Based on the laws of ground mechanics and using analogs of models for the determination of variable flow rates in hydraulics, innovative dependencies on the free surface area and propagation length of the wave formed as a result of the disruption of the debris flow equilibrium from the heart are obtained; In order to evaluate the calculation parameters of the unsteady uneven motion in the debris flow duct, behavior, stability change, energetic impact on the counter resistance, and to derive the calculation dependencies in connection with rheology, a mathematical model of motion in the form of differential equation is compiled. With some simplifications and on the basis of the assumption, computational relationships are derived to address individual sustainability;

– In case of debris flow movement in the duct in connection with the change of the hydraulic regime, the inequalities of the criteria for the determination of the stability loss are estimated based on the regimes equilibrium state in the determination of the potential for sustainability disruption and increased transport capacity. The possibilities of changing the cross-sectional energy of the flow in relation to the critical condition are evaluated;

– Based on the criterion inequality of the change of regimes and the kinematics of the debris flow, the critical state of the debris flow is evaluated and the computational relationships of the conditioning parameters in relation to the forms of the canal bed are derived;

– Based on the analysis of differential equations, a system of innovative differential equations of unequal motion is obtained by considering rheology. Approximate integration methods used to solve the equation; In relation to the movement time function and using the method of determinants of the system of equations, differential equations of direct and reverse wave are obtained;

– Influenced by the oncoming contradictions, the assessment of the debris flow anxiety zone is carried out based on the theories of stretching-compression of the materials. The calculated dependence of the wave propagation velocity through its debris flow mass is obtained;

– Completely new types of computational dependence of the unstable debris flow parameters during motion in the form of wave in connection with rheology are related.

The dissertation is presented with an introduction, 4 chapters and main conclusions. Among them are 12 drawings, 4 tables and 8 pictures. 107 titles of literature are used.

შინაარსი

ცხრილების ნუსხა	11
ნახაზების ნუსხა	11
სურათების ნუსხა	12
მადლიერების გვერდი	13
შესავალი	14
თავი 1. ღვარცოფთა მდგრადობაზე არსებული მასალების მიმოხილვა და ანალიზი	19
1.1. ღვარცოფთა მდგრადობა და შესწავლის თანამედროვე მდგომარეობა	19
1.2. ღვარცოფების მდგრადობა და შემხვედრი წინააღმდეგობებით ზემოქმედება	31
1.3. სადინარში მოძრავი ღვარცოფის ჰიდრაულიკური პარამეტრები	38
თავი 2. ღვარცოფთა რისკებისა და სტიქიის გაანგარიშების თეორიული და სავსე კვლევის ოპერატიული საშუალებები	45
2.1. სავსე კვლევის გათვალისწინება. ღვარცოფთა ფორმირების ენერგეტიკული პოტენციალი და საანგარიშო მახასიათებლები	45
2.2. ბმული ღვარცოფის დაუმყარებელი არათანაბარი მოძრაობა .	53
2.3. ფორმირებული ღვარცოფის ცვლადი ხარჯით მოძრაობა	59
2.4. ფორმირებული ღვარცოფის ცვლადი ხარჯით მოძრაობა	67
თავი 3. ფორმირებული ღვარცოფის მდგრადობა	76
3.1. კერაში ფორმირებული ღვარცოფის მდგრადობის შეფასების მათემატიკური მოდელები	76
3.2. მოძრავი ჰიპერკონცენტრირებული ღვარცოფის მდგრადობის კრიტერიუმები	84
3.3. ბმული ღვარცოფის კრიტიკული მახასიათებლები	97
თავი 4. ტალღის ფორმით ღვარცოფის მოძრაობა	105

4.1.	გრძივი ტალღის ფორმით მოძრავი ღვარცოფის დიფერენციალური განტოლება	105
4.2.	ტალღის გავრცელება ღვარცოფში	114
4.3.	ტალღის ფორმით მოძრავი ღვარცოფის მახასიათებლები	119
	ძირითადი დასკვნები	124
	გამოყენებული ლიტერატურა	129

ცხრილების ნუსხა

1. გრანულომეტრიული საცრების გრადაციები	49
2. ლაბორატორიული კვლევები (ნიმუში I)	49
3. ლაბორატორიული კვლევები (ნიმუში II)	50
4. ლაბორატორიული კვლევები (ნიმუში III)	50

ნახაზების ნუსხა

1. პირველი ნიმუშის გრანულომეტრიის ინტეგრალური მრუდი	51
2. მეორე ნიმუშის გრანულომეტრიის ინტეგრალური მრუდი	51
3. მესამე ნიმუშის გრანულომეტრიის ინტეგრალური მრუდი	52
4. ღვარცოფის მოძრაობის საანგარიშო სქემა	62
5. ბმულ ღვარცოფში აქტიური წნევის საანგარიშო სქემა	78
6. ღვარცოფის ტალღის ფორმით გადაადგილების სქემა	86
7. ტალღის გადაადგილების სიჩქარის კავშირი რეოლოგიურ მახასიათებლებთან 1) $\psi = 1$; 2) $\psi = 0,5$; 3) $\psi = 0,2$	90
8. $C_{\omega} / C_{\psi} f(a)$ დამოკიდებულების გრაფიკი	92
9. $h_{\psi} = f \left[\frac{\omega^3}{B} \left(1 - \frac{h_0}{h_{\psi}} \right)^3 \right] \frac{aQ^2}{g}$ დამოკიდებულების გრაფიკი	95
10. გრაფიკული დამოკიდებულება $K = f(h_0 / h)$; $K = (1 - h_0 / h)\psi$	113
11. კუმშვის კოეფიციენტის სიმკვრივესთან დამოკიდებულების გრაფიკი	118
12. ღვარცოფის ტანში ტალღის გავრცელების სიჩქარის დამოკიდებულება მის მახასიათებლებთან კავშირში	118

სურათების ნუსხა

1. ნაღვარევის ხევი	47
2. ანათვლების დაფიქსირება	47
3. სამუშაო პროცესი	47
4. ნიმუშების ამოღების პროცესი	48
5. საინტერესო რჩევები	48
6. თერგი დამწვდევამდე	53
7. მყინვარი დევდორაკი	56
8. დამცავი საყრდენი კედელი	58

მადლიერების გვერდი

მინდა დიდი მადლობა გადავუხადო ჩემი დისერტაციის სამეცნიერო ხელმძღვანელს, პროფ. გივი გავარდაშვილს, რომელიც თავის მრავალმხრივ ცოდნასა და გამოცდილებას მიზიარებდა როგორც დოქტორანტურაში სწავლის პერიოდში, ისე სადისერტაციო ნაშრომის მომზადების ყველა ეტაპზე. მადლობას ვუხდით მას შემოთავაზებული თემისათვის, სამუშაოსადმი გამოჩენილი ყურადღებისა და დახმარებისთვის.

მადლობას ვუხდით პროფესორ ედუარდ კუხალაშვილს გვედში დგომისა და უდიდესი დახმარებისთვის.

მადლობას ვუხდით განყოფილების ხელმძღვანელებს, რომლებმაც თემატიკასთან დაკავშირებით სასარგებლო რჩევები მომცეს.

მადლობას ვუხდით საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის თანამშრომლებს, წყალმომარაგების, წყალ-არინების, თბოაირმომარაგების და შენობათა საინჟინრო აღჭურვის დეპარტამენტის ხელმძღვანელს, პროფესორ ალექსანდრე დავითაშვილს.

მადლობას ვუხდით შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნულ სამეცნიერო ფონდს, ფინანსური დახმარებისთვის.

მადლობას ვუხდით ყველა ჩემს მეგობარს დახმარებისა და გვერდში დგომისთვის.

შესავალი

ლანდშაფტური ინფრასტრუქტურა ეროვნული სიმდიდრის განმსაზღვრელია, რომელსაც განსაკუთრებული გაფრთხილება, შენარჩუნება და დაცვა სჭირდება.

საქართველო მთაგორიანი ქვეყანაა. მისი მთისა და მთისწინა ზონა ქვეყნის ტერიტორიის 54%-ს შეადგენს და მდიდარია ჰიდროგრაფიული ქსელით. ქვეყნის მდინარეთა 90% ღვარცოფულია. ტერიტორიაზე არსებული ინფრასტრუქტურა მდგრადობისა და ეკოლოგიური წონასწორობის რღვევის შემთხვევებით გამუდმებით განიცდის ცვალებადობას. დაცვითი ღონისძიებების დანიშნულებებს, სახეობებს, განსაზღვრავს გარემოს დამცავი ნაგებობის კონსტრუქციული გადაწყვეტები და მასზე მოქმედი ბუნებრივი ანომალიების დასარეგულირებელი მახასიათებლები.

ინფრასტრუქტურაზე მოქმედ ანომალიებს შორის მნიშვნელოვანია ღვარცოფები, მეწყრები, წყალდიდობები, თოვლის ზვავები. ეკოლოგიური წონასწორობის დისბალანსში და ზარალის მოტანის შედეგებში განსაკუთრებული ზემოქმედების სიხშირით გამოირჩევა ბმული ღვარცოფები, რომელთა გააქტიურება ბოლო 10 წლის მონაცემებით გეომეტრიული პროგრესით არის გაზრდილი.

აღნიშნული მოვლენის გარემოზე ზემოქმედება სატრანზიტო უბანზე სადინარის კალაპოტების დეფორმაციასთან და ნაკადის მდგრადობის დარღვევასთან არის დაკავშირებული.

ღვარცოფის გარემოზე ზემოქმედება გლობალური სახისაა და დიდ ზიანს აყენებს ეკოლოგიურ წონასწორობას. ხშირად მოვლენას თან ახლავს ადამიანის მსხვერპლი. საქართველოს ტერიტორიის მეოთხედი ღვარცოფების გაძლიერებული ინტენსივობის ზონაშია მოქცეული. მისი ინფრასტრუქტურის მდგრადობის კარგვის რისკები სადინარის კალაპოტისა და მასში გამდინარე ნაკადის ურთიერთქმედებასთან არის დაკავშირებული. როცა იცვლება ნაკადის რეჟიმი, იგი შეიძლება სადინარის მდგრადობის კარგვის მიზეზი გახდეს ან პირიქით. ხშირად ადგილი აქვს ნაკადის დინამიკური

ღერძის ცვლილებას და წონასწორობის ადგილიდან გადაწევას.

წყალშემკრებ აუზებში ჰიდროგრაფიული ქსელის შესწავლის შედეგებით იკვეთება ღვარცოფული ხასიათის სადინარების მაღალი ენერგეტიკული პოტენციალი: ფორმირებული ღვარცოფების რეჟიმების ცვლილების განსაკუთრებულობები, ფიქსირებულ ღვარცოფთა ცვლადი კვეთის სადინარებში მოძრაობა და სიმტკიცის თვალსაზრისით სატრანსპორტო მონაკვეთებზე კალაპოტების მდგრადობის რღვევა, ფორმირებულ ღვარცოფებზე შემხვედრი წინააღმდეგობების ზემოქმედება, სატრანზიტო მონაკვეთებში ნაკადის ცვლად კვეთში მოძრაობის შემთხვევებში მოძრავი ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ტალღის ხასიათის ფორმირება, სადინარებში შემხვედრი წინააღმდეგობებით ნაკადის მდგრადობის როგორც ნელცვლადი ისე უეცარი შეცვლის შესაძლებლობები, მდგრადობა დაკარგული ნაკადის კალაპოტიდან გადმოღვრის შესაძლებლობები, შემხვედრი წინააღმდეგობებით უკუდინების წარმოქმნის შესაძლებლობები, მათი ზედაპირებიდან ამოშხეფვის ან გადადინების შემთხვევები ძნელად გადასაწყვეტ ამოცანათა კატეგორიას განეკუთვნება.

სამუშაოს მიზანი

კვლევის მიზანს კერაში ფორმირებული და სადინარში მოძრავი ღვარცოფის საანგარიშო მახასიათებლების, კერძოდ კერაში ფორმირებული ღვარცოფის ენერგეტიკული პოტენციალის, ცვლადი მასით მოძრაობის დაწყების და მდგრადობის განმსაზღვრელი კრიტერიუმების, ფორმირებული ღვარცოფების რეჟიმების ცვლილების, ფორმირებული ღვარცოფის ცვლადი ხარჯით მოძრაობის, მდგრადობის კრიტერიუმის და კრიტიკული მახასიათებლების, გრძივი ტალღის ფორმით მოძრავი ღვარცოფის ტანში ტალღის სიჩქარის შეფასებას და ტალღის ფორმით მოძრაობის შემთხვევაში ნაკადის საანგარიშო მოდელებისა და გაანგარიშების მეთოდოლოგიის დაზუსტება-დადგენა და საანგარიშო დამოკიდებულებების გამოყვანა წარმოადგენს.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები

კერიდან ფორმირებული და სატრანზიტო უბანზე მოძრავი ღვარცოფი ხასიათდება მდგრადობის რღვევით და მოძრაობის რეჟიმების განსაკუთრებული ბუნებით. აღნიშნულიდან გამომდინარე კვლევის ობიექტს კერებში ფორმირებული ღვარცოფის მდგრადობის რღვევის განმსაზღვრელი კრიტერიუმები, ღვარცოფსადინარები, სადინარში მოძრავი ღვარცოფების მდგრადობის, ღვარცოფის მოძრაობის რეჟიმების ცვლილების შესაძლებლობების განმსაზღვრელი მახასიათებლები და საანგარიშო ოპერატიული მოდელები წარმოადგენს.

სადისერტაციო ნაშრომის დაგეგმილი ამოცანების გადაწყვეტის დროს გამოყენებულ იქნა სამეცნიერო მიდგომები და კვლევის მეთოდები.

– კერაში ჩამოყალიბებული ღვარცოფული მასის დამაბული მდგრადობის შეფასება განხორციელებულია გრუნტების მექანიკაში გამოყენებული ანალოგიებით, ხოლო ტალღური მოძრაობის აღწერის მიზნით მათემატიკური მეთოდები;

– ღვარცოფის სადინარში ქცევის, ენერგეტიკული მახასიათებლებისა და მდგრადობის განსაზღვრის მეთოდიკა;

– არაპრიზმულ კალაპოტში მოძრავი ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის შეფასების მეთოდიკა;

– მოძრავი ღვარცოფის მდგრადობის განსაზღვრის მეთოდი;

– მდგრადობის კრიტერიუმების განსაზღვრის დროს, ტალღის წარმოქმნის, ნაკადის კუმშვის, სადინარის კონფიგურაციაზე გარშემოვლითი, დარტყმის ბიძგების განსაზღვრის მეთოდიკა.

ნაშრომის ძირითადი შედეგები და მეცნიერული სიახლე

ღვარცოფსადინარებში ნაკადის მდგრადობისა და ნაგებობებზე ზემოქმედების კვლევების საფუძველზე, ინოვაციური მოდელების გამოყენებით, ფორმირების, სადინარში მოძრაობის, მდგრადობისა და შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების პროცესების სრულყოფილად აღწერის მიზნით შერჩეული იქნა მათემატიკური მოდელები და დაზუსტებულია

განგარიშების მეთოდოლოგია:

- ზღვრული წარმოშობის მოდელის საფუძველზე და მდგრადობის განმსაზღვრელი ფაქტორების სხვადასხვა ვარიანტების გამოყენებით. დადგენილ იქნა წონასწორობის რღვევისა და მდგრადობის განმსაზღვრელი კრიტერიუმები შესაბამისი უტოლობებით;
- გრუნტის მექანიკის კანონებზე დაყრდნობით და ჰიდრავლიკაში ნაკადის ცვლადი ხარჯის განსაზღვრის მოდელებზე დაყრდნობით მიღებულია კერიდან ღვარცოფის მდგრადობის რღვევის შედეგად ტალღის სახით ფორმირებული ნაკადის თავისუფალი ზედაპირისა და გავრცელების ინოვაციური დამოკიდებულებები;
- ღვარცოფთა სადინარში დაუმყარებელი არათანაბარი მოძრაობის, ქცევის, რეჟიმების ცვლილების, შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ენერგეტიკული ზემოქმედების საანგარიშო პარამეტრების შეფასებისა და საანგარიშო დამოკიდებულებების გამოყვანის მიზნით, რეოლოგიასთან კავშირში, შედგენილია მოძრაობის მათემატიკური მოდელი დიფერენციალური განტოლების სახით. ზოგიერთი გამარტივებით და დაშვების საფუძველზე ცალკეული ამოცანების რეჟიმების გათვალისწინებით გამოყვანილია საანგარიშო დამოკიდებულებები;
- სადინარში ღვარცოფის მოძრაობის შემთხვევისათვის ჰიდრავლიკური რეჟიმის ცვლილებასთან კავშირში, მდგრადობის რღვევისა და ტრასპორტუნარიანობის გაზრდილი შესაძლებლობების დადგენის მიზნით, რეჟიმების წონასწორულ მდგომარეობაზე დაყრდნობით შეფასებულია მდგრადობის კარგვის შესაძლებლობები, მიღებულია კრიტერიუმების განმსაზღვრელი უტოლობები და შეფასებულია ნაკადის კვეთის ენერჯის ცვლილება, კრიტიკული მდგომარეობის გათვალისწინებით;
- ღვარცოფის კინემატიკურობიდან გამომდინარე და რეჟიმების ცვლილების კრიტერიალურ უტოლობაზე დაყრდნობით დადგენილია ნაკადის კრიტიკული მდგომარეობა და გამოყვანილია განმსაზღვრელი

პარამეტრების საანგარიშო დამოკიდებულებები სადინარის კალაპოტის ფორმების გათვალისწინებით;

- ღვარცოფულობის ბუნებიდან გამომდინარე და დაუმყარებელი მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებებზე დაყრდნობით მიღებულია არათანაბარი მოძრაობის ახალი დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა. სისტემის ამოხსნის მიზნით გამოყენებულია ინტეგრირების მიახლოებითი მეთოდები. ღვარცოფის გადაადგილების დროის ფუნქციასთან კავშირით და წარმოდგენილ განტოლებათა სისტემის დეტერმინანტების მეთოდის გამოყენების საფუძველზე მიღებულია გრძივი ტალღის სახით მოძრავი ღვარცოფის პირდაპირი და უკუტალღის დიფერენციალური განტოლებები;
- შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების და შემფოთების ზონის შეფასების მიზნით გამოყენებულია მასალის გაჭიმვა-კუმშვის თეორიები და მიღებულია ღვარცოფულ მასაში ტალღის გავრცელების სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულებები;
- ტალღის ფორმით მოძრაობის შემთხვევისათვის მიღებულია მდგრადობადაკარგული ღვარცოფის სრულიად ახალი სახეები რეოლოგიასთან კავშირში.

შედეგების გამოყენების სფერო

ღვარცოფთა მდგრადობის შეფასების მეთოდები და ნაგებობებზე ზემოქმედებით ნაკადის სარეგულაციო პარამეტრების განსაზღვრის მეთოდოლოგია, მნიშვნელოვნად შეუწყობს ხელს გარემოს დაცვითი ღონისძიებების შერჩევას და ეკოლოგიური წონასწორობის შენარჩუნებას.

ცალკეული ამოცანების გადაწყვეტით მიღებული შედეგები დახმარებას გაუწევს ჰიდროტექნიკაში, წყალმომარაგებასა და წყალარინებაში, ჰიდრავლიკაში, მშენებლობაში და სხვა მომიჯნავე დარგში მოღვაწე მეცნიერებს სამომავლო კვლევების წარმოების დროს.

თავი 1. ღვარცოფთა მდგრადობაზე არსებული მასალების მიმოხილვა და ანალიზი

1.1. ღვარცოფთა მდგრადობის შესწავლის თანამედროვე მდგომარეობა

ღვარცოფები განეკუთვნება ანომალიურ სტიქიათა იმ კატეგორიას, რომელიც ერთ-ერთ არსებით ხელშემშლელ ძირითად ფაქტორს წარმოადგენს ეროვნული მეურნეობის განვითარებაში, მთისა და მთისწინა ტერიტორიების ათვისების საქმეში. არ არსებობს სოფლის მეურნეობის დარგი რომელზედაც დიდ ზიანს არ ახდენს ღვარცოფი. შეიძლება მოვიყვანოთ ასეული ათასობით ღვარცოფთა გავლის შემთხვევები დასახლებული პუნქტების ნგრევისა და მწყობრიდან გამოყვანის მაგალითები, რომელიც საკმარისი სიზუსტით წარმოდგენას იძლევა ბუნების ამ ანომალიურ სტიქიაზე.

ღვარცოფული მოვლენების წარმოქმნაში უპირატესად ადგილი თავსხმა წვიმებს უკავია, ხოლო შედარებით ნაკლები გავლენით ხასიათდება თოვლის დნობის, მიწისძვრის შემთხვევა და სხვა ფაქტორებიც.

სადღეისო მონაცემებით ღვარცოფული ნაკადების რეგულირება თავსხმა წვიმებით გამოწვეული წყალდიდობებთან ბრძოლის მეთოდების ანალოგიურია და გამოყენებული ღონისძიებებით მიღებული ესა თუ ის შედეგი ყოველთვის ვერ პასუხობს გარემოს უსაფრთხოებას. ღვარცოფული ნაკადების გარემოზე დამანგრეველი ზემოქმედების თავიდან აცილება შეიძლება განხორციელდეს ღვარცოფწარმოქმნელ აუზებში ღვარცოფ-მაფორმირებელი ხელშემწყობი ფაქტორების ლიკვიდაციით ან ფორმირებულ ნაკადებთან ბრძოლის ღონისძიებების გამოყენებით.

ღვარცოფული პრობლემის შესწავლის სამეცნიერო-კვლევით სამუშაოებს კავკასიაში 120 წლიანი ისტორია გააჩნია და ყოფილ ამიერკავკასიის წყალთა მეურნეობის სამეცნიერო კვლევით ინსტიტუტში სარეგულაციო ღონისძიებებზე კვლევები 1930 წლიდან იწყება. მე-20 საუკუნის 50-ან წლებში ყალიბდება ღვარცოფთა კომისია გამოჩენილი ჰიდროლოგის

მ.ა. ველიკანოვის მიერ, რომლის მოღვაწეობასთან არის დაკავშირებული ღვარცოფთა ტერმინის დაზუსტება. ღვარცოფებად წოდებულ იქნა ისეთი ნაკადები, რომელთა ფორმირება მდინარეთა აუზებში თავსხმა წვიმების დროს ხდება. ასეთი სახის ნაკადები გაჯერებული მყარი ნატანით, ფლობს მნიშვნელოვან სიჩქარეს, დიდ დამანგრეველ ძალას და სატრანზიტო უბნებზე ქმნის მისთვის დამახასიათებელ დანალექს [1].

ბუნებაში ეს ანომალური სტიქია სპექტრის სახით არის წარმოდგენილი და პირობითად გაყოფილია ორ სახეობად:

1. ბმული ღვარცოფები – რომელთა დამანგრეველი ძალა და შექმნილი დაწნევა ძირითადად მოძრავი მასის სიგანეზე და მოცულობით წონაზე დამოკიდებული, გაჩერების შემთხვევაში არ ხდება მისი შემადგენელ კომპონენტებად დაშლა, ინარჩუნებს საწყის სტრუქტურას და გაჩერების შემთხვევაში ქმნის დამბისებურ შემადგენლებს;

2. ტურბულენტური ღვარცოფები – რომელთა მატრანსპორტირებელ გარემოს წყალი წარმოადგენს, დინების შემთხვევაში შემოსაზღვრულია სადინარის კალაპოტით, ფლობს მნიშვნელოვან დამანგრეველ ძალას. გამოტანის კონუსზე გამოაქვს მნიშვნელოვანი მოცულობის მყარი მასალა და ახდენს მყარი მასალის დახარისხებას.

ჩამოყალიბებული ღვარცოფული მასა კერებიდან უმნიშვნელო სიმძლავრით იწყებს მოძრაობას და იშვიათ შემთხვევაში ატმოსფერული ნალექების მოსვლის გარეშეც. ნაკადის თავის ნაწილის ენერგია ქანობის მიმართულებით გადაადგილების დროს იხარჯება სადინარის სიძქის გაგლუვებაზე როგორც განივად, ისე გრძივი მიმართულებით და მდგრადობის თვალსაზრისით წარმოდგენილია როგორც ერთგვაროვანი გარემო. მისი მოძრაობის მოდელი შვედოვ-ბინგამის სტრუქტურული სითხეების ანალოგიურია. ნატურული დაკვირვებებით დასტურდება, რომ სწორხაზოვან მონაკვეთებზე და გამოტანის კონუსებზე მის ტანში არ ხდება მასების გადაადგილება და შეშფოთებული ზონის წარმოქმნა, რასაც 1949 წელს მდ. დურუჯში ფორმირებული ღვარცოფით როილის ტრანსპორტირების შემთხვევა ადასტურებს [2, 3, 4, 5].

მოძრაობის დროს მის ტანში მთლიანად გამქრალია ტურბულენტური პულსაცია, როცა მყარი შემადგენლის მოცულობითი კონცენტრაცია 35%-იან ზღვარზე მაღალია.

ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე, მ.ა. ველიკანოვის კვლევებით, რომლებიც ზუსტად ემთხვევა ბენოლდის ცდის შედეგებს, მოცულობითი ზღვრული კონცენტრაცია მყარი შემადგენლის ღვარცოფის მასაში 38-40%-ს შეადგენს [6].

დაუმუშავებელ კალაპოტში ნაკადის გადაადგილების დროს ღვარცოფის თავის ნაწილი მოძრაობს, როგორც ტრაქტორის მუხლუხა სავალი ნაწილის ანალოგიურად და უწყვეტ ენერგიით განახლებას ნაკადი მოძრავი მასის ძირითადი ნაწილით ახორციელებს.

ნაკადის მოძრაობის მიმართ წინააღმდეგობა იკვეთება კალაპოტის პერიმეტრთან შეხების ადგილზე და დამოკიდებულია მის სიდიდეზე, უეცარ მოხვეულობებზე და ქანობზე. განსაკუთრებით აღსანიშნავია მოძრავი ნაკადის წინააღმდეგობებთან შეხების დროს როგორც სტრუქტურის ცვლილება, ისე მის ტანში მყარი შემადგენლის ერთმანეთის მიმართ გადაადგილება. როცა კალაპოტის კვეთი არასაკმარისია ბმული ღვარცოფის გატარებისთვის, ასეთ შემთხვევაში ნაკადი თვითონ იქმნის სადინარს საკმარისი გამტარუნარიანობით.

ღვარცოფები იმ შემთხვევაში იცვლის მოძრაობის მიმართულებას როცა შემხვედრი წინააღმდეგობის სიმაღლე $4\div 5$ -ჯერ აღემატება ღვარცოფის ზღურბლის სიღრმეს და გეგმაში შემხვედრი წინააღმდეგობა ნაკადთან ადგენს $15-20^{\circ}$ -ზე ნაკლებ კუთხეს.

ღვარცოფთა დამანგრეველი შესაძლებლობა არ შემოისაზღვრება მოძრავი მასის მხოლოდ შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედებით. ღვარცოფმა შეიძლება გამოიწვიოს დინების მიმართულებით სადინარის კალაპოტის გადაკეტვა რაც შემდგომში შეიძლება კატასტროფის მიზეზი გახდეს [7, 8, 9, 10].

ასეთი შემთხვევების დასტურად შეიძლება მოყვანილ იქნეს მდინარე თერგის კალაპოტის გადაკეტვა (1953 წ., 1967 წ.), რამაც გამოიწვია გაზის

მაგისტრალური მილსადენის რამდენიმე კილომეტრზე ფუნქციონირების შეწყვეტა.

ღვარცოფული მოვლენების შესწავლის ისტორიას ეტაპობრივი სახე გააჩნია და პირველი სამეცნიერო კვლევები მე-19 საუკუნის 20-იანი წლებიდან იწყება. მოვლენის გააქტიურების გამო კვლევის პროცესმა აქტიური სახე მიიღო.

დაგროვილი სამეცნიერო ინფორმაციის ანალიზის საფუძველზე მოვლენის შესწავლის სფეროში და საინჟინრო ამოცანების გადაწყვეტაში ყურადღებას იპყრობს ცნობილი მეცნიერების მ. გაგომოდის, ი. ვინოგრადოვის, გ. ბერუაშვილის, ც. მირცხულავას, თ. ვოინიჩ-სიანოჟენცკის, ნ. კერესელიძის, ო. ნათიშვილის, ზ. იორდანიშვილის, ვ. თევზაძის, გ. ხერხეულიძის, ი. ხერხეულიძის, მ. ხმალაძის, დ. ფრუიძის, ტაკაჰაშის, გ. გავარდაშვილის, ი. ყრუაშვილის, ე. კუხალაშვილის სამეცნიერო შრომები [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31].

სამუშაო აბსტრაქტში ღვარცოფები, რომელთა დინამიკა თანაბარი მოძრაობის მოდელებს ეყრდნობა, საჭიროებს თანმდევი პროცესების, კერძოდ მდგრადობის კარგვის შესაძლებლობის დადგენას, ნაკადების ლანდშაფტურ ინფრასტრუქტურაზე ზემოქმედების შესაძლებლობებს, მის მდგრადობასთან დაკავშირებული პროცესების შეფასებას და სხვ.

მოვლენის სირთულის გამო, ღვარცოფთა მდგრადობა კვლევის მასალების მიხედვით იმ ძირითად მოდელებზე და მიმართულებაზეა დაფუძნებული როგორცაა ნაკადის არათანაბარი ან ტალღური მოძრაობა [32, 33, 34, 35, 36]. ღვარცოფები განსაკუთრებით საშიშია დიდი დამანგრეველი ძალის, მოულოდნელობის და სწრაფად მზარდი ხარჯის გამო. საშიშროების რისკებს ისეთი მცირე ტერიტორიის მქონე ქვეყნისათვის, როგორც საქართველოა კიდევ უფრო აძლიერებს მათი წარმომქმნელი კერების დიდი რაოდენობით არსებობა.

ღვარცოფებისაგან დაცვის პრობლემის სიმწვავე არათუ იკლებს, არამედ კიდევ უფრო მწვავე ხასიათის იღებს. აღნიშნული იმითაა გამოწვეული, რომ მთისა და მთისწინა ზონების ათვისების მცდელობას და

პოტენციალის გამოყენების შესაძლებლობას აქტიური ხასიათი გააჩნია. აღნიშნულთან ერთად აღსანიშნავია ისიც, რომ ღვარცოფებით დაზიანებული ტერიტორიები მწყობრიდან გამოსვლის სპეციფიკურობიდან გამომდინარე, ძნელად ექვემდებარება აღდგენას და ხშირად შეუძლებელია.

მომრაობის შეფასების ყველაზე გავრცელებულ მოდელს დენადი ტანების ერთგანზომილებიანი დამყარებული მოძრაობის დიფერენციალური განტოლება წარმოადგენს. იგი მოვლენის ყველაზე უფრო გამარტივებული შემთხვევაა. მოძრაობის დროს ნაკადი მოძრაობს ცვალებადი მასის ფორმით. მდგრადობა სიგრძის მიხედვით იცვლება ნელცვლადი ან ნახტომისებური ფორმით არის წარმოდგენილი და გაანგარიშებებში ნაკადის პირველადი მახასიათებლები გასაშუალოებული სახით არის გამოყენებული [37, 38, 39, 40, 41, 42, 43].

რეალურად სითხის მოძრაობის ერთგანზომილებიანი მოძრაობის შემთხვევას ბუნებაში თითქმის იშვიათად ვხვდებით, მაგრამ წყლის ნაკადების ჰიდრაულიკაში მდგრადობის საკითხების განხილვის დროს ასეთი დაშვება ეფექტურია და ინჟინრულ ამოცანების გადაწყვეტისათვის პრაქტიკაში დამაკმაყოფილებელ შედეგს იძლევა.

ტექნიკურ ლიტერატურაში ვხვდებით ისეთ სამეცნიერო ნაშრომებს, რომლებშიც სადინარში ნაკადის მოძრაობის საკონტაქტო ზედაპირებზე მიწებების გარეშე სრიალით ხდება. რეალობაში საკონტაქტო ზედაპირზე ნაკადის მოძრაობის ასეთ შემთხვევას თითქმის არ ვხვდებით, მაგრამ სრიალით გადაადგილების მოდელი იმ შემთხვევაში შეიძლება იქნეს გამოყენებული, როცა მხები ძაბვის სიდიდე საკონტაქტო ზედაპირზე ნაკლებია ძვრის საწყის წინააღმდეგობაზე. წარმოდგენილი შემთხვევა შეიძლება ადაპტირებულ იქნეს მაღალი სიმკვრივის ღვარცოფებზე [44, 45, 46].

ნიუტონური და არანიუტონური სითხეების უდაწნეო მოძრაობის დროს ხარჯის განსაზღვრის და მასზე მხებ ძაბვის სიჩქარის გრუნტთან კავშირის მოდელი წარმოდგენილია სამეცნიერო შრომებში [47, 48, 49, 50, 51, 52, 53].

ღვარცოფსადინარის კალაპოტის განივი კვეთის ფორმა განსაკუთრებულად მოქმედებს ნაკადის, როგორც ჰიდრავლიკურ ელემენტებზე ისე მის მდგრადობაზე. მიღებული დამოკიდებულებების უმრავლესობა სწორკუთხა კვეთის მქონე კალაპოტებისათვის არის სამართლიანი. კალაპოტების ფორმის შემთხვევისათვის აუცილებელია წარმოდგენილი საანგარიშო დამოკიდებულებების კორექტირება. განივი კვეთის გავლენის გათვალისწინებით ჰიდრავლიკურ პარამეტრებზე აღნიშნული შემასწორებელი კოეფიციენტი გათვალისწინებულია სამეცნიერო შრომებში [54, 55, 56].

ღვარცოფების ფორმირებას ადგილი აქვს სხვადასხვა პირობებში და მის განმსაზღვრელ ფაქტორს ურთიერთდამოკიდებული პროცესების ერთობლიობის ურთიერთშერწყმის შედეგი წარმოადგენს, რომელიც წყალშემკრები აუზის რთულ ჰიდროგრაფიულ ქსელში მიმდინარეობს. აღნიშნულიდან გამომდინარე, ღვარცოფების პროგნოზირება ზოგჯერ შეუძლებელია და იგი მოვლენის მდგრადობის სირთულით არის განპირობებული. განსაკუთრებით ყურადღებას იპყრობს შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ღვარცოფთა ზემოქმედება. ასეთი ნაკადების მდგრადობის შეფასების მეთოდის დამუშავება დღესდღეობით განეკუთვნება ჰიდრავლიკის სრულიად დაუმუშავებელ ნაწილს.

ღვარცოფული მოვლენების განმსაზღვრელ ფაქტორებს წყალშემკრები აუზში ძირითადად მყარი მასალის არსებობის შესაძლებლობა წარმოადგენს. იგი გეოლოგიური პირობებით, ტერიტორიის ნიადაგური აგებულებით, აუზის გატენიანებით, გატყინებით და სადინარის კალაპოტის ქანობით არის განსაზღვრული [57, 58, 59, 60, 61].

ჩამოყალიბებული მთის ნაკადების მდგრადობის მეთოდის, კერძოდ ღვარცოფების მდგრადობის შეფასება სხვადასხვა კრიტერიული დაშვების აუცილებლობას საჭიროებს.

მიუხედავად უამრავი კვლევის მასალებისა, ღვარცოფთა მდგრადობის შესწავლის დონე სრულყოფას საჭიროებს. აქედან გამომდინარე, ღვარცოფის მდგრადობაზე მოქმედი ფაქტორების შესწავლას განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა, რადგან სხვადასხვა რეჟიმებით მოძრავი ნაკადების

შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების შესაძლებლობები განსხვავებულია ერთმანეთისაგან. აღნიშნულის დასტურად შეიძლება მოყვანილ იქნეს თანაბარი რეჟიმით მოძრავი ნაკადის ენერგეტიკული მახასიათებლების ერთმანეთისაგან გამოკვეთილად განსხვავებულობა. მახასიათებლების უფრო გამოკვეთილ ცვლილებას აქვს ადგილი ღვარცოფის ტალღურად მოძრაობის დროს.

მდგრადობაზე და ნაკადის ერთი სტაციონარული მდგომარეობის მეორეში გადასვლის შესაძლებლობებზე მონაწილეობას ლებულობს მრავალი ერთმანეთთან ურთიერთდამოუკიდებელი ფაქტორი, რომელიც განსაზღვრავს ღვარცოფთა შემხვედრი წინააღმდეგობების ზემოქმედების თავისებურებებს და სიხშირეს [62, 63, 64].

ჰიდროლოგიურ-მორფომეტრიული თეორიიდან გამომდინარე, კალაპოტური პროცესების შეფასების დროს, სადინარის ფორმირება ხორციელდება ისეთ პირობებში, როცა შექმნილი ჰიდრავლიკური პირობები არაერთგვაროვანი ნაკადის მთელ სიგანეზე, ვერ ხერხდება სიჩქარის ეპიურის გათანაბრება კალაპოტის მთელ სიგრძეზე და კალაპოტის რელიეფი არაა გამოკვეთილი.

შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ღვარცოფების ზემოქმედებას გააჩნია განსაკუთრებულობები, მდგრად ალუვიალურ მონაკვეთზე დეფორმაციის ხარისხის მიხედვით კალაპოტის წარმოქმნაში შესწავლილ იქნა სიმქისის გამონაშვერები კავშირი ხარჯის უზრუნველყოფასთან. დადგენილ იქნა, რომ გამონაშვერების სიდიდის კავშირს ქვის დიამეტრთან შემდეგი სახე აქვს: $\Delta \leq (1 \div 1,5)d_{\text{ს.შ.}}$ ლოკალური, გარდამავალი – $\Delta = (1,5 \div 2)d$ და საერთო – $\Delta > d_{\text{ს.შ.}}$

სადინარის კალაპოტის ჩამოყალიბება ნაკადის მდგრადობასთან არის დაკავშირებული. მიუხედავად იმისა, რომ კალაპოტის ფორმირების საკითხები ხარჯებთანაა კავშირში, დასაბუთებული და ჩამოყალიბებული ყველაზე დიდი ზომის კალაპოტური წარმონაქმნები იმ შემთხვევაშია ფიქსირებული როცა მორფომეტრია მაფორმირებელი ხარჯის ტოლია.

დაკვირვების მასალებით გამოიკვეთა რომ კალაპოტის სიმქისე როცა ქვის ლოდებით არის წარმოდგენილი, მაშინ მდგრადობა სანაპირო ზოლში დიაგონალურ გრძივი ღერძების მიმართულებებზე დამოკიდებულია განლაგებაზე. გარდა ზემოაღნიშნულისა, აღსანიშნავია კალაპოტში განლაგებული ქვების სხვადასხვა ფორმა.

მოვლენის სირთულისა და ღვარცოფის მდგრადობიდან გამომდინარე, ნაკადის უსაფრთხო რეგულირების მიზნით სარეგულაციო ნაგებობები სხვადასხვა სახისაა. საქართველოს პირობებში მათ უმრავლესობას ძირითადად ვხვდებით ღვარცოფსადინართა კალაპოტებში, რომელთა შორის აღსანიშნავია მდ. თერგის აუზი, საქართველოს სამხედრო გზა, მდ. რიონის, ყვირილას შენაკადები, ენგურის და კოდორის ხეობები, მთიანი აჭარის წყალსადინარები [65, 66, 67] და სხვ.

როცა ღვარცოფები თავისუფლდება სადინარის გვერდითი კედლების გავლენისაგან, გარდამავალ უბანზე დამატებითი წინააღმდეგობების მოხსნის გამო, ადგილი აქვს სიჩქარის ინტენსიურ გადანაწილებას და კალაპოტის გაგლუვებაზე ხორკლიანობის გავლენით ხარჯის ნაწილის დანაკარგს.

ნაკადის კალაპოტის საკონტაქტო ზედაპირზე მოქმედი წინააღმდეგობის გამო ხარჯის დანაკარგი ამ შემთხვევაში ზედაპირის ფართობის, საშუალო სიჩქარის კვადრატის და დროის მონაკვეთში გამოყოფილი მასის რაოდენობის პროპორციულია.

მოვლენის სირთულის გამო გამოტანის კონუსზე კვეთში ნაკადის საშუალო სიჩქარე, რომელიც ნარიყის კონუსის საწყისი კვეთიდან განსაზღვრული მანძილითაა დაშორებული, ნატურული მონაცემების საფუძველზე ხდება.

როდესაც ნარიყის კონუსი წარმოდგენილია ადვილად დეფორმირებადი მასალისაგან, ნაკადი ადვილად ანგრევს მას და გადაადგილდება ცვალებადი მასით. ასეთი შემთხვევის დროს იზრდება ნაკადის ხარჯი, ხდება თანაბრად მოძრავი ნაკადის რეჟიმის შეცვლა და მდგრადობის კარგვა. მდგრადობის დასახასიათებლად ასეთ შემთხვევაში ცოცხალი კვეთის ნაკადის სიჩქარეებთან ფარდობითი კავშირია გამოყენებული. ე.ი.

როცა საწყის კვეთში ნაკადის ცოცხალი კვეთის და სიჩქარის მახასიათებლები ω_0, V -ის ტოლია, ხოლო განსხვავებულ კვეთში ω, V -სი. მდგრადობის კოეფიციენტი ამ მახასიათებლების კომბინაციაში წარმოდგენილია შრომაში [68].

როცა ნაკადის მდგრადობის კოეფიციენტი, $K < 1$ ხდება ნარიის კონუსის მოპირკეთება, იგი წარმოდგენილია ძნელად დეფორმირებადი მასალისაგან, როცა ადგილი აქვს ნაკადის წინსვლითი წამობრივი მასის შემცირებას, ე.ი. $K > 1$. კალაპოტის ზედაპირი გლუვდება იმ შემთხვევაში როცა $K = 1$ როცა ნაკადი მოძრაობს მუდმივი ხარჯით, ასეთ შემთხვევაში მდგრადობის შესაფასებელი საანგარიშო დამოკიდებულებები მარტივდება და იზრდება გაანგარიშების სიზუსტე. ასეთ შემთხვევაში მდგრადობის კოეფიციენტის შეფასების მიზნით გამოიყენება მოძრაობის რაოდენობის კანონი.

როცა სადინარის სატრანზიტო ზონის ფსკერის ქანობი ნარიის კონუსის საშუალო ქანობის ტოლია რეჟიმი მდგრადობის თვალსაზრისით ზღვრულ წონასწორულ მდგომარეობაშია. როცა $i_{\text{ნ.წ.}} < i_{\text{ს.ზ.}}$ ადგილი აქვს კალაპოტის ზედა ზონის ზედაპირის წატაცების შემთხვევას, ხოლო როცა $i_{\text{ნ.წ.}} > i_{\text{ს.ზ.}}$ - ხდება ნატანის დაღეჟვა.

ხშირია შემთხვევები, როცა ღვარცოფში წყლის ფაქტორის ზემოქმედებით ადგილი აქვს მისი ტანის შინაგანი სტრუქტურის, ერთგვაროვანი მასის, რღვევას და მისი ძირითადი თვისებების შეცვლას. ასეთ შემთხვევებს ადგილი აქვს იმ შემთხვევაში, როცა ბმული ღვარცოფის შეერთება წყლის ნაკადთან ხდება. ხვდება რა ბმული ღვარცოფი წყლის ნაკადში, შინაგანი სტრუქტურის რღვევის გამო გარდაიქმნება ჩვეულებრივ წყალნარევიან ნაკადად. წარმოქმნილი ნარევი შესაძლებელია არაბმულ ღვარცოფად ჩამოყალიბდეს. ღვარცოფული ნაკადის არაბმულ ღვარცოფად ტრანსფორმაციის შესაძლებლობა მოცემულია პროფ. მ. გაგოშიძის მიერ [11].

აღნიშნული მეთოდით ტურბულენტური ნატანდატვირთული ნაკადის მიღება ითვალისწინებს წნევის ქვეშე მყოფი წყლის ნაკადის მოძრაობის

ღვარცოფის ტანში უმნიშვნელო რაოდენობით შეყვანას, აღნიშნულის შედეგად ადგილი აქვს ბმული ღვარცოფის სტრუქტურის რღვევას და ნაკადის მასის ცალკეულ ნაწილებად დაშლას [11, 18, 19, 23].

ღვარცოფის ტანის შემადგენელი კომპონენტები განსაზღვრავს მისი ტანის სტრუქტურის მდგრადობას წონასწორულ მდგომარეობაში, წყლის ზემოქმედებით სტაბილურობის და მოძრაობის დაწყების შესაძლებლობას.

ბმულ ღვარცოფთა კრიტერიუმების საზღვრების დადგენა და შეფასება მოქმედ ფაქტორთა გათვალისწინებით შესაძლებლობას იძლევა სწორად განხორციელდეს მოვლენაზე საანგარიშო მოდელის ადაპტირება და ღვარცოფებთან ბრძოლის ღონისძიებების შერჩევა.

შემადგენელ კომპონენტთა თანაფარდობაზეა დამოკიდებული ღვარცოფთა დინამიკის დამახული მდგომარეობის, აქტიური და პასიური წნევების, ჰიდროტექნიკურ ნაგებობაზე მოძრაობის რეჟიმების ცვლილების და მდგრადობის დაკარგვის შესაძლებლობები, კერებიდან მოძრაობის დაწყება და გამოტანის კონუსებზე გაჩერების შესაძლებლობა. მასის მდგრადობის განმსაზღვრელი კრიტიკული ზღვრების უმნიშვნელო ცვლილების შემთხვევაშიც კი მოსალოდნელია ერთი სახიდან მეორეში გადასვლის შესაძლებლობა. მდგრადობის პირობიდან გამომდინარე შემადგენელ კომპონენტთა ცვლილება უნდა აკმაყოფილებდეს პირობას. წყლისა და მილიმეტრიან ნაწილაკებს შორის წონითი თანაფარდობის ზღვრები $0,49 > P_{\text{წყ}} / P_{\text{მ}} > 0$, წყლის წონის ფარდობა მთლიან მასასთან $0,112 \leq P_{\text{წყ}} / P_{\text{მთ}} < 0,20$ და მილიმეტრიანი და მასზე ნაკლები ზომის ნაწილაკების წონის ფარდობა მყარ მასასთან $0,45 > P_{\text{მ}} / P_{\text{მყ}} > 0,23$.

ღვარცოფთა მდგრადობის შეფასება მაშინ არის შესაძლებელი, როცა ცნობილია დინებათა კანონზომიერებების ფიზიკური არსი. რეალობაში სადინარების ფორმის მრავალფეროვნებისა და მასში მოძრავი ნაკადის მრავალი სახეობის არსებობის გამო ადგილი აქვს განსხვავებული რეჟიმებით მოძრაობას. ხდება ერთი სახიდან მეორეში გადასვლა და ნაკადის მოძრაობის თავისუფალი ზედაპირის სხვადასხვა ფორმით მოძრაობის

შემთხვევა. მოძრაობის აღწერის მიზნით ასეთ შემთხვევაში გამოყენებულია მოძრაობის განტოლებები [7, 12, 35, 36, 37].

ღვარცოფთა შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების დროს ნაკადის მდგრადობის საკითხებს განსაკუთრებული ადგილი უკავია. რადგან მოსალოდნელია როგორც ნაკადის სტრუქტურის რღვევა, ასევე მოძრაობის რეჟიმის ცვლილება და თავისუფალი ზედაპირის სხვადასხვა ფორმით ჩამოყალიბება. როცა შემხვედრი წინააღმდეგობების ზემოქმედება ნაკადზე უმნიშვნელოა ასეთ შემთხვევაში იგი გრძივი ტალღის ფორმით მოძრაობს, ხოლო როცა შემხვედრი წინააღმდეგობის გავლენა იწვევს ნაკადის შეშფოთებას, მაშინ თავისუფალი ზედაპირები დინამიკური ტალღის ფორმით ყალიბდება.

ნაკადის მდგრადობის რღვევა განსაკუთრებულად მაშინ იქცევს ყურადღებას, როცა მისი ტრანზიტი ღვარცოფსადინარებით ხდება. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მაშინ, როცა სადინრები ხასიათდება მორფომეტრიული მახასიათებლების მკვეთრი ცვლილებით და იწვევს ნაკადის ტანის კუმშვას და გაფართოვებას. წყალთან შედარებით კუმშვის ან გაფართოების ეს მაჩვენებელი განსაკუთრებული სიდიდით ხასიათდება და გარკვეულ გავლენას ახდენს ნაგებობათა დაპროექტების დროს [1, 69, 70, 71].

სამეცნიერო შრომებში გამოვლენილია ღვარცოფში ტალღის გავრცელების სიჩქარის განსხვავებულობა ნიუტონის სითხესთან შედარებით. მისი მნიშვნელობა 7-ჯერ ნაკლებია წყალთან შედარებით.

ღვარცოფთა ანომალურობის გამო სადინარებში სარეგულაციო ნაგებობების მოწყობა ნაკადის ისეთი კრიტერიუმების გათვალისწინებას საჭიროებს, როცა ადგილი არ აქვს ნაკადის მოძრაობის რეჟიმების შეცვლას და მდგრადობის რღვევას და მდგრადობის ნორმატივებიდან გამოსვლას. ზემოთ განხილული პირობების დაუკმაყოფილებლობის შემთხვევაში შესაძლებელია სადინარში ხერგილების წარმოქმნა ან სადინარის კალაპოტის დეფორმირება [72].

ღვარცოფთა რეგულირების სირთულეები და მდგრადობის შენარჩუნება მოძრაობის დროს, უშუალო კავშირშია კალაპოტურ პროცესებთან.

აქედან გამომდინარე, ნაკადი სადინარში ისეთი მაჩვენებლებით უნდა მოძრაობდეს, რომ ეს მაჩვენებლები შერწყმული იყოს კალაპოტის მორფომეტრიასთან. ერთი ან მეორე პირობის დაძლევის შემთხვევაში მოსალოდნელია ნაკადის მდგრადობიდან გამოსვლა.

ღვარცოფთა მრავალფეროვნების შესწავლის ისტორია საშუალებას იძლევა დასაშვები სიზუსტით იქნეს გამოყვანილი ისეთი სახის საანგარიშო დამოკიდებულებები, რომელთა გამოყენებით შესაძლებელი გახდება როგორც ენერგეტიკული მახასიათებლების პროგნოზი, ასევე ნაკადის მოძრაობის რეჟიმის ცვალებადობის შესაძლებლობა. რაც შეეხება საინჟინრო გადაწყვეტებს, სასურველია მათი შერჩევა განხორციელდეს ზემოთ მოყვანილი ცალკეული შემთხვევების მხედველობაში მიღებით.

სატრანზიტო მონაკვეთში ნებისმიერ ნაკადზე ყოველგვარი შემხვედრი წინააღმდეგობის ზემოქმედების შედეგად ხდება მოძრაობის პირობების შეცვლა და ამავე დროს ადგილი აქვს მისი კრიტიკული მახასიათებლების შეცვლის შემთხვევებს. ეს მაშინ არის მოსალოდნელი როცა ტალღის სიჩქარე გადააჭარბებს ნაკადის საშუალო სიჩქარეს. ასეთ შემთხვევაში რეჟიმების ცვლილების განმსაზღვრელ კრიტერიუმად გამოყენებულია საშუალო კინეტიკური ენერგიის პოტენციურთან ფარდობითი სიდიდე. კრიტიკული მდგომარეობის განმსაზღვრელ კრიტერიუმად, როცა ნაკადის ხარჯი Q -ს, სიჩქარის შემასწორებელი კოეფიციენტი α -ს, ცოცხალი კვეთის ფართობი ω -ს და რეოლოგიის მაჩვენებელი K -ს ტოლია მიღებულია ფორმულა

$$\frac{\alpha Q^2}{g} \frac{\omega^3}{3} K = 1.$$

ღვარცოფებში ტალღის წარმოქმნის შემთხვევაში მისი სიღრმის შესაძლო ცვლილება მდგრადობის განმსაზღვრელი მაჩვენებელია. ცვლილების შესაძლებლობის შემთხვევა მასის სტრუქტურის გარღვევამდე სხვადასხვა სიდიდის კრიტერიუმებით ხასიათდება და რეოლოგიურ მახასიათებლებთან არის დაკავშირებული.

1.2. ღვარცოფების მდგრადობა და შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედება

სტაბილური დინების სიჩქარის განაწილება თუ $V_0(x)$ -ით არის წარმოდგენილი, ხოლო შემფოთებას $V'(x,t)$. სახე აქვს, ასეთ შემთხვევაში ღვარცოფის მდგრადობა $V(x,t)$ ამ ორი კომპონენტის ჯამის სახით შეიძლება იქნეს წარმოდგენილი.

ღვარცოფის წარმოდგენილი მეთოდიკით შემფოთების უმნიშვნელო სიდიდის შეფასება მოძრაობის და უწყვეტობის განტოლების გამოყენებით და გასწორხაზებით არის შესაძლებელი. როცა ცნობილია ნაკადის შემფოთების შესაძლებლობა, შემდეგ მისი განსაზღვრელი პარამეტრების სიდიდის დროსთან დამოკიდებულება შეიძლება შეფასდეს ექსპოტენციური დამოკიდებულებებით, როცა წარმოსახვითი ნაწილის ე.ი. კომპონენტის ჯამის სიდიდე 0-ის ტოლია. შემფოთების ამპლიტუდის დროში ცვალებადობა განსაზღვრავს ნაკადის მდგრადობას, მოძრაობა მდგრადია როცა ამპლიტუდა არ იწვევს თავისუფალი ზედაპირის დროში ცვლილებას, თუ შემფოთება დროსთან ერთად იზრდება, მაშინ მოძრაობა არამდგრადია.

წარმოდგენილი მეთოდიკის ღვარცოფებზე გავრცელება გარკვეულ სირთულეებთან არის დაკავშირებული და საჭიროებს კრიტერიუმების დამატებითი პროპორციების შემოტანას.

მოძრაობის რეჟიმის მდგრადობა მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული შემფოთების გეომეტრიაზე, რაც გათვალისწინებული უნდა იყოს ღვარცოფების მდგრადობის ამოცანების განხილვის დროს. შემფოთების ჩასაქრობად და უტალღო პროფილით მოძრაობის მიზნით შემოთავაზებულია ნაკადის სიღრმის გაზრდის აუცილებლობა განივი კვეთის შევიწროებით. დასახული მიზნის მიხედვით განისაზღვრება, თუ როგორია შემფოთებული მოძრაობის შესუსტება ან გაძლიერება გარემო ფაქტორებთან კავშირში. ხშირად იყენებენ თანაბრად მოძრავი ნატანდატვირთული ნაკადის კრიტერიუმებს. მოვლენის ასეთი განვითარების შემთხვევაში მიღებულია, რომ

წინსვლითი მძაფრი ნაკადი გადაყვანილ იქნეს ზემოაღრე ტალღურ რეჟიმში.

დიდი ქანობის მქონე სადინარებში ნატანდატვირთული ნაკადის თანაბარი მოძრაობის მდგრადობას ეძღვნება ექსპერიმენტული და თეორიული ხასიათის კვლევები. რომელთა გამოყენებითი ღირებულება ჰიდროენერგეტიკული და ირიგაციული დანიშნულების დიდი ქანობის მქონე სწრაფსადენების სახით წარმოდგენილ წყალსაგდებ ნაგებობებზეა აპრობირებული.

ისეთი სახის ნაკადისას, როგორცაა ღვარცოფები, რომელთაც გადააქვთ წყალზე მეტი მყარი ნაწილაკები, მდგრადობის შეფასებას უფრო დიდი გამოყენებითი ფუნქცია აქვს. აღნიშნულის ნიმუშად შეიძლება მოყვანილ იქნეს სწრაფმდენები, რომლებიც წვიმისმიერ ჩამონადენის ან ღვარცოფული ნაკადების ტრანზიტის თვალსაზრისით არის გამოყენებული.

ნაკადის მდგრადობას განსაკუთრებული ადგილი უკავია სადინარებში უსაფრთხო მოძრაობის დროს. მისი შედარებისას წყლის ნაკადებთან მდგრადობის მსგავსებასთან ერთად გააჩნია განსხვავებული თავისებურებები, რომლებიც მათი სპეციფიკურ თავისებურებებით არის გამოწვეული. წყალში ნაწილაკების არსებობა მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს მათ მდგრადობაზე. ამასთან ერთად, მდგრადობა ნაკადისა, რომელსაც გადააქვს ათეულობით ტონა ნატანები, უფრო მეტი გამოყენებითი მნიშვნელობა აქვს ვიდრე სუფთა წყლის შემთხვევაში. ნიმუშად შეიძლება მოყვანილ იქნეს სწრაფმდენები რომლებიც წვიმისმიერი წყლის გასატარებლად არის განკუთვნილი. ასეთ სწრაფმდენებზე ნატანით დატვირთული ნაკადის მოძრაობის დროს ვხვდებით ისეთ შემთხვევას როცა ნატანი მასში შეტივნარებული სახით არის წარმოდგენილი და ხშირად მნიშვნელოვან სიდიდეს აღწევს.

სწრაფმდენებზე ნატანით დატვირთული ნაკადების მოძრაობის ისეთ შემთხვევებსაც შეიძლება ჰქონდეს ადგილი, როცა ტალღის ფორმის გრძივი ნაკადი ხასიათდება ისეთი ამპლიტუდით, რომ მოსალოდნელია კალაპოტის განივიდან მისი გადაღვრა.

ჰიპერკონცენტრირებული ნაკადების უსაფრთხო ტრანზიტისა და

რეგულირებისათვის განკუთვნილ ნაგებობებში მოძრავი ნაკადის მდგრადობას და ტალღის წარმოქმნის შესაძლებლობას განსაკუთრებული პრაქტიკული ღირებულება გააჩნია. მოძრავი ნაკადის პირველადი თანაბარი მოძრაობა როცა არამდგრადია, მისი გადაყვანა სხვა რეჟიმში შესაძლებელია ტალღის მნიშვნელოვანი ამპლიტუდით.

მდგრადობის დაკარგვა და ახალი სტრუქტურით ნაკადის ჩამოყალიბება შეუქცევადი პროცესების დროს განსაზღვრულ პირობებში ხდება. ახალი სტრუქტურის ჩამოყალიბების შედეგად ადგილი აქვს ნაკადის მდგრადობის განმსაზღვრელი პარამეტრების ზღვრული მნიშვნელობის მიღწევას და ადგილი აქვს თვისობრივი ხასიათის ნახტომს. ჰიდრაულიკაში ეს პროცესი კარგად არის ცნობილი და სტრუქტურული ცვლილების პროცესი შეიძლება შემდეგნაირად იქნეს წარმოდგენილი: სიჩქარის რაღაც კრიტიკულ მნიშვნელობამდე ნაკადის მოძრაობა ლამინარულია, როცა ხდება მისი სიჩქარის კრიტიკულზე გადაჭარბება, ტურბულენტური რეჟიმით სიჩქარის სიდიდის გაზრდის გამო იცვლება ნაკადის სტრუქტურა, რეჟიმი ხდება ზეკრიტიკული და მოძრაობა ყალიბდება ტალღის ფორმით.

პრაქტიკაში ვხვდებით ისეთ შემთხვევასაც, როცა ვიწრო კალაპოტში მოძრავი ბმული ღვარცოფის ზედაპირზე ადგილი აქვს წყლის ნაკადის პარალელურად მოძრაობას. ასეთი სახის მოძრავ მასაში ადგილი აქვს გამყოფი ზედაპირის წარმოქმნას და შემადგენელი კომპონენტების მოძრაობის ტრაექტორიების ნახტომისებურად შეცვლას. როცა წყლის წნევა ვერ იძლევა ღვარცოფის გათხიერების შესაძლებლობას, ასეთ შემთხვევაში წარმოქმნილ ტალღებს შეუძლია წყვეტის გარეშე გადაიტანოს დინამიკური პარამეტრების ცვლილებები ან შეიძლება განხორციელდეს ენერგეტიკული მახასიათებლების ცვლილება საფეხურისებრი ცვლილებით. გრძივი ტალღების შემთხვევაში, როცა ნაკადის სიღრმე და ხარჯი ნელცვლადი ფორმით არის დაკავშირებული, მოძრაობას გრძივი ტალღის სახე აქვს. ადგილი აქვს მის გლუვად გადაბმას ძირითად ნაკადთან ყოველგვარი დინამიკური ეფექტების გარეშე.

ნაკადის ნაგებობებზე მოძრაობის ისეთ შემთხვევისათვის, როცა საკონტაქტო ზედაპირთან შეშფოთებები ისეთი რიგისაა, რომ წინსვლითი ნაკადის სიღრმის ზეგავლენის შეშფოთებები ითრგუნება, იგი პირველადი თანაბარი მოძრაობის რეჟიმით მოძრაობს და მის ზედაპირზე ტალღების წარმოქმნა არ შეიძლება. როცა ირღვევა პირობა, ადგილი აქვს მდგრადობის კარგვას და ნაკადის ზედაპირზე ტალღის წარმოქმნას.

ღვარცოფის ტრანზიტის დროს, როცა ნაკადი გრძელი ტალღის ფორმით მოძრაობს, ტალღის პროფილის წამური სიმრუდე ძალიან მცირეა და მოძრაობს ნელცვლად დროში. მის დასახასიათებლად შეიძლება გამოყენებულ იქნეს მცირე ამპლიტუდის მქონე გრძელი ტალღების განტოლებები.

ნაგებობებში, რომელიც ჰიდროელექტროსადგურების დღე-ღამური რეგულირებისათვის არის განკუთვნილი, ტალღის წარმოქმნის შესაძლებლობა პირველად შეფასებულ იქნა, ხოლო ღია კალაპოტები – ზოგადი შემთხვევისათვის.

გრძელი ტალღების შეფასების ოპერატიულ საშუალებად აგრეთვე ცნობილია განტოლებები რომელიც სენ-ვენანის სახელწოდებით არის ცნობილი.

აკადემიკოს ო. ნათიშვილის მიერ სასრულო ამპლიტუდის მქონე გრძელი ტალღის თეორიული ზოგადი განტოლებების ამოხსნის საფუძველზე დადგენილ იქნა ნაკადის შეშფოთებით მის ზედაპირზე ტალღის წარმოქმნის კრიტერიალური მაჩვენებლები.

თანამედროვე წარმოდგენით, ღვარცოფის მოძრაობა განიხილება, როგორც კვაზი-ერთგვაროვანი გარემოს მქონე სხეულის გადაადგილება. აღნიშნულიდან გამომდინარე, არსებითია, თუ რომელიმე მათემატიკური მოდელი იქნება ადაპტირებული ასეთი ნაკადების მოძრაობით. მოძრაობის აღწერის სირთულე კიდევ უფრო განსაკუთრებული ხდება მრავალკომპონენტური ნაკადების შემთხვევაში და თითოეული ფაზისათვის ადაპტირებულად მიიჩნევა უწყვეტობის დინამიკის ენერჯის მუდმივობის განტოლებები, ხოლო შეკვრის თვალსაზრისით მიმართავენ დამატებითი კორელაციური ხასიათის თანაფარდობების გამოყენებას.

ორფაზიანი ნაკადების მოძრაობის უმარტივეს მოდელად არის მიჩნეული ნაკადის ჰორიზონტალურად მოძრაობის შემთხვევა, როცა მყარი ნატანის ფსკერზე კონცენტრირებას აქვს ადგილი. ასეთ შემთხვევაში განცალკევების ხარისხის განმსაზღვრელ კრიტერიუმებად მიღებულია ნაწილაკის დალექვის სიჩქარე. ხარჯის ცვალებადობა სადინარში გამოწვეულია მყარი კომპონენტის რაოდენობის ცვლილებით, რომლის პროგნოზირების მიზნით ხშირად მიმართავენ ერთგანზომილებიანი დიფერენციალური განტოლებების ინტეგრირებას. ამოცანათა ასეთ კატეგორიათა რიგში მოიაზრება სალექრების დალექვა, მდინარის კალაპოტის საერთო და ადგილობრივი დეფორმაციები, მთის წყალსაცავებში ნატანის დალექვა, ნატანდატვირთული ნაკადის მოძრაობა წყალსატევებში და ა.შ.

განცალკევებული დინების უმარტივეს შემთხვევას შეიძლება მივაკუთვნოთ ღვარცოფთა ფაზების პარალელური მოძრაობა. აქ არ შეიძლება არ იქნეს აღნიშნული ის ორიგინალური ექსპერიმენტი, რომელიც დიდი ზომის ქვების განცალკევებულ მოძრაობასთან არის დაკავშირებული. მოძრაობის რეჟიმის და სტრუქტურის გავლენის შეფასების მეთოდიკა შესაძლებელს ხდის განხორციელდეს პროგნოზირება ნაკადის სტრუქტურის ცვლილებაზე და ნაწილაკის რხევასა და დაძვრაზე. რაც შეეხება ორკომპონენტიანი ნაკადების განცალკევებული მოძრაობის საკითხს, ამ ამოცანის გადაწყვეტის მეთოდიკა მოცემულია ნაშრომში [34].

ღვარცოფთა მდგრადობა რთული საკითხის კატეგორიას განეკუთვნება, რადგან კერებიდან მათი დაძვრა წონასწორულ მდგომარეობის გარკვეულ ფაზასთან არის დაკავშირებული, ხოლო მოძრაობის რეგულირება – რეოლოგიის ელემენტებთან.

საერთოდ ღვარცოფთა ნაგებობებზე ზემოქმედების შესაძლებლობა ნებისმიერი შემთხვევის დროს კერძოდ კერაში ღვარცოფწარმოქმნელი მასის წონასწორული მდგომარეობის რღვევასთან, სატრანზიტო ზონაში შემხვედრი წინააღმდეგობებით რეჟიმების ცვლილებასთან და ენერგეტიკასთან ან სხვა გარეგანი ძალების ზემოქმედებით გამოწვეული იმპულსებთან არის დაკავშირებული.

პერიდან ღვარცოფის ტალღის ფორმით მოძრაობის ჩამოყალიბების შემთხვევისათვის რეოლოგიური მახასიათებლების მხედველობაში მიღებით და მრავალკომპონენტურობის გათვალისწინებით მათემატიკური მოდელის მოძრაობის დაწყებასთან ადაპტირებით შრომაში მიღებულია ღვარცოფის ხარჯისა და თავისუფალი ზედაპირის განტოლებები [37, 39, 43, 59].

უკანასკნელ პერიოდში ღვარცოფსარეგულაციო ღონისძიებების კონსტრუქციული გაანგარიშების ოპერატიული საშუალებების შერჩევის მიზნით უპირატესი ადგილი ისეთ მოდელს დაეთმო, რომელიც კავშირს ძალასა და სიჩქარეს შორის ამყარებს.

გრადიენტს შორის რეოლოგიის სხვადასხვა კომბინაციასთან კავშირში სხვადასხვა ფორმით განიხილება. ღვარცოფთა ენერგეტიკული მახასიათებლების მოდელი, რომელიც ხარჯის სიდიდის საანგარიშოდ არის მიღებული ეკუთვნის აკადემიკოს ო. ნათიშვილს [57].

სატრანზიტო მონაკვეთზე, როცა ენერგეტიკული მახასიათებლების ცვლილების შესაძლებლობა ნაკადის გაჭიმვა-კუმშვით გამოწვეული დეფორმაციებით არის გამოწვეული სტრუქტურის, ფორმის, ცვლილებასა და მისი განმსაზღვრელი პარამეტრების განსაზღვრის მიზნით წარმოდგენილია სამეცნიერო შრომებში [64, 68, 70, 71].

შემხვედრ წინააღმდეგობებზე, ნაკადის შესწავლის თეორიული კვლევები პირველად ჟუკოვსკის მიერ იქნა მოცემული.

ზემოთ წარმოდგენილი საკითხის განსაზღვრას მიემდგნა უამრავი სამეცნიერო ნაშრომი და რეოლოგიიდან გამომდინარე ნაკადის დროს წნევის ცვლილების სურათი. როცა ღვარცოფი ხასიათდება დრეკადობით და ნაგებობაზე ასეთი ნაკადების ზემოქმედების შედეგად ხდება მისი ტანის გაფართოება და სიმკვრივის შეცვლა, შემფოთებული ნაწილით მისი ტანის მდგრადობის შეცვლა და ორ ზონად გაყოფა. ზონა სადაც უცვლელია ნაკადის სიჩქარე და ზონა სადაც წნევის ცვლილების გამო დამყარებულია ახალი სიჩქარე, შეფასებულია შემფოთებული ნაკადის მასა და სიმკვრივე, გამოყვანილია ღვარცოფის საშუალო სიჩქარის ტალღის სიჩქარესთან

ფარდობის სიდიდის საანგარიშო დამოკიდებულება, დაზუსტებულია ღვარცოფის მასის, მოცულობის ნაზრდის, ფარდობითი დეფორმაციის, სიმკვრივის ცვლილების შესაძლებლობა არაპრიზმატულ კალაპოტში მოძრავი ღვარცოფისათვის, აღწერილია დამოკიდებულებათა კავშირით სადინარის გეომეტრია ნაკადის სიჩქარესთან კავშირში [73, 74, 75].

მრავალფაქტორიანობის გამო ღვარცოფთა ზემოქმედების ზონებში სარეგულაციო ღონისძიებების შერჩევა სირთულეებთან არის დაკავშირებული. მიუხედავად მათი მრავალფეროვნებისა, მაინც დაბალია გარემოს დაცვითი ღონისძიებების შერჩევის შესაძლებლობები. როცა ზემოქმედება შემხვედრ წინააღმდეგობებზე მნიშვნელოვანია, ადგილი აქვს ნაკადის მდგრადობის რღვევას და მისი ერთი სტაციონარული მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლას, ხდება ენერგეტიკული მახასიათებლების როგორც ნახტომისებური, ისე მდორედ შეცვლა. გამომდინარე აქედან ადგილი აქვს მოძრავი ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის სხვადასხვა ფორმით ჩამოყალიბებას, რომელთა წონასწორული ძვრული პროფილი ცნობილია.

ნაკადის მარეგულირებლებად ხშირად მოიაზრება ნაგებობათა კომპლექსი, რომელთა გამოყენების მიზანს მდგრადობის ცვლილების მოწესრიგება წარმოადგენს.

სანაპირო ზოლის დაცვასა და ღვარცოფთა რეგულირებაში მნიშვნელოვანია მივიღოთ სარეგულაციო ღონისძიებათა სახეები, რომელიც დეზების სახელწოდებითაა ცნობილი. არც თუ ისე დიდი ზომის ნაკადების რეგულირების მიზნით მთის ზონებში ვხვდებით დეზებს, რომელთა სიგრძე (6 ÷ 10) მ-ის ფარგლებში მერყეობს.

წყლის ნაკადების რეგულირების დროს ასეთი ნაგებობის გამოყენების შემთხვევაში შეჭრის სიდიდის ფარდობა მის სიგანესთან, როცა ადგილი არ აქვს შემფოთებას, ნაკლები ან ტოლი უნდა იყოს 0,33-ის.

უფრო დაზუსტებული სახე აქვს ნაკადის გვერდითი შევიწროების შეფასებას ხარჯებით გამოხატვის დროს. ანალოგიურად ზემოთ აღნიშნულისა, შევიწროებული კვეთის Q_1 ხარჯის შევიწროებამდე Q ხარჯის სიდიდესთან შეფარდება $\leq 0,33$.

ღვარცოფისათვის მოძრავი ტანის Δh სიდიდის გაზრდის შესაძლებლობის შეფასება გამოთვლა თეორიულ მოდელებზე, დაზუსტებას და კორექტირებას საჭიროებს.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, ღვაცოფსადინარების სატრანზიტო უბნებზე და გამოტანის კონუსებზე მოძრაობის დროს მდგრადობის ცვლილების პროგნოზირება და შეფასების მეთოდების სრულყოფა-დაზუსტება, ინოვაციურ მათემატიკური მოდელების პროცესთან ადაპტირებას საჭიროებს.

1.3. სადინარში მოძრავი ღვარცოფის

ჰიდრავლიკური პარამეტრები

ღვარცოფულ ნაკადებთან ბრძოლის ერთ-ერთი პრაქტიკულ ღონისძიებას მცირეგაბარიტინი არატრადიციული კონსტრუქციის საინჟინრო ნაგებობები წარმოადგენს, რომელთა გამოყენების სფეროდ სადინარში მოძრავი ღვარცოფების რეგულირება წარმოადგენს.

სარეგულაციო ნაგებობათა შორის ერთ-ერთ განსაკუთრებულ სახეს წარმოადგენს სხვადასხვა მოდიფიკაციით წარმოდგენილი ტრამპლინის ტიპის გამჭოლი ნაგებობები, რომელთა დანიშნულებაა როგორც დამრტყმელი ძალის შემცირება, ისე ღვარცოფთა ეფექტური სტაბილიზაცია.

პირველი ღვარცოფსარეგულაციო ნაგებობის მშენებლობა ფიქსირებულია მე-20-ე საუკუნის დასაწყისში, რასაც შემდგომ მოჰყვა მრავალი ახალი ტიპის და კონფიგურაციის ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობები. მათ შორის განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მასტაბილიზირებელი ყრუ და გამჭოლი ნაგებობები, ღვარცოფების წინააღმდეგ ბრძოლის ჰიდრავლიკური მეთოდი, ფიტო და სატყეო სამელიორაციო ღონისძიებები და სხვ. მიუხედავად ნაგებობათა განსხვავებული სახეების სიმრავლისა, მოვლენის სირთულე და ურთიერთმართვადი ფაქტორების სიმრავლე, რეგულირების კომპლექსურად გადაწყვეტის შესაძლებლობაა.

ღვარცოფთა უსაფრთხო ტრანზიტი სადინარის კალაპოტის მდგრადობასთან არის დაკავშირებული, რომლის გეომეტრია ხშირად ვერ პასუხობს ნაკადის ჰიდრავლიკურ პარამეტრებს. აღნიშნული შემთხვევები ხშირად სადინარის საიმედო მუშაობის შესუსტების მიზეზიც ხდება.

როგორც ღვარცოფების სადინარში მოძრაობის რეჟიმების ცვლილების შესწავლით იკვეთება, ნაკადის ჭავლები ისეთი ფორმით და ტრაექტორიით მოძრაობს, რომ ადგილი აქვს მათი ტრაექტორიების კალაპოტის შესაბამისი ფორმით ჩამოყალიბებას. სადინართა კალაპოტების დეფორმაცია იმ შემთხვევაში ხდება, როცა ნაკადის ზემოქმედების შესაძლებლობებთან მისი წინააღმდეგობის უნარი გაცილებით ნაკლებია.

კარგად შესწავლილ სადინარში მასზე ნაკადის ზემოქმედების სურათიდან გამომდინარე, კავშირი ნაკადის ჰიდრავლიკასა და კალაპოტის გეომეტრიას შორის ემორჩილება გარკვეულ კანონზომიერებას, როგორც სწორხაზოვან ისე მოხვეულ უბნებზე.

ნაკადის რეჟიმების ცვლილების შეფასების კრიტერიუმად შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ენერგეტიკული მახასიათებლების ცვლილების ფარდობითი დეფორმაციის კოეფიციენტი. როცა მოძრაობის რეჟიმის ცვლილება ნაკადის ტალღის ფორმით ჩამოყალიბების შედეგად ხდება, მაშინ ეს პროცესი შეიძლება შეფასებულ იქნეს, როგორც ნაკადის კუმშვა ან გაჭიმვა. ანალოგიურ შემთხვევას ადგილი შეიძლება ჰქონდეს სადინარის გეომეტრიის შევიწროება-გაფართოების შემთხვევის დროს.

ღვარცოფსარეგულაციო პრაქტიკაში ხშირია მათი მოძრაობის ტალღის ფორმით ჩამოყალიბების შემთხვევები. ასეთია, მაგალითად, ღვარცოფული კერებიდან ფორმირებული ღვარცოფწარმომქმნელი მასის დაძვრა და კალაპოტებში ნაკადებით შექმნილი ხერგილების გარღვევა [71, 72].

კუმშვისა და გაჭიმვის თეორიიდან გამომდინარე, ნაკადის განივი და გრძივი დეფორმაციების შეფასება შესაძლებლობას იძლევა შეფასდეს დეფორმაციის შესაძლებლობები. ნაკადის განივი დეფორმაციის გრძივთან ფარდობით, პირველი მიახლოებით, შესაძლებელია ღვარცოფთა დრეკადი თვისებების შეფასება, მოძრაობის ერთი სტაციონარული მდგომარეობიდან

მეორეში გადასვლა და სხვ. სამეცნიერო შრომებიდან ჩანს, რომ წყლის ნაკადებზე გამოყენებული კონცეფციის გავრცელება ღვარცოფებზე რთულდება, რადგან ღვარცოფის შემთხვევაში განივი დეფორმაციის გრძივთან ფარდობის მაქსიმალურმა შესაძლებლობამ შეიძლება 0,625-ს მიაღწიოს.

ნაკადზე შემხვედრი წინააღმდეგობის ზემოქმედებით ხდება მისი ფორმის შეცვლა და ტალღის ფორმით ჩამოყალიბება. მოძრავი ნაკადის რეჟიმების ცვალებადობითაა გამოწვეული ნაკადის ტრანსპორტუნარიანობის ცვლილებების და კალაპოტში სხვა სახით გადანაწილების შესაძლებლობები. აქედან გამომდინარე, თუ მივიჩნევთ, რომ ჩამონადენის სეზონური რყევის მიზეზი ხარჯის ცვლილებით არის განსაზღვრული, რეჟიმების ცვლილების განმსაზღვრელ ფაქტორად შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ნაკადის ნაგებობით რეგულირების შესაძლებლობები.

ღვარცოფული ნაკადების, კერძოდ ბმული ღვარცოფების უსაფრთხო ტრანზიტის დროს ხშირად ადგილი აქვს გარკვეულ გართულებებს. ტრანზიტის დროს სწორკუთხოვანი კვეთის შემთხვევაში ხიდისქვეშა გასასვლელით ღვარცოფის უსაფრთხო ტრანზიტი მისი გამტარუნარიანობის შესაძლებლობებთან არის დაკავშირებული. ასეთ შემთხვევაში სწორხაზოვანი კვეთის მქონე ტრაქტში ნაკადის შესვლისას წარმოქმნილი ერთგანზომილებიანი მზარდი უკუტალღის ფრონტის დინამიკური პარამეტრების განსაზღვრის მეთოდის დაყრდნობით მზარდი უკუტალღის Z სიმაღლის საანგარიშოდ როცა ნაკადის გალერეას წინ სიღრმე h_0 - ის ტოლია.

$$Z = \frac{gh_0 \pm \sqrt{g^2 h_0^2 - 2Kg}}{g}, \quad (1.3.1)$$

სადაც K კოეფიციენტი და დამოკიდებულია ნაკადის გალერეაში მოძრაობის $V_{\text{გ}}$ და მოძრავი ნაკადის V_0 სიჩქარეზე.

$$K = 4(V_{\text{გ}}^2 h_{\text{გ}} - V_0 V_{\text{გ}} h_0). \quad (1.3.2)$$

კალაპოტის ნებისმიერ ფორმაზე გადასვლის დროს შეიძლება გამოყენებულ იქნეს გადამყვანი კოეფიციენტი, რომელიც მოცემულია ნაშრომში [68].

სადინარის მთელ სიგრძეზე ღვარცოფების შემთხვევაში ადგილი აქვს არათანაბარ მოძრაობას. ასეთივე სურათია ისეთ შემთხვევებში, როცა სადინარის კალაპოტის ფორმა პრიზმატული ან არაპრიზმატულია. ნაგებობათა გეომეტრიული ზომების შერჩევის დროს უცილებელია გათვალისწინებული იქნეს ნაკადის მოძრაობის პარამეტრები. დამყარებული რეჟიმით მოძრაობის შემთხვევაში, როცა კალაპოტის ქანობი i -ს, ხარჯი Q -ს, სიბლანტის კინეტიკური კოეფიციენტი $-\nu$ -ს, ცოცხალი კვეთის ფართობი $-\omega$ -ს, ხოლო ბმულობის ეკვივალენტური სიღრმე h_0 -ის ტოლია, საანგარიშო დამოკიდებულება პარამეტრებს შორის აქვს შემდეგი სახე

$$i - \frac{Q\nu}{g\omega H^2 f(\beta)} \left[1 - \frac{QH2f(\beta)}{\nu\omega^2} \frac{\partial\omega}{\partial x} \right] = 0. \quad (1.3.3)$$

ნაგებობათა გეომეტრიული ზომების შერჩევის დროს აუცილებელია მოძრავი ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ფორმა. როცა $y = \frac{QB_i H f(\beta)}{\omega^2 \nu}$, ფარდობითი სიდიდე H_0 -სიგრძის ნაკადის თანაბარი მოძრაობის, $\eta = \left(\frac{H}{H_0} \right)^3$, სადინარის i ქანობის და განსაზღვრული ℓ უბნის შემთხვევაში

a კოეფიციენტის გათვალისწინებით:

1. დადებითი ქანობის დროს $i > 0$

$$a|i = \frac{H_2^2}{H_0^2} - (1 - \bar{Y}) \ell n \frac{H_2^3 - H_0^3}{H_1^3 - H_0^3} \quad (1.3.4)$$

2. უარყოფითი ქანობის დროს $i < 0$

$$a|i|\ell = \frac{H_1^3 - H_2^3}{H_0^3} + (1 - \bar{I}) \ell n \frac{H_2^3 - H_1^3}{H_1^3 - H_2^3} \quad (1.3.5)$$

ნაგებობათა წინააღმდეგობითი ეფექტი ნაკადის დამრტყმელ ძალაზე და მისი ფრონტალური ნაწილის ფორმაზეა დაკავშირებული.

ფრონტალური ნაწილი, რომელიც კალაპოტური წარმონაქმნების ნაკადთან მიერთებით ან ღვარცოფის მიერ მასის დანაკარგით არის განპირობებული, მას ფორმას აძლევს.

დეფორმირებადი ზედაპირის შემთხვევაში თავისუფალი ზედაპირის

საანგარიშო დამოკიდებულებას, როცა მოძრავი ნაკადის სიღრმე H -ის ტოლია, კუთრი ხარჯი ერთეულ სიგრძეზე $q = \frac{giH^3}{\nu} \left[\frac{\beta}{\nu}(\beta^2 - 1) + \frac{1}{3}(1 - \beta^3) \right]$, მოძრავი ნაკადის მიერ გავლილი X სიდიდის, კინემატიკურობის კოეფიციენტი ν ტოლია

$$Y = \sqrt[3]{H^3 \pm \frac{q_0 X \nu}{gi \left[\frac{\beta}{\nu}(\beta^2 - 1) + \frac{1}{3}(1 - \beta^3) \right]}}. \quad (1.3.6)$$

ყრუ ნაგებობაზე დამრტყმელი ძალის სიდიდე, როცა მოძრავი ნაკადის მოცულობითი წონა γ -ის, კალაპოტის სიგანე β -ას, ნაკადის სიმაღლე H -ის, სიჩქარე V -ს, შინაგანი ხახუნის კუთხე φ -ის, კალაპოტის ფუძესთან დახრის კუთხე α -ს და ბმულობის ეკვივალენტურ სიღრმე h_0 -ის ტოლია:

$$\Delta P = K \frac{\alpha \beta H V^2}{g}. \quad (1.3.7)$$

გამჭობობის გავლენით დამრტყმელი ძალის სიდიდე:

$$P_{\text{გამ.}} = \Delta P K. \quad (1.3.8)$$

ტალღის ფორმით მოძრავი ღვარცოფის შემთხვევაში ნაგებობის სიმაღლე ნაკადის პარამეტრებზეა დამოკიდებული. ნაკადის H სიღრმის ცვლილება t დროსთან კავშირშია, როცა ერთეული სიგანისა და სიგრძეზე მოსალოდნელი ხარჯის ინტენსივობა q^1 -ის, განსახილველი უბნის სიგრძე $X - X_0$ -ის, კინემატიკურობის კოეფიციენტი ν -ს, სადინარის ქანობი i -ს და შემასწორებელი კოეფიციენტის $f(\beta)$ ფუნქციის სახით არის წარმოდგენილი

$$H^3 = [H_0^3 - q'(t - t_0)]^{\frac{1}{3}} + \frac{q'(X - X_0)\nu}{g i f(\beta)}. \quad (1.3.9)$$

როცა ტალღა ფრონტის წინ და მის ბოლოს თანაბარი რეჟიმით მოძრაობს, რომლის შესაბამის ω_1 და ω_2 კვეთში საშუალო სიჩქარე და ხარჯები V_1, Q_1 და V_2, Q_2 -ს ტოლია ტალღის, სიმაღლე

$$\Delta h = \frac{V h_1}{\sqrt{g h_1 \cos \alpha}}. \quad (1.3.10)$$

ხშირია შემთხვევა, როცა ნაგებობაზე აღილი აქვს ნაკადის კუმშვას. განივი ნაგებობებით, ნაკადის B სიგანის სიდიდით მისი კუმშვის შემთხვევაში, როცა ΔB სიდიდით, ბმულობის ეკვივალენტური სიღრმე h_0 -ის, ნაკადის სიღრმე h -ს, შინაგანი ხახუნის კოეფიციენტი φ -ის ტოლია:

$$\frac{\Delta B}{B} \leq \frac{\left(1 - \frac{h_0}{h}\right) 2\sqrt{(1 - h_0/h)\varphi} + \left(1 - \frac{h_0}{h}\right)\varphi}{1 + \left(1 - \frac{h_0}{h}\right)\varphi}. \quad (1.3.11)$$

ნაკადის გაჭიმული ნაწილის Δh სიღრმის ფარდობა მოძრავი ნაკადის სიღრმესთან

$$\frac{\Delta h}{h} \leq \frac{2\sqrt{(1 - h_0/h)\varphi} + \left(1 - \frac{h_0}{h}\right)\varphi}{\varphi}. \quad (1.3.12)$$

ნაკადის ერთი სტაციონარული მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლა ნაკადის მდგრადობის დაკარგვით ხდება. ქანობი i , რომელიც შეესაბამება ნაკადის მდგრადობის დაკარგვას, როცა რეოლოგიის კოეფიციენტი a -ს ნაკადის ბმულობის ეკვივალენტური სიღრმის h_0 -ის, ნაკადის სიღრმის h -ის, შინაგანი ხახუნის კუთხე φ დამოკიდებული სიმქისის d დიამეტრზე, ტოლია:

$$i \geq 0,0027 \sqrt{\frac{d}{h}} \frac{(2a + a + 4)^2}{\left[a^{0,333} (2\alpha - 1) (2\sqrt{a} + a + 2) - 2 \right]^2}. \quad (1.3.13)$$

არსებული კვლევის მასალების ანალიზით გამოიკვეთა ღვარცოვის მდგომარეობაზე ურთიერთსაწინააღმდეგო მოსაზრებები, შეფასების მეთოდების სრული სიზუსტის დაუსაბუთებელი წარმოდგენები, რეჟიმების სახიდან ცვლილების შესაძლებლობები, საანგარიშო მოდელების შერჩევის სირთულე, რაც შედეგების ინოვაციური მეთოდებით სრულყოფასთან საინჟინრო გადაწყვეტების განგარიშების მეთოდოლოგიის დაზუსტებასთან არის დაკავშირებული.

ღვარცოფები, რომლებიც ხასიათდება ბმულობით და მოძრაობს სტრუქტურული რეჟიმით, მოდელების შერჩევის თვალსაზრისით უფრო

მიახლოებულია ერთგანზომილებიან მოდელთან რომელიც გამოიყენება წყლის ნაკადების მდგრადობის აღწერის დროს, რაც იმის საშუალებას იძლევა რომ ერთგანზომილებიანი მოდელების ადაპტირება ღვარცოფულ ნაკადებთან თამამად იყოს გამოყენებული [75].

თავი 2. ღვარცოფთა რისკებისა და სტიქიის განგარიშების თეორიული და საველე კვლევის ოპერატიული საშუალებები

2.2. საველე კვლევის გათვალისწინება. ღვარცოფთა ფორმირების ენერგეტიკული პოტენციალი და საანგარიშო მახასიათებლები

ბუნებრივი კატასტროფებიდან მოსახლეობისა და საინჟინრო ობიექტებისათვის განსაკუთრებულ საშიშროებას ქმნის ღვარცოფები, რომელთა ტრანსფორმაცია დაფიქსირებულია საქართველოს მთიანეთის ყველა გეომორფოლოგიურ ზონაში და მათი მრავალსახეობიდან განსაკუთრებით საყურადღებოა ეროზიულ-გრავიტაციული სახით წარმოდგენილი გლაციალური და ბმული ღვარცოფები. მათი ფორმირების მთავარ მიზეზს ძირითადად თავსხმა წვიმები წარმოადგენს.

ღვარცოფწარმომქმნელ აუზებში ღვარცოფის გავლის შედეგებზე ჩატარებული რეკოგნოსცირებითი სამუშაოებისა და საველე კვლევების საფუძველზე იკვეთება როგორც სადინარებში მიმდინარე კალაპოტური პროცესების შესწავლის აუცილებლობა, ასევე ღვარცოფთა რეოლოგიური ბუნებიდან გამომდინარე მათი მდგრადობის შესწავლის აუცილებლობა და საანგარიშო დამოკიდებულების მიღების ამოცანა, რომელიც ნაგებობასთან ნაკადის ადაპტირების საფუძველი გახდება, ახალი ინოვაციური საინჟინრო გადაწყვეტილების სამშენებლო ნორმებისა და წესების შემუშავების დროს.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, ღვარცოფსაწინააღმდეგო სხვადასხვა მასტაბილიზირებელი ღონისძიებების – კერძოდ, ყრუ და გამჭოლი კონსტრუქციების შერჩევის დროს, ღვარცოფსადინარების სატრანზიტო ზონებში მიმდინარე ურთულესი პრობლემების გამო საკითხი საჭიროებს კომპლექსურად გადაწყვეტას. ნიშანდობლივია ისიც, რომ ღვარცოფთა რეგულირების საკითხი არასაკმარისი მოცულობით და ხანგრძლივი

შუალედებით მიმდინარეობს. ეს ეხება როგორც კალაპოტური ნაგებობების მშენებლობას, ისე მათ გამწმენდ სამუშაოებს, რაზედაც წამყვანი როლი ნაკადის მდგომარეობას ეკისრება.

ბუნებრივი კატასტროფული მოვლენების შეფასება და მათი პარამეტრების რაოდენობრივი განსაზღვრა, რომელიც შემდეგ საინჟინრო გადაწყვეტილებათა განმსაზღვრელ ფაქტორად მოიაზრება, განსაკუთრებულ როლს თამაშობს მდგრადი გარემოს დეცენტრალიზებული ინფრასტრუქტურის ჩამოყალიბებაში. არსებული სიტუაციიდან გამომდინარე აუცილებელია წყალშემკრები აუზის ბუნებრივი ინფრასტრუქტურის მოწყობისა და გარემოსდაცვითი ღონისძიებების გამოყენების შესაძლებლობის დონის ამაღლება [76, 77, 78, 79, 80].

წარმოდგენილია საველე სამეცნიერო ექსპედიციური კვლევის შედეგები, რომლებიც განხორციელებულია მცხეთის მუნიციპალიტეტის ტერიტორიაზე, კერძოდ შიომღვიმის სამონასტრო კომპლექსის მიმდებარე ტერიტორიაზე, მდ. სამონასტრო ხევში.

ღვარცოფების სიმძლავრისა და მათი სხვადასხვა დანიშნულების ნაგებობებზე დინამიკური ზემოქმედებისას ნაკადის დარტყმის ძალის განსაზღვრისათვის დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ღვარცოფის მიერ ტრანსპორტირებული ნატანების საშუალო დიამეტრის დადგენას [81, 82, 83].

ზემოაღნიშნული პრობლემის გადაწყვეტის მიზნით ჩვენს მიერ 2019-2021 წლებში განხორციელდა საველე კვლევები მდინარე სამონასტრო ხევში. ჩვენს მიერ მდ. სამონასტრო ხევში შერჩეულ იქნა 3 საანგარიშო კვეთი, საიდანაც კალაპოტიდან აღებულ იქნა ღვარცოფული მასის სინჯები 10-12 კგ საზღვრებში (იხილეთ ფოტოები).

მდ. სამონასტრო ხევიდან აღებული ნიმუშები ჩამოტანილ იქნა ჰიდროტექნიკურ ლაბორატორიაში კვლევისათვის. ლაბორატორიაში შერჩეულ იქნა გრანულომეტრიული საცრები გარკვეული გრადაციებით (იხილეთ ცხრილი 1).

საველე კვლევები მდინარე სამონასტროს ხევში
ღვარცოფის გავლის შემდეგ
2020 წლის 7 მაისი (შოიძღვიმის მიმდებარე ტერიტორია)



სურ. 1. ნაღვარევის ხევი



სურ.2. ანათვლების დაფიქსირება



სურ. 3. სამუშაო პროცესი



სურ. 4. მასალის ამოღების პროცესი



სურ. 5. საინტერესო რჩევები

ცხრილი 1

გრანულომეტრიული საცრების გრადაციები

№	საცრის დიამეტრი (მმ)	საშუალო დიამეტრი (მმ)
1.	>40	40
2.	4,0 ÷ 20	30,0
3.	20 ÷ 10	15,0
4.	10 ÷ 5	7,50
5.	5 ÷ 2,5	3,75
6.	2,5 ÷ 1,25	1,875
7.	1,25 ÷ 0,63	0,94
8.	0,63 ÷ 0,315	0,473
9.	0,315 ÷ 0,14	0,227
10.	0,14	0,02

გრუნტის ღვარცოფული მასის გაცრის შემდეგ მიღებულ იქნა შემდეგი მაჩვენებლები (იხილეთ ცხრილი 2):

ცხრილი 2

ლაბორატორიული კვლევები (ნიმუში I)

№	საცრის ზომები	ნიმუშის წონა (კგ)	ნიმუშის პროცენტული შემცველობა (%)	გრანულომეტრიის ინტეგრალური მრუდის კოორდინატები
1.	>4,0	3,600	30,00	100
2.	4,0 ÷ 20=30,00 სმ	4,400	36,66	70,0
3.	20 ÷ 10=15,00 სმ	2,300	19,17	33,34
4.	10 ÷ 5=7,50 სმ	0,900	7,50	14,17
5.	5 ÷ 2,5=3,75 სმ	0,400	3,33	6,67
6.	2,5 ÷ 1,25=1,875 სმ	0,100	1,13	3,34
7.	1,25 ÷ 0,63=0,94 სმ	0,090	0,75	2,2
8.	0,63 ÷ 0,315=0,473 სმ	0,070	0,58	1,46
9.	0,315 ÷ 0,14=0,227 სმ	0,064	0,54	0,87
10.	0,14<	0,040	0,34	0,34
		∑ = 12,00 კგ	∑ = 100% =100	

ცხრილი 3

ლაბორატორიული კვლევები (ნიმუში II)

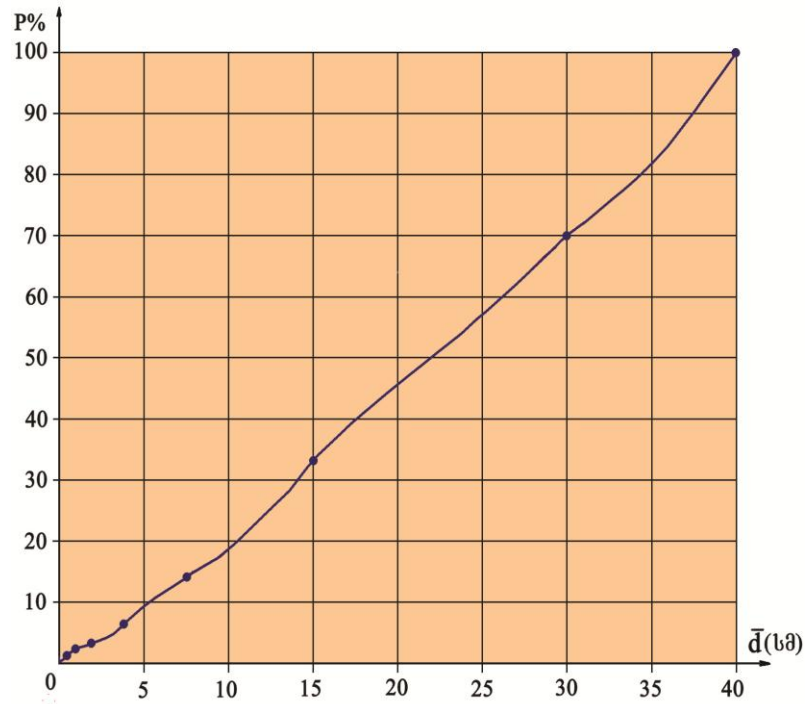
№	საცრის ზომები	ნიმუშის წონა (კგ)	ნიმუშის პროცენტული შემცველობა (%)	გრანულომეტრიის ინტეგრალური მრუდის კოორდინატები
1.	>4,0	2,000	1,6	100
2.	$4.0 \div 20=30,00$ სმ	4,000	31,3	83,4
3.	$20 \div 10=15,00$ სმ	3,500	28,3	52,10
4.	$10 \div 5=7,50$ სმ	1,270	10,5	23,8
5.	$5 \div 2,5=3,75$ სმ	0,700	5,8	13,3
6.	$2,5 \div 1,25=1,875$ სმ	0,300	2,5	7,5
7.	$1,25 \div 0,63=0,94$ სმ	0,050	4,1	5,0
8.	$0,63 \div 0,315=0,473$ სმ	0,08	0,6	0,9
9.	$0,315 \div 0,14=0,227$ სმ	0,03	0,2	0,3
10.	0,14<	0,02	0,1	0,1
		$\Sigma = 12,00$ კგ	$\Sigma = 100\% = 100$	

ცხრილი 4

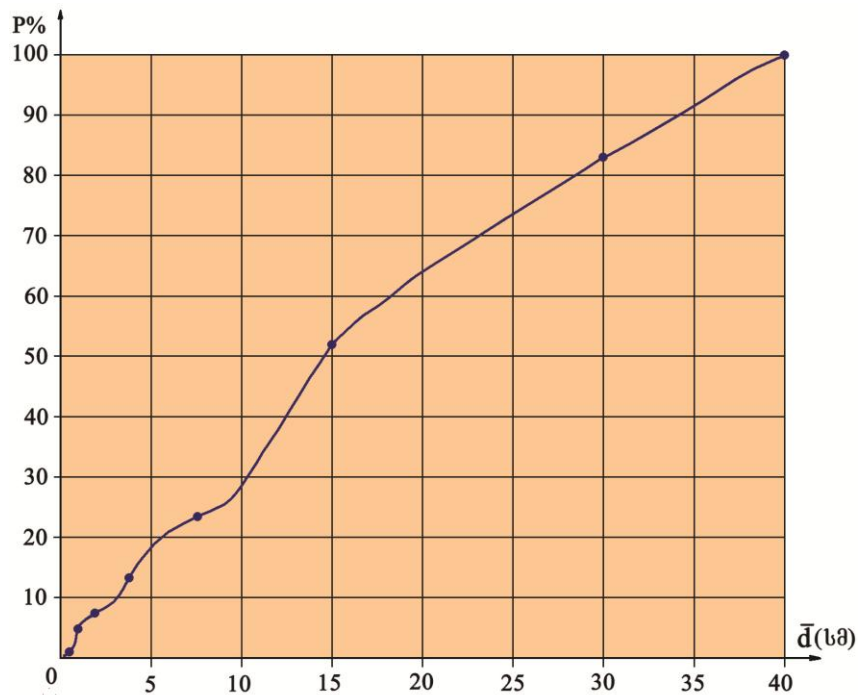
ლაბორატორიული კვლევები (ნიმუში III)

№	საცრის ზომები	ნიმუშის წონა (კგ)	ნიმუშის პროცენტული შემცველობა (%)	გრანულომეტრიის ინტეგრალური მრუდის კოორდინატები
1.	>4,0	0,500	3,1	100
2.	$4.0 \div 20=30,00$ სმ	2,500	18,8	96,9
3.	$20 \div 10=15,00$ სმ	2,400	19,0	78,1
4.	$10 \div 5=7,50$ სმ	3,200	20,6	59,1
5.	$5 \div 2,5=3,75$ სმ	1,770	12,7	38,5
6.	$2,5 \div 1,25=1,875$ სმ	0,200	14,6	25,8
7.	$1,25 \div 0,63=0,94$ სმ	0,900	7,0	11,2
8.	$0,63 \div 0,315=0,473$ სმ	0,500	4,0	4,2
9.	$0,315 \div 0,14=0,227$ სმ	0,02	0,2	0,2
10.	0,14<	0,01	0	0
		$\Sigma = 12,00$ კგ	$\Sigma = 100\% = 100$	

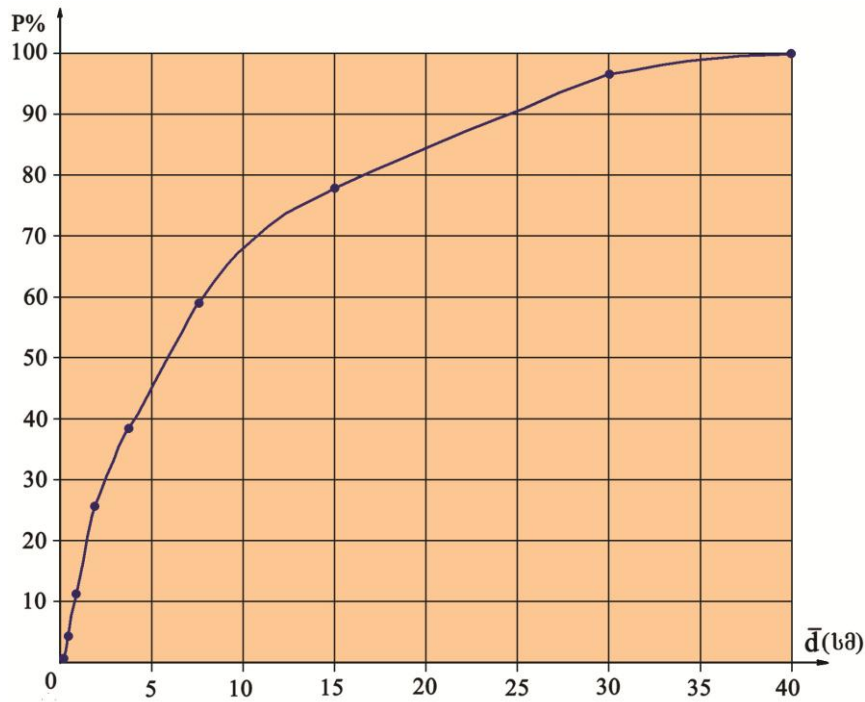
სტატისტიკური მაჩვენებლების გამოყენებით (იხ. ცხრ. 2-4) ცხრილის გრაფის 2-1 და მე-5-ს გამოყენებით ვაგებთ ღვარცოფული გამონატანის ნატანების ინტეგრალურ გრანულომეტრიის მრუდებს სამივე ნიმუშისათვის, დატანილია გრაფიკებზე (იხ. ნახაზი 1; 2; 3).



ნახ.1. პირველი ნიმუშის გრანულომეტრიის ინტეგრალური მრუდი



ნახ. 2. მეორე ნიმუშის გრანულომეტრიის ინტეგრალური მრუდი



ნახ.3. მესამე ნიშუმის გრანულომეტრიის ინტეგრალური მრუდი

მიღებული მონაცემების გამოყენებით და ცნობილი ემპირიული დამოკიდებულებით გამონატანის საშუალო დიამეტრს ვანგარიშობთ შემდეგი დამოკიდებულებით

$$\text{I ნიშუმისათვის: } \bar{d} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i d_i}{100} \approx 26,5 \text{ მმ} \approx 2,6 \text{ სმ},$$

$$\text{II ნიშუმისათვის: } \bar{d} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i d_i}{100} \approx 14,8 \text{ მმ} \approx 1,5 \text{ სმ},$$

$$\text{III ნიშუმისათვის: } \bar{d} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i d_i}{100} \approx 11,0 \text{ მმ} \approx 1,1 \text{ სმ}.$$

ამრიგად, საველე კვლევების შედეგად და ლაბორატორიაში განხორციელებული კამერალური დამუშავებით და მათემატიკური გაანგარიშებით დადგინდა ნიშუმების საშუალო დიამეტრის ცვლილების საზღვრები, ხოლო საანგარიშო კვეთში მდ. სამონასტრო ხევში ღვარცოფული გამონატანის საშუალო დიამეტრი ტოლია:

$$\bar{D} = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3} = \frac{2,6 + 1,5 + 1,1}{3} = \frac{5,2}{3} = 1,73 \text{ სმ}.$$

ღვარცოფული გამონატანის საშუალო დიამეტრის გამოყენებით

შემდეგ ეტაპზე იანგარიშება ღვარცოფის საშუალო სიჩქარე, ხარჯი მყარი ნატანების ტრანსპორტუნარიანობა და ნატანების მყარი ფრაქციების ხვედრითი ხარჯი. გამჭოლი ნაგებობის დაპროექტების შემთხვევაში ნაგებობის გამჭოლობა [84].

ყოველივე ეს საშუალებას გვაძლევს შემდეგ ეტაპზე ვიანგარიშოთ ღვარცოფის დინამიკური დარტყმის ძალის სიდიდე ნაგებობაზე, რაც შემდგომ ეტაპზე ნაგებობის მუშაობის საიმედოობისა და კონსტრუქციის მწყობრიდან გამოსვლის რისკის შეფასებას იძლევა.

2.2. მდინარე თერგის ხეობაში ფიქსირებული ღვარცოფული მოვლენები

ღვარცოფთა ანომალურობაზე და რისკების შედეგებზე ნათელი წარმოდგენის მიზნით განხილულია მდინარე თერგის ხეობაში ფიქსირებული ღვარცოფული მოვლენები. ყაზბეგის რაიონის წყალშემკრები აუზის მთავარ მდინარეს თერგი წარმოადგენს, რომლის ძირითადი შენაკადებია: ამალი, დევდორაკი, მთებილონი, ჩხერი, ჩხატი, სუათისი, განაისის წყალი, ქესია, რესის წყალი, ყაბახი, ჯიმრის წყალი - მარცხენა, ესიქომი, არმაზი, არდადონი, ბიდარა, დესისკომიდომი, ხდის წყალი, სნოსწყალი - მარჯვენა. წყალშემკრები აუზის ფართობი 43000 კმ²-ია და მისი სიგრძე 623 კმ-ის ტოლია.



სურ. 6. თერგი დამწყვდევამდე

ხეობის ყველაზე დაბალი წერტილი კლდეკარში 1210 მ-ია. ზღვის დონიდან და იგი კავკასიონის ჩრდილო ფერდობზეა განლაგებული. ხეობის ყველაზე მაღალი წერტილი 5033 მ-ზე მდებარეობს. თერგის მორფომეტრია ეროზიულ-კუმულაციური პროცესებით არის ფორმირებული, რომელთა ფონი მყინვარულ-ვულკანური, გრავიტაციული, კარსტული წარმოშობის ფორმით არის გართულებული. დინება მდინარის უკიდურესად მარჯვენა ზოლში ხდება.

ღვარცოფის გავლის ადგილებზე ფერდის დახრილობა 8-12°-ს შეადგენს, ხოლო ზოგიერთი ადგილები დიდი დახრილობის ვერტიკალური კარნიზებით არის წარმოდგენილი. ფერდობების დიდი დახრილობის გამო ნაკადი ხასიათდება დიდი ენერგიით. მდინარის კალაპოტში ხშირია გლაცი-ალური ღვარცოფების ჩამოსვლის შემთხვევები, რომელიც კატასტროფული წყალდიდობების და წყალმოვარდნების განმსაზღვრელ ფაქტორსაც წარმოადგენს.

ღვარცოფები ფიქსირებულია მდინარე თერგის საშუალო და მაღალ-მთიანი ზონის ყველა შენაკადში. მდინარე თერგის ყველაზე ღვარცოფულ შენაკადს წარმოადგენს ბიდარა, გორისციხისხევი, სიონის ხევი, გერგეთი, ჩხერი, ამალი, რომელთა აუზები სუბალპურ ზონაშია განლაგებული.

გეოლოგიის თვალსაზრისით მდ. თერგის აუზი წარმოდგენილია შავი თიხა-ფიქლებით, არავლოლიტებით, ზოგან კირქვებით, კონგლომერატებით და ქვიშნარებით. კლიმატური მახასიათებლების მიხედვით აუზი შემდეგი სახით არის წარმოდგენილი: 2000 მ სიმაღლემდე ზღვის დონიდან რაიონი ხასიათდება ნოტიო ჰავით, იცის შედარებით მშრალი, ცივი ზამთარი და ხანგრძლივი გრძელი ზაფხული – 650 ათასი მმ წელიწადში, მდგრადი თოვლის საბურველი 3-4 თვე. 2000-2600 მ ზონა ზომიერად ნოტიო ჰავით გამოირჩევა. გაბატონებულია მთა-ხეობის ქარები, ნალექები 1200-1000 მმ-ია წელიწადში. მდგრადი თოვლის საბურველი 5-7 თვე. 2600-3600 მ ზონა ზომიერად ნოტიო ჰავით გამოირჩევა, არ იცის ნამდვილი ზაფხული, ხოლო 3600 მ-ზე მაღლა ადგილმდებარეობა მაღალი მთის ზომიერად ნოტიო ჰავით ხასიათდება და ნალექები უმეტესად თოვლის სახით მოდის.

ღვარცოფების წარმოშობის კერა – „დედორაკი“ მყინვარწვერის მასივის ჩრდილო-აღმოსავლეთ ფერდობზეა განლაგებული და დაკიდული ტიპის სამი მყინვარით არის წარმოდგენილი.

ღვარცოფებზე ნათელი წარმოდგენის მიზნით მოგვყავს დედორაკ-ამალის ხევიში განხორციელებული კვლევის შედეგები.

თერგის ხეობაში ღვარცოფთა გავლის შედეგად ფიქსირებულია როგორც საგზაო მაგისტრალების, ეროვნული მემკვიდრეობის ობიექტების ნგრევის შედეგები, ასევე იშვიათად ადამიანის მსხვერპლის შემთხვევები.

ღვარცოფების გავლით სახეზეა გამოკვეთილი კალაპოტური პროცესები და ინტენსიური ეროზიული ღვარცოფული დანალექების წარმოქმნის შემთხვევები, სადინარებში ადგილი აქვს სანაპირო ფერდობების გრავიტაციულ ჩამოშლას და მისი უკან დაწევის პროცესს. ამ უკანასკნელის უკან დაწევის შესაძლებლობა წელიწადში 2,0 მეტრამდე აღწევს.

1932 წლის მონაცემებით დედორაკი-ამალის ღვარცოფმა გამოიტანა თერგის ხეობაში 3,4 მილიონი მ³ ქვა-ტალახოვანი მასა, ამოავსო კალაპოტი 2-2,2 კმ სიგრძეზე, შექმნა 95 მეტრი სიმაღლის კაშხალი და 2 მლნ მ³ მოცულობის დროებითი ტბა. ქვა-ტალახოვანი კაშხლის გარღვევა მოხდა 8 სთ-ში, რასაც მოჰყვა მყარი მასალით გამდიდრებული წყალდიდობა.

2007 წლის 2 აგვისტოს მდ. ამალი-დედორაკის შესართავთან ადგილი ჰქონდა საავტომობილო მაგისტრალის მწყობრიდან გამოსვლას, ხოლო 2014 წლის 17 მაისს, დილის 9 სთ-ზე და 40 წუთზე კატასტროფულმა ღვარცოფმა გამოიწვია ქვეყნის სტრატეგიული ობიექტების ინფრასტრუქტურის პარალიზება.

ობიექტების მწყობრიდან გამოსვლის ჩამონათვალშია: სამხედრო საავტომობილო მაგისტრალი, ჩრდილოეთის და სამხრეთის დამაკავშირებელი 700 და 1200 მმ-იანი გაზსადენი, მწყობრიდანაა გამოსული მაგისტრალური ძაბვის ელექტროგადაცემის ანძები. ღვარცოფთა ზემოქმედებამ გარე სამყაროს მოწყვიტა მესაზღვრეთა ბაზა, საბაჟო გამშვები პუნქტი და საქართველოს საპატრიარქოს რეზიდენცია. ადგილი ჰქონდა ადამიანთა მსხვერპლს.

1971 წელს კერებიდან გადმოსულმა ღვარცოფმა მწყობრიდან გამოიყვანა სამხედრო გზის 8 კმ-იანი მონაკვეთი.



სურათი 7. მცინვარი დევდორაკი

2016 წლის 23 ივნისს 19 საათზე დევდორაკი-ამალისა და თერგის შესართავთან დაფიქსირებულმა ღვარცოფმა სანაპირო ზოლს მთლიანად მოწყვიტა 600 მ-ის სიგრძის გზის მონაკვეთი, ხოლო ღვარცოფულმა გამონატანმა 600 000 მ³ შეადგინა. მდინარე თერგისა და დევდორაკი-ამალის შესართავში კალაპოტი მნიშვნელოვნადაა შევიწროებული. მდინარე დევდორაკის ხეობა სათავეს იღებს მცინვარწვერის 5033,3 მ ჩრდილოეთ კალთიდან 4225-4250 ჰივსომეტრიულ ინტერვალში და სუბ-განედურად ვრცელდება აღმოსავლეთის მიმართულებით. მდინარე დევდორაკის პირველადი ხეობის მორფომეტრია სათავიდან შესართავამდე ეროზიული პროცესების გამონატანით არის ტრანსფორმირებული. დევდორაკის ენის შემდეგ ხეობის ჩაჭრის სიღრმე თანდათან იზრდება სათავიდან. ხასიათდება ძლიერი დახრილი სანაპირო ფერდობების ვარცლისებრი საგებით. 2045 მ ნიშნულიდან მდინარე დევდორაკი და შემდეგ მდინარე ამალის შესართავი განთავსებულია 1715 მ სიმაღლეზე. ქვემოთ გველეთის ტბის მერიდიანიდან მისი კლავნილი ტრაპეციის მაგვარი კალაპოტი მთლიანად ღვარცოფულ დანალექებში გადის, ხოლო გველეთიდან მდინარე თერგის შესართავამდე

კალაპოტი V -ს მაგვარი ფორმით ხასიათდება. მდინარე დევდორაკის კალაპოტი ამაღლამდე ხასიათდება ცვალებადი სიგანით 18-30 მ. კალაპოტში გავლილი ნაკადის ფიქსირდება ტალღისებური სახით და სანაპირო ფერდობზე მისი კვალი 3-15 მ ზღვრებში მერყეობს. მდინარე დევდორაკის და ამაღლის შეერთების შემდეგ ღვარცოფული გამომუშავებული კალაპოტი ტრაპეციული ფორმით და კლაკნილი სანაპირო ფერდობით ხასიათდება. გველეთის ტბის მერიდიანზე ადგილი აქვს ჩრდილო-აღმოსავლეთის მიმართულებით მდინარის მკვეთრ მოხვევას. ამასთან ერთად ხდება ტრაპეციისებრი განივი კვეთის მყისიერად ტრანსფორმირება V -ს მაგვარი კვეთის კალაპოტად. აღნიშნულის შედეგად ხდება მისი გამტარუნარიანობის შემცირება მოხვეულ უბანზე, ხოლო აღნიშნულ მონაკვეთზე ღვარცოფი შესაძლებელია 25-30 მეტრიანი ტალღის გავლის შესაძლებლობა. კალაპოტის ჩაჭრის სიმაღლე ამ მონაკვეთზე 23-25 მ-ის ზღვრებში იცვლება. კატასტროფის დროს ღვარცოფის კუმშვის გამო შესაძლებელია დაწნევის ენერჯის გაზრდა. თერგის შესართავის მიმართულებით მისი გადაფრქვევით ღვარცოფული ნაკადის გაჩერების შედეგად შექმნილია მძლავრი გამოტანის კონუსი, დაახლოებით 1,5 მლნ მ³ მოცულობით. განხორციელებულმა კატასტროფამ გამოიწვია დარიალის ხეობაში სადინარის მთლიანად ჩახერგვა. ღვარცოფის წარმოშობის კერიდან მდინარე თერგის შესართავამდე გამოტანილი მყარი მასის საერთო მოცულობამ შეადგინა 5 მლნ მ, რომლის უმეტესი ნაწილი განაწილდა როგორც დევდორაკის ენის ისე ღვარცოფის სატრანზიტო უბნის მთელ მონაკვეთზე. ღვარცოფის გამოტანის კუმულაციური მრუდის ანალიზიდან გამომდინარე მყარი ჩანართის 200 მ³-იანი დიამეტრის მქონე ნაწილაკების პროცენტულმა მოცულობამ შეადგინა 55-60%, ხოლო დანარჩენი პროცენტი 10-200 მლნ მ-იანი ზომის ნაწილაკებზე გადანაწილებული. ღვარცოფის სტრუქტურულობას ასაბუთებს ის, რომ რამდენიმე დღის განმავლობაში თერგის მიერ ვერ მოხერხდა მყარი გამოტანის გარეცხვა. ღვარცოფული ნაკადით თერგის გადაკეცვის შედეგად შექმნილმა დროებითმა წყალსაცავის მოცულობამ შეადგინა დაახლოებით 150 000 მ³, ხოლო წყალსაცავის სიღრმის ცვალებადობა დაფიქსირებულია 10-15 მ-ის ფარგლებში.

დღევანდელი მდგომარეობით ღვარცოფის წარმომქმნელი მასის დარჩენილი ნაწილი განთავსებულია კალაპოტის ე.წ. ჯიბეებში და მისი დაძვრის არავითარი საშიშროება არ არსებობს.



სურ. 8. დამცავი საყრდენი კედელი

დღევანდელი ღვარცოფწარმოქმნის პროცესი მდინარე თერგის აუზში შემდეგი სახით არის წარმოდგენილი:

– ღვარცოფის ჩამოყალიბების კერის მაღალი ენერგეტიკული პოტენციალი და ზღვრული წონასწორობის განმსაზღვრელი მახასიათებლების, კერძოდ ბმულობისა და შინაგანი ხახუნის კუთხის დაცემა კლიმატური პირობების ზემოქმედებით;

– ტექნოგენური პროცესებით კერაში ფორმირებული ღვარცოფის მასისთვის დამახასიათებელია უწყვეტი გარემოს რღვევა და დარღვეული სტრუქტურული ელემენტების ბლოკების სახით გადაადგილება;

– გამოფიტვის გამომწვევი მიზეზების მიმართ კერაში არსებული

ქანების დამსახურებაა სიმტკიცობრივი მახასიათებლების არათანაზომიერი გადანაწილება;

– მეწყრული პროცესების განმაპირობებელი რისკებისათვის კერაში განთავსებული ქანები ხასიათდება შრეობრივი განლაგებით და დანაპრალებულ ღვარცოფულ მასაში შესაძლებელია ატმოსფერული ნალექების დიდ სიღრმეზე შექონვა;

– კერაში ღვარცოფწარმომქმნელი მასის ფორმირებაში მოქმედ ფაქტორებზე ინფორმაციის სიღარიბე და მისი არარსებობა;

– ღვარცოფსადინარებში სენსიტიური უბნების საველე-სარეკოგნოსცირო კვლევების არარსებობა და საინჟინრო გადაწყვეტებში გაანგარიშების მეთოდური რეკომენდაციების გამოყენების დროს;

– კატასტროფის შეტყობინების ტექნიკური საშუალებებით შეტყობინების არარსებობით;

– ბუნებრივი სტიქიების დაცვის ღონისძიებების სქემებისა და ღვარცოფულ მოვლენებზე დაკვირვების მასალების არარსებობა.

2.3. ბმული ღვარცოფის დაუმყარებელი

არათანაბარი მოძრაობა

ღვარცოფთა ჰიდრავლიკის ამოცანების ანალიზური გადაწყვეტა თანამედროვე პირობებში იმის გამო არ კარგავს აქტუალობას, რომ ბუნებრივ პირობებში ძნელად მოიპოვება სადინარების ისეთი ადგილები, სადაც მოძრაობა თანაბარი ძრაობის რეჟიმით ხდება. გამონაკლისად შეიძლება ჩაითვალოს ის ადგილები, რომელთათვისაც დამახასიათებელია მოძრაობის მდგრადი რეჟიმი და კალაპოტის უცვლელი გეომეტრიული მაჩვენებლები.

სადინარში მოძრაობის დროს ღვარცოფი იცვლის როგორც რეჟიმს, ისე მისი თავისუფალი ზედაპირის მოხაზულობას. სხვადასხვა ფორმებითაა წარმოდგენილი, თავისუფალი ზედაპირის ფორმათა განსხვავებულობა კალაპოტის შევიწროება-გაფართოებით, განივი კვეთის სიგრძეზე ცვლილება

შემხვედრი წინააღმდეგობების არაერთგვაროვნებით და სხვა მახასიათებლებით არის გამოწვეული. ნაკადის ასეთი პირობებით მოძრაობას თან ახლავს რეჟიმის როგორც ნახტომისებურად ისე მდორედ ცვლილება და მდგრადობის რღვევა [85, 86, 87, 88].

მიუხედავად იმისა, რომ დაგროვილია დიდი მოცულობის სამეცნიერო ინფორმაცია ღვარცოფთა მდგრადობის რღვევასა და რეჟიმების ცვლილებაზე, მათი სარეგულაციო ღონისძიებათა საპროექტო პარამეტრების შერჩევის დროს აუცილებელია გათვალისწინებულ იქნეს როგორც რეოლოგიური მაჩვენებლების გავლენა, ისე თვისობრივ დინამიკაზე დაკვირვება და ასეთნაირად განხორციელდეს არსებული საანგარიშო მოდელების როგორც კორექტირება, ისე მათი დაზუსტება. ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, დიფერენციალური განტოლების შედგენის დროს მნიშვნელოვანია კორექტირება გაუკეთდეს და დაზუსტდეს კვლევის ის მონაცემები და არსებული მასალები რომელებიც არსებით გავლენას ახდენს ღვარცოფთა რთული დინამიკის ჩამოყალიბებასა და ფორმირებაზე.

ღვარცოფული მოძრაობის დიფერენციალური განტოლების შედგენის დროს წინასწარ მიღებულია შემდეგი დაშვებები:

1. ღვარცოფის ფორმირება და მოძრაობა ხორციელდება მათი წარმოშობის კერებიდან;
2. ღვარცოფის მოძრაობის დროს მისი ტანის არეში არ ხდება შემადგენელი კომპონენტების მასების გადაადგილება;
3. მოძრაობა სტატიკური, დინამიკური, ინერციული და სიმძიმის ძალების ზემოქმედებით ხდება;
4. შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების შემთხვევაში ადგილი აქვს მოძრაობის რეჟიმების შეცვლას და მდგრადობის რღვევას;
5. გამოტანის კონუსებზე გაჩერების შემთხვევაში არ ხდება მისი ტანის ცალკეულ კომპონენტებად დაშლა;
6. რეოლოგიური მახასიათებლები (საწყისი წინააღმდეგობა ძვრაზე, შინაგანი ხახუნის კუთხე, სიბლანტე, შეჭიდულობა) განიხილება.

ღვარცოფთა შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების სიზუსტის და მდგრადობის შეფასების მიზნით აუცილებელია მხედველობაში იქნეს მიღებული მექანიკის და ჰიდრავლიკის კლასიკური კანონები და ღვარცოფ-მცოდნეობაში მიღწეული სამეცნიერო კვლევითი შედეგები.

ღვარცოფთა შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედებას მდგრადობის კარგვასთან ერთად თან ახლავს სიჩქარის, სიღრმის ხარჯის უწყვეტად ან საფეხურებრივად ცვლილება და თავისუფალი ზედაპირის ტალღის ფორმით ჩამოყალიბების შესაძლებლობები.

ღვარცოფთა მდგრადობის შეფასების და განსაზღვრული მახასიათებლების დაზუსტება და მოვლენასთან მათემატიკური მოდელების ადაპტირება პირველ რიგში ადვილად შესაძლო პროცესების ანალიზზე დაყრდნობით უნდა მოხდეს, მათ შორის კავშირის დამყარება მოვლენასთან მათი ადაპტირებით და შემდეგ თეორიის შექმნით. ღვარცოფთა მოძრაობის დროს ნაკადის მდგრადობის კარგვას შეესაბამება ისეთი თავისუფალი ზედაპირის ფორმები, როცა ნაწილაკთა სიჩქარის ვექტორის ცვლილებას ცოცხალი კვების მიმართ სხვადასხვა კუთხით დახრილი მიმართულება გააჩნია. რიგ შემთხვევებში კუთხის მნიშვნელობა 90° -მდეც გაიზარდოს.

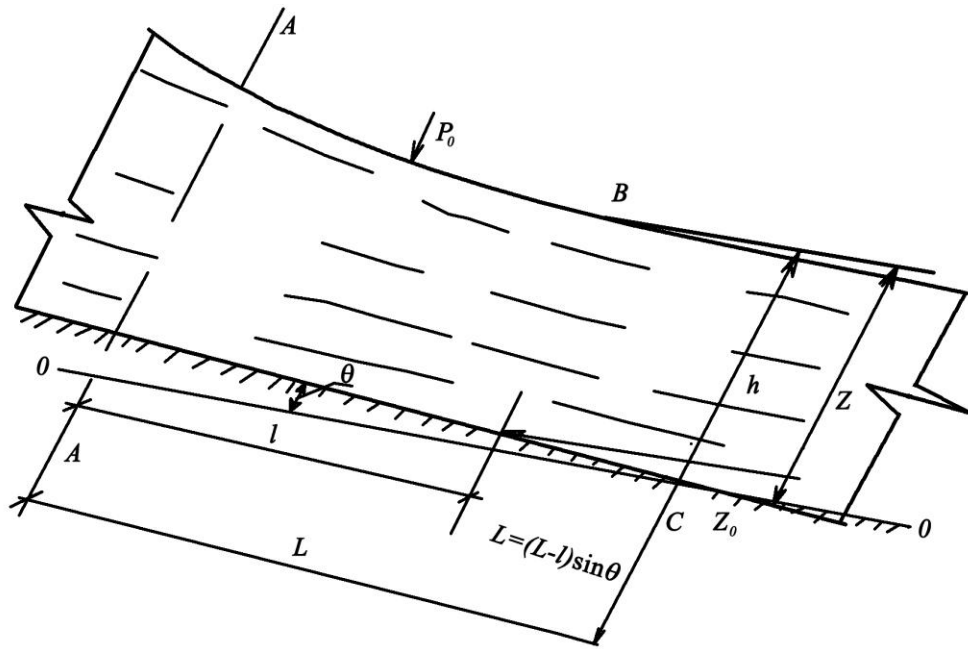
როცა განიხილება წრფივად და არათანაბრად მოძრავი ღვარცოფის მოძრაობა, მისი გრძივი ჭრილის საფუძველზე დინამიკის ქანებში მოდელის საანგარიშო სქემა შემდეგი სახითაა წარმოდგენილი (იხ. ნახ. 4).

როცა საფარდი სიბრტყე გატარებულია C წერტილში და საანგარიშო კვეთი A საფარდი სიბრტყიდან დაცილებულია L მანძილით, ხოლო თავისუფალ ზედაპირზე აღებული B წერტილი – ℓ მანძილით, ნაკადის სრული ენერჯიის სიდიდე B წერტილიდან საფარდი სიბრტყის მიმართ Z შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს ფორმულით:

$$Z = h(1 - h_0/h)\psi + Z_0 = kh + Z_0. \quad (2.3.1)$$

ენერჯიის ცვლილება მოძრაობის მიმართულებით (2.3.1) განტოლებიდან შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს განტოლებით:

$$\frac{d\left(Z + P_0/\gamma + \frac{\alpha V^2}{2g}\right)}{d\ell} = -I. \quad (2.3.2)$$



ნახ. 4. ღვარცოფის მოძრაობის საანგარიშო სქემა

ენერგიის ცვლილება მოძრაობის მიმართულებით (2.3.1) განტოლებიდან შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს განტოლებით:

$$\frac{d\left(Z + P_0 / \gamma + \frac{\alpha V^2}{2g}\right)}{dl} = -I, \quad (2.3.2)$$

სადაც P_0 – ღვარცოფის ზედაპირზე მოქმედი წნევაა და ღია კალაპოტის შემთხვევაში იგი ატმოსფერული წნევის ტოლია (ნ/მ^2);

h – განსაზღვრულ კვეთში ღვარცოფის სიღრმე (მ);

ω – ცოცხალი კვეთის ფართობი (მ^2);

Q – ღვარცოფის ხარჯი ($\text{მ}^3/\text{წმ}$);

q – ღვარცოფის გრძივი ხვედრითი ხარჯი ($\text{მ}^2/\text{წმ}$);

V – ღვარცოფის საშუალო სიჩქარე ($\text{მ}/\text{წმ}$);

I – ჰიდრავლიკური ქანობი.

ღვარცოფებისათვის B წერტილის Z კოორდინატის სრულ დაწნევას საფარდ სიბრტყესთან, ნიუტონური სითხეებისგან განსხვავებით, შემცირებული მნიშვნელობა გააჩნია და მისი სიდიდე, როცა ბმულობის ეკვივალენტური სიღრმე h_0 -ის ტოლია, შინაგანი ხახუნის მნიშვნელობა მის φ კუთხესთან

კავშირში $\varphi = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$ მნიშვნელობის არის, წარმოდგენილი კოორდინატი Z სიდიდის მნიშვნელობა:

$$Z = h(1 - h_0/h)\varphi + Z_0 = kh + Z_0; \quad (2.3.3)$$

შესაბამისად, სადინარის i ქანობის შემთხვევაში, როცა $\left(1 - \frac{h_0}{h}\right)\varphi = K$

$$\frac{dZ}{dh} = K \frac{dh}{dh} - i; \quad (2.3.4)$$

ნაკადის თავისუფალ ზედაპირზე რადგან წნევის სიდიდე ატმოსფერული ტოლია და მისი მნიშვნელობა არ იცვლება

$$\frac{d(P/\gamma)}{dh} = 0; \quad (2.3.5)$$

პირველი განტოლების (2.3.3) წევრისათვის, როცა კალაპოტი არაპრიზმატულია დინების მიმართულებით, ექნება სახე

$$\frac{d\left(\frac{\alpha V^2}{2g}\right)}{dh} = \frac{\alpha Q^2}{2g} \cdot \frac{d\left(\frac{1}{K^2 \omega^2}\right)}{dh}, \quad (2.3.6)$$

$$\frac{d\left(\frac{\alpha V^2}{2g}\right)}{dh} = -\frac{\alpha Q^2}{g \omega^3 K^2} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial h} - \frac{\alpha Q^2}{g} \frac{1}{K^2} \frac{B}{\omega^3} \frac{dh}{dh}. \quad (2.3.7)$$

(2.3.7), (2.3.4) და (2.3.5)-ის გათვალისწინებით (2.3.2)-ში მივიღებთ:

$$-I = -i + K \frac{dh}{dh} - \frac{\alpha Q^2}{K^2 g \omega^3} \frac{\partial \omega}{\partial h} - \frac{\alpha Q^2}{g} \frac{1}{K^2} \frac{B}{\omega^3} \frac{dh}{dh}. \quad (2.3.8)$$

(2.3.8) გარდაქმნებისა და გამარტივების საფუძველზე

$$\frac{dh}{dh} = \frac{1}{K} \frac{i - I + \frac{\alpha Q^2}{g \omega^3 K^2} \frac{\partial \omega}{\partial h}}{1 - \frac{\alpha Q^2 \beta}{g \omega^3 K^3}}. \quad (2.3.9)$$

I – სიჩქარის წინააღმდეგობის კოეფიციენტის განსაზღვრის მიზნით თუ გამოვიყენებთ გასაშუალოებული პარამეტრებით შერჩეულ კვეთებს შორის თანაბარი მოძრაობის ფორმულას:

$$I = \frac{Qv}{g\omega H^2 f(\beta)}. \quad (2.3.10)$$

(2.3.10)-ს გათვალისწინებით (2.3.9) გამოსახულებაში, მივიღებთ:

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{1}{K} \frac{i - \frac{Qv}{g\omega H^2 f(\beta)} + \frac{\alpha Q^2}{g\omega^3 K^2} \frac{\partial \omega}{\partial \alpha}}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g\omega^3 K^3} \frac{B}{K^3}}. \quad (2.3.11)$$

პრიზმატული კალაპოტების შემთხვევაში $\frac{\partial \omega}{\partial \ell} = 0$, შესაბამისად:

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{1}{K} \frac{i - \frac{Qv}{g\omega H^2 f(\beta)}}{1 - \frac{vQ^2}{g\omega^3 K^3} \frac{B}{K^3}}. \quad (2.3.12)$$

თანაბარი მოძრაობის შემთხვევაში $\frac{dh}{dx} = 0$

$$i = \frac{Qv}{g\omega H^2 f(\beta)} = 0. \quad (2.3.13)$$

შესაბამისად, თანაბარი მოძრაობის საშუალო სიჩქარე

$$V = \frac{gH^2 f(\beta) i}{v}. \quad (2.3.14)$$

(2.3.14) საანგარიშო დამოკიდებულებაში $f(\beta)$ ფუნქციის მნიშვნელობას

$$f(\beta) = (1 - \beta)^2 \left(1 + \frac{1}{2} \beta \right). \quad (2.3.15)$$

რეალურად სადინარებში მოძრაობა ცვლადი ხარჯით ხდება. ენერგიის განტოლების ანალოგიურად თუ წარმოვადგენთ ქვემოთ მოყვანილ განტოლებას

$$E = Z + hK + \frac{\alpha V^2}{2g}. \quad (2.3.16)$$

ნაკადის სრული ენერგიის ცვლილება მოძრაობის მიმართულებით შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს განტოლებით

$$\frac{dE}{d\ell} = \frac{dZ}{d\ell} + K \frac{dh}{d\ell} + \frac{1}{2gK^2} \left(2d\omega^{-2} \frac{dQ}{d\ell} - 2Q^2 \omega^3 \frac{d\omega}{d\ell} \right). \quad (2.3.17)$$

თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ

$$\frac{dE}{d\ell} = -I, \quad \frac{dZ}{d\ell} = i, \quad \frac{dQ}{d\ell} = q, \quad \frac{d\omega}{d\ell} = \frac{d\omega}{dh} \frac{dh}{d\ell}, \quad dh = B \frac{dh}{d\ell}$$

(2.3.17) განტოლებას ექნება სახე:

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{1}{K} \frac{i - I - \frac{\alpha Q}{\omega^2 K^2 g} \frac{\partial Q}{\partial \ell}}{1 - \frac{\alpha Q^2 \beta}{g \omega^3 K^3}}. \quad (2.3.18)$$

წინააღმდეგობის ქანობს თუ გამოვსახავთ (2.3.14) ფორმულის საფუძველზე, (2.3.18) ფორმულას ექნება სახე:

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{1}{K} \frac{i - \frac{Qv}{g \omega h^2 f(\beta)} + \frac{\alpha Q^2}{K^2 \omega^2 g} \frac{dQ}{d\ell}}{1 - \frac{\alpha Q^2}{q K^3 \omega^3}}. \quad (2.3.19)$$

(2.3.20) განტოლება წარმოადგენს ბმული ღვარცოფის არათანაბარ მოძრაობას განტოლების ცვლადი ხარჯის შემთხვევაში. როცა ხარჯის ცვლილება არ ხდება მოძრაობის მიმართულებით და მოძრაობა თანაბარი რეჟიმით ხდება მოძრაობის საშუალო სიჩქარე

$$V = \frac{gh^2 f(\beta) i}{v}, \quad (2.3.20)$$

როცა ხარჯი მუდმივია $\frac{dQ}{d\ell} = q$ და

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{1}{K} \frac{i - \frac{Qv}{g \omega h^2 f(\beta)} - \frac{\alpha Q q}{K^2 \omega^2 g}}{1 - \frac{\alpha Q^2}{q \omega^3} \frac{B}{K^3}}. \quad (2.3.21)$$

როგორც მიღებული დიფერენციალური განტოლებების ნიუტონური სითხეებისგან განსხვავებული სახე გვიჩვენებს, აქაც მათი მრიცხველი და მნიშვნელი ნიშანცვლადი ფუნქციებით არის წარმოდგენილი.

როცა ღვარცოფის ხარჯი მიღებულია მუდმივად, ასეთ შემთხვევაში ხარჯის მახასიათებელი – მოდულური კოეფიციენტი და კინეტიკურობის პარამეტრი Π_k ხარჯის მახასიათებელ პარამეტრებთან არის დაკავშირებული. აქედან გამომდინარე ნაკადის ცოცხალი კვეთი, სველი პერიმეტრის,

სიგანის, ჰიდრავლიკური რადიუსის და სიჩქარის C წინააღმდეგობის კოეფიციენტის ფუნქციას წარმოადგენს. მოძრაობის მიმართულებით ეს მახასიათებლები განიცდის ცვალებადობას ნაკადის სიღრმის ცვლილების გამო. საყურადღებოა, რომ ნაკადის h სიღრმის ცვალებადობის და კინეტიკური კოეფიციენტმა შეიძლება მიიღოს ისეთი მნიშვნელობები, რომ დიფერენციალური განტოლების მარჯვენა ნაწილის მრიცხველის და მნიშვნელის მნიშვნელობები გახდეს 0-ის ტოლი. სადინარების კალაპოტების დადებითი ქანობის დროს, როცა მრიცხველი 0-ის ტოლია $i_c - \frac{Q^2}{K} = 0$, $\frac{dh}{dl} = 0$, რასაც შეესაბამება ნაკადის სიღრმის მუდმივობას სადინარის კალაპოტის მოძრაობის მიმართულებით. ე.ი. თანაბარი მოძრაობა და $h = h_0 - i$; რასაც ადასტურებს თანაბარი მოძრაობის საანგარიშო ფორმულები, საშუალო სიჩქარის განზოგადებულ სახეს ღვარცოფის რეოლოგიის გათვალისწინებით.

სადინარის ნულოვანი ქანობის შემთხვევაში, მრიცხველის 0-თან ტოლობის დროს, როცა ხარჯი $Q = 0$ -ს ან ხარჯის კოეფიციენტი უსასრულოდ დიდია, ასეთ შემთხვევაში სიღრმეც უსასრულოდ დიდია და ორივე პირობის ასეთ შემთხვევაში გამოიყენება დაუშვებელია. როცა სადინარის ქანობი $i < 0$ -ზე ასეთ შემთხვევაში მახასიათებელი უარყოფითი მნიშვნელობით ხასიათდება და მოკლებულია რეალობას. თუ დიფერენციალური განტოლების მარჯვენა ნაწილის მნიშვნელი 0-ის ტოლია ე.ი. როცა $\Pi_k = 1$ და $h = \ell_k$ -ს, ასეთ შემთხვევას შეესაბამება პირობა: არათანაბრად მოძრავი ღვარცოფის თავისუფალი ზედაპირი კვეთს კრიტიკული სიღრმის ხაზს 90° კუთხით, რასაც შეესაბამება დენის წირების სიმრუდის არსებითად გაზომვა და ნაკადი ხდება მკაცრად არათანაბარი. თუ ეს გადაკვეთა მიმდინარეობს სიღრმის შემცირებით $h_0 > h_k$ -დან $h < h_k$ -მდე, დინება იღებს წყალვარდნის სახეს ან მოძრაობა ჰიდრავლიკური ნახტომის ფორმით ხდება.

ღვარცოფის სიღრმის სადინარის დინების მიმართულებით ცვალებადობა შეიძლება იყოს როგორც დადებითი, ისე უარყოფითი. დინების მიმართულებით სიგრძის ნაზრდი dl ყოველთვის დადებითია. სიღრმის

ნაზრდის dh -ის ცვლილება ნაკადის სიღრმის ფუნქციას წარმოადგენს. არათანაბარი მოძრაობის შემთხვევაში როცა ნაკადის სიღრმის ნაზრდის სიდიდე $dh = h_2 - h_1 > 0$. ასეთ შემთხვევაში $\frac{dh}{d\ell} > 0$ და ადგილი აქვს მოძრაობის მიმართულეებით სიღრმის გაზრდას და ხდება ღვარცოფის შეტბორვა, ხოლო $\frac{dh}{d\ell} < 0$ შებრუნებული პროცესის დროს მოძრაობის მიმართულეებით ხდება ნაკადის სიღრმის შემცირება.

2.4. ფორმირებული ღვარცოფის ცვლადი ხარჯით მოძრაობა

ღვარცოფწარმომქმნელი კერიდან ფორმირებული ღვარცოფული მასის დაძვრის პროცესი და მოსალოდნელი ხარჯის პროგნოზი რთულ ამოცანათა კატეგორიას განეკუთვნება. როცა ცნობილია ხარჯი და ნაკადის ენერგეტიკული მახასიათებლები, ღვარცოფსარეგულაციო ღონისძიებათა შერჩევა სირთულეს არ წარმოადგენს.

უკანასკნელ პერიოდში გარემოზე ღვარცოფთა გახშირებულმა ზემოქმედებამ ინტენსიური ხასიათი მიიღო. გამოიკვეთა ღვარცოფწარმომქმნელ კერებში ფორმირებული ღვარცოფული მასის დაძვრისა და ობიექტებზე ზემოქმედების შემთხვევები. პროცესი, რომელიც ღვარცოფის კერიდან მოძრაობის დაწყებას შეესაბამება, ძალზე რთულია. აღნიშნულთან ერთად, რთულია კერიდან დაძვრული ღვარცოფული მასის მოცულობისა და ხარჯის პროგნოზირება. როცა კერიდან დაძვრული ღვარცოფული მასის ხარჯის შესაძლო სიდიდე ცნობილია, ასეთ შემთხვევაში ნაკადის სარეგულაციო ღონისძიებათა შერჩევა სირთულეს არ წარმოადგენს. მართალია ღვარცოფული პროცესების შეფასება რთულ ამოცანათა კატეგორიას განეკუთვნება, მაგრამ მათი განთავსება შესაძლებელია ერთგანზომილებიან ამოცანათა ჩარჩოში. ზემოაღნიშნულით ღვარცოფული პროცესების ერთგანზომილებიანი მოდელის აღწერის დროს, ერთი მხრივ, მართალია, ნაწილობრივ

მცირდება მიღებული შედეგების სიზუსტე, მაგრამ მეორე მხრივ იზრდება ოპერატიული საშუალებებით საანგარიშო დამოკიდებულებების გამოყვანის შესაძლებლობები. როგორც მიღებული შედეგების გამოყენების პრაქტიკა ადასტურებს, ასეთი გზით შექმნილი მოდელების პროცესთან ადაპტაცია საკმარისი სიზუსტით პასუხობს გარემოს დაცვის მოთხოვნებს.

როგორც ღვარცოფული პროცესების შესწავლის სტატისტიკა ადასტურებს, კერებიდან მოძრაობის დაწყება უწყვეტი დინამიკური ან მონოკლინური ტალღის ფორმით ხდება. ტალღის ფორმით ღვარცოფის მოძრაობის შემთხვევებს შეესაბამება ნაკადის ჰიდრავლიკური და ჰიდროლოგიური პარამეტრების უწყვეტი ან საფეხურისებრი ცვალებადობა, რასაც თან ახლავს ენერგეტიკული მახასიათებლების, კერძოდ, ხარჯის, სიჩქარის, დონეების თანდათანობითი ზრდის, შემცირების, ნახტომისებრი ცვლილების ან ტალღისებრი მოძრაობის შემთხვევები.

ღვარცოფის ტალღის ფორმით მოძრაობის ჩამოყალიბება, ნებისმიერი შემთხვევის დროს, კერაში ღვარცოფწარმოქმნილი მასის წონასწორული მდგომარეობის რღვევასთან, სატრანზიტო ზონაში წარმოქმნილი შემხვედრი წინააღმდეგობების ხერგილების გარღვევასთან ან სხვა გარეგანი ძალების ზემოქმედების შედეგად გამოწვეულ იმპულსებთან არის დაკავშირებული.

უწყვეტი ტალღის ფორმით ღვარცოფის მოძრაობას მაშინ აქვს ადგილი, როცა ნაკადის მოძრაობის ერთი სტაციონარული მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლა მდორედ მიმდინარეობს. მოძრაობის პროცესის ასეთი სახით განვითარება კვაზი-სტაციონარულ მოვლენას შეესაბამება და მას მაშინ აქვს ადგილი, როცა გრავიტაციული ძალების წინააღმდეგობის ძალებით გაწონასწორება თანდათანობით ხდება.

კერაში ჩამოყალიბებული ღვარცოფული მასის დამაბული მდგომარეობის დარღვევა მისი ტანის წონასწორული მდგომარეობის გარკვეულ ფაზას შეესაბამება და შემადგენელი კომპონენტების ურთიერთ თანაფარდობის გარკვეულ ზღვრებთან არის დაკავშირებული. შესაბამისად, წონასწორობის დარღვევა და მოძრაობის დაწყება აქტიური განივი ძალის

სიდიდესთან, ხოლო მოძრაობის დინამიკა ღვარცოფის მასის ფორების წყლით შევსებასთან, კაპილარულ ტენთან, ეფექტურ ხარჯთან და ბმულობის ძალებთან არის დაკავშირებული. შესაბამისად, ღვარცოფწარმომქმნელი მასის დაძაბული მდგომარეობის შესწავლა გრუნტების მექანიკის ამოცანების ანალოგიურად შეიძლება იქნეს განხილული. როცა ცნობილია ღვარცოფწარმომქმნელი მასის სიმკვრივე ρ , სიმძიმის ძალის აჩქარება g , შინაგანი ხახუნის კუთხე φ , შეჭიდულობის Pe წნევის ეკვივალენტური სიღრმე h' ღვარცოფწარმომქმნელი მასის სიმაღლე H , განივი წნევის ინტენსივობა P და ბმულობა C აქტიური წნევის სიდიდე

$$P = \rho g (H + h') \gamma g^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - Pe; \quad (2.4.1)$$

როცა შეჭიდულობის წნევის მნიშვნელობა $Pe = \gamma h' = \rho g h'$, შეჭიდულობის ეკვივალენტური სიღრმე $h' = \frac{C}{\rho g \gamma \varphi}$ აქტიური წნევის მნიშვნელობა

$$P = \rho g H \gamma g^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2C \gamma g^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right). \quad (2.4.2)$$

დაძაბულობის პრინციპიდან გამომდინარე, ბმულ ღვარცოფწარმომქმნელ მასაში აქტიური წნევის გავლენა ზღვრულ წინააღობაზე მისი ზედაპირიდან გარკვეულ სიღრმეზე იწყება. აქედან გამომდინარე, როცა $P = 0$, $H = h_0$, შესაბამისად:

$$h_0 = \frac{2C}{\gamma g \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}, \quad (2.4.3)$$

თუ შემოვიღებთ აღნიშვნას $\gamma g^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = \varphi$, მაშინ აქტიური წნევით გამოწვეული სიდიდე

$$P = \gamma H \left(1 - \frac{h_0}{H} \right) \varphi, \quad (2.4.4)$$

ხოლო აქტიური წნევით გამოწვეული დაწნევა:

$$\frac{P}{\gamma} = H \left(1 - \frac{h_0}{H} \right) \varphi, \quad (2.4.5)$$

აქტიური წნევიდან გამომდინარე, მისი შესაბამისი განივი ძალის სიდიდე

$$P = \frac{\gamma H^2}{2} \left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^2 \varphi^2. \quad (2.4.6)$$

აქტიური P ძალა ღვარცოფული მასის წონასწორული მდგრადობის რღვევის ძალას წარმოადგენს და მისი ზემოქმედებით დაძრული ღვარცოფული მასის მოცულობა, როცა კერის სიგანე B -ს ტოლია:

$$W = \frac{P}{\gamma} = \frac{BH^2}{2} \left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^2 \varphi^2, \quad (2.4.7)$$

როცა კერის სიგრძეა L , სიგანე B და სიღრმე H , მაშინ, შესაბამისად, დაძრული მოცულობა

$$BHL = \frac{BH^2}{2} \left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^2 \varphi^2, \quad (2.4.8)$$

შესაბამისად, აქტიური ძალის გავლენის სიგრძე

$$L = \frac{H}{2} \left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \varphi, \quad (2.4.9)$$

კერის აქტიური სიმაღლე

$$H_s = H \left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \varphi. \quad (2.4.10)$$

კერაში ღვარცოფული მასის წონასწორული მდგომარეობის რღვევა და მოძრაობის დაწყების ხარჯის სიდიდე

$$Q = \frac{W}{t}, \quad (2.4.11)$$

(2.4.11)-ს გათვალისწინებით (2.4.18)-ში მივიღებთ:

$$Qt = \frac{BH^2}{2} \left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^2 \varphi^2. \quad (2.4.12)$$

ღვარცოფწარმომქმნელი კერის ერთეული სიგანისა და სიგრძის ფარდობის შემთხვევაში, $Q = q'_{nc}$ და შესაბამისად,

$$q'_{nc} t = H \left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \varphi. \quad (2.4.13)$$

კავშირი კერიდან შესაძლო ხარჯსა და ინტენსივობას შორის:

$$q'_{nc} = \frac{2Q}{H \left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \varphi} \quad (2.4.14)$$

(2.4.13) განტოლების გადიფერენციალებისას განიხილება შემთხვევა, როცა $q'_{nc} = const$.

$$q'_{nc} dt = \left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \varphi dH, \quad (2.4.15)$$

როცა კერიდან დაძრული ღვარცოფის პორციის წინააღმდეგობის კოეფიციენტი მუდმივი სიდიდეა და $\varphi = 1$ და $h_0 = 0$, მაშინ

$$q'_{nc} = q'_n = \frac{dH}{dt}, \quad (2.4.16)$$

შესაბამისად, (2.4.16)-ს ინტეგრირებით

$$q'_n(t - t_0) = H - H_0, \quad (2.4.17)$$

ხოლო

$$q'_{nc} \left(1 - \frac{h_0}{H}\right) = \varphi q'_n. \quad (2.4.18)$$

თუ (2.4.17)-ს გავითვალისწინებთ (2.4.18)-ში,

$$q'_{nc}(t - t_0) = \left(1 - \frac{h}{H}\right) \varphi (H - H_0). \quad (2.4.19)$$

კერიდან ღვარცოფის ტალღის ფორმით მოძრაობის დაწყების შემთხვევას შეესაბამება (2.4.15) განტოლება, რომელიც შეიძლება შემდეგი სახით იყოს წარმოდგენილი:

$$q'_{nc} \left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \varphi \frac{dH dx}{dx \cdot dt} = \left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \varphi V_B \frac{dH}{dx}. \quad (2.4.20)$$

თანაბარსტაციონარული რეჟიმით მოძრაობის დროს ღვარცოფის ხარჯი მისი სიღრმის ფუნქციას წარმოადგენს. უწყვეტი ტალღის ფორმით მოძრაობის შემთხვევაში ტალღის სიჩქარე უწყვეტობის პირობიდან გამომდინარე, საშუალო \bar{V} სიჩქარის მნიშვნელობაზე 3-ჯერ დიდია და შესაბამისად (2.4.20) განტოლებას შემდეგი სახე ექნება:

$$q'_{nc} = 3 \left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \varphi \bar{V} \frac{dH}{dx} = H - H_0. \quad (2.4.21)$$

შვედოვ-ბინგამის განზოგადებული მოდელის საფუძველზე

$$\bar{V} = \frac{\eta H^2}{3\mu} \left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^2 \varphi \left(1 + \frac{1h_0}{2H}\right). \quad (2.4.22)$$

თუ (2.4.22)-ს გავითვალისწინებთ (2.4.21)-ში, მაშინ მივიღებთ:

$$q'_{nc} = \left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^3 \varphi^2 \frac{\eta H^2}{\mu} \left(1 - \frac{1h_0}{2H}\right) \frac{dH}{dx}. \quad (2.4.23)$$

(2.4.23) განტოლების გამარტივებისა და გარდაქმნების საფუძველზე,

როცა $\beta = \frac{h_0}{H}$ და $f(\beta) = \left(1 - \beta\right)^2 \left(1 + \frac{1h_0}{2H}\right) \varphi$, მივიღებთ:

$$q'_{nc} = \frac{giH^2}{\nu} \left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \varphi f(\beta) \frac{dH}{dx}. \quad (2.4.24)$$

კონკრეტული ტალღისათვის, როცა $0x$ ღერძი ემთხვევა ღვარცოფის მოძრაობის მიმართულუბას, (2.4.24) განტოლების ინტეგრირებით მივიღებთ:

$$\frac{(H^3 - H_0^3) \left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \varphi f(\beta) gi}{\nu} = q'_{nc} (x - x_0). \quad (2.4.25)$$

მიღებული (2.4.25) განტოლება წარმოადგენს ტალღის თავისუფალი ზედაპირის განტოლებას Hx სიბრტყეში. თუ ნაკადის H სიღრმის სიდიდეს განვსაზღვრავთ (2.4.24) დამოკიდებულებით, გვექნება:

$$\left[H_0 + \frac{q'_{nc}(t-t_0)}{\left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \varphi} \right]^3 = H_0^3 + \frac{q'_{nc} (x - x_0) \nu}{g i f(\beta) \left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \varphi}. \quad (2.4.26)$$

თუ (2.4.24) ტოლობიდან გამოვრიცხავთ H_0 -ს, მაშინ შეიძლება t დროში განისაზღვროს H -ის სიდიდე და ტალღის თავისუფალი ზედაპირის პროფილი აღწერილ იქნეს შემდეგი განტოლებით:

$$H^3 = \left[H - \frac{q'_{nc}(t-t_0)}{\left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \varphi} \right]^3 = \frac{q'_{nc} (x - x_0) \nu}{g i f(\beta) \left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \varphi}. \quad (2.4.27)$$

საწყისი პოზიციიდან ღვარცოფის მოძრაობის დაწყების შემთხვევაში, როცა $x = 0$ და $t_0 = 0$, ტალღების პირველი ოჯახისათვის H -ის სხვადასხვა მნიშვნელობის შემთხვევაში (2.4.25) განტოლებიდან გვექნება:

$$H^3 = H_0^3 + \frac{q'_{nc} x v}{g_{if}(\beta) \left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \varphi}. \quad (2.4.28)$$

ტალღის გავრცელების სიგრძე xt სიბრტყეში შეიძლება განისაზღვროს (2.4.26) განტოლებით:

$$\left[H_0 + \frac{q'_{nc} t}{\left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \varphi} \right]^3 = H_0^3 + \frac{q'_{nc} x v}{g_{if}(\beta) \left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \varphi}. \quad (2.4.29)$$

ტალღის ზედაპირის პროფილი, როცა $x = 0$ და $t = 0$, განისაზღვრება (2.4.27) განტოლებით:

$$H^3 = \left[H - \frac{q'_{nc} t}{\left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \varphi} \right]^3 + \frac{q'_{nc} x v}{g_{if}(\beta) \left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \varphi}. \quad (2.4.30)$$

დროის შემდგომ მომენტში, როცა $x = 0$ და $H_0 = 0$ (2.4.25) განტოლებით განისაზღვრება ტალღის ზედაპირის პროფილი:

$$H_0^3 = \frac{q'_{nc} x v}{g_{if}(\beta) \left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \varphi}, \quad (2.4.31)$$

ხოლო ტალღის გავრცელების სიგრძე – (2.4.26) განტოლებით:

$$t = t_0 + \sqrt[3]{\frac{x v \left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^2 \varphi^2}{q'^2_{nc} g_{if}(\beta)}}. \quad (2.4.32)$$

ზემოთ მიღებული შედეგებითა და საანგარიშო დამოკიდებულებებით შესაძლებელია პირველი მიახლოებითი ანალიზი გავუკეთოთ კერებიდან ღვარცოფთა ფორმირების პროცესს.

გამოყენებული მეთოდოლოგიითა და მიღებული (2.4.27) განტოლებით შესაძლებელია მიკროღვარცოფების ჩამოყალიბების პროგნოზირება.

ტალლის პირველი ოჯახისათვის, როცა $t = 0$ და $x = 0$, ტალლის გავრცელების სიგრძე შეიძლება აღწერილ იქნეს (2.4.30), ხოლო მიკროტალლების შემთხვევები xt სიბრტყეში, როცა $H_0 = 0$, $x = 0$ და $t_0 = 0$ – (2.4.32) განტოლებით.

კერაში ჩამოყალიბებული ღვარცოფის მასის მდგრადობის რღვევის შეფასება, როცა დაძაბულობის თეორიაზე დაყრდნობით ხდება მოძრაობის დაწყება და შრის ერთი ნაწილის მეორეზე გადაადგილება მოძრაობის დროს ხარჯის ცვლილების დინამიკა არასტაციონარულია. კერაში არსებული მასის მოძრაობის მათემატიკური მოდელი, რომელიც მისი H სიღრმის h -მდე ვარდნას შეესაბამება, შეიძლება განისაზღვროს აქტიური ძალით ფორმირებული ღვარცოფის დაკავშირებით მდგრადობის მახასიათებლებთან.

კერაში ჩამოყალიბებული ღვარცოფული მასის მრავალკომპონენტინობისა და გეოგრაფიული ფაქტორების განსხვავებული ზემოქმედების გამო ცვალებადია აქტიური განივი ძალით ფორმირებული ხარჯის სიდიდე.

დაძვრის პროცესის შესწავლისა და ძვრის ზედაპირის არასწორხაზოვანი ფორმით წარმოჩენის შემთხვევაში, აქტიური გავრცელების სიგრძე რეოლოგისთან კავშირში, წარმოდგენილია (2.4.29) დამოკიდებულებით.

ტალლის ზედაპირის პროფილის (2.4.25) განტოლების გამოყენების შემთხვევაში, როცა საწყისი პირობების მახასიათებლები 0-ის ტოლია და შესაბამისად მისი სიღრმის ცვლილება ხარჯის ცვლილების ინტენსივობასთან კავშირში (2.4.28) დამოკიდებულებით არის წარმოდგენილი, დაძვრული მასის ხარჯი, როცა კერის სიმაღლე H_k -ს ტოლია, განისაზღვრება დამოკიდებულებით:

$$Q = \frac{gi \left(1 - \frac{h_0}{H_k} \right) \varphi f(\beta) H_k^3}{L} . \quad (2.4.33)$$

ტალლის ზონაში კუთრი ენერჯის შესაფასებლად შერჩეული კვეთების შემთხვევაში კუთრი ენერჯის დანაკარგი ღვარცოფის რეოლოგიური მახასიათებლების ფუნქციას წარმოადგენს.

ღვარცოფული მასის ხარჯის სიდიდე კერის H_k სიღრმიდან h ცვლილების შემთხვევაში კავშირში სიღრმეებს შორის შეიძლება წარმოდგენილი იყოს დამოკიდებულებით:

$$h = \frac{4H_k}{\left[2 + \left(1 - \frac{h_0}{H_k}\right)\varphi\right]^2} . \quad (2.4.34)$$

დამოკიდებულებით მიღებული ნაკადის h სიღრმე მანამდე რჩება მუდმივი, სანამ იგი გამოხატულად არ დაბრუნდება უკან დაძვრის კვეთაზე. (2.4.34) დამოკიდებულების (2.4.33) დამოკიდებულებაში გათვალისწინებით:

$$Q = \frac{gi\left(1 - \frac{h_0}{h}\right)\varphi(\beta)\left[1 + \left(1 - \frac{h_0}{H}\right)\varphi\right]^6 h^3}{L} . \quad (2.4.35)$$

მიღებული ხარჯის საანგარიშო დამოკიდებულების საფუძველზე, როცა კერის სიღრმე H_k -ს ტოლია სიმძლავრე შეიძლება განისაზღვროს:

$$N = \gamma Q H_k = \frac{4\gamma gi\left(1 - \frac{h_0}{h}\right)\varphi(\beta)\left[1 + \left(1 - \frac{h_0}{H}\right)\varphi\right]^6 \left[2 + \left(1 - \frac{h_0}{h}\right)\varphi\right]^2 h^4}{L} . \quad (2.4.36)$$

მიღებული (2.4.36) დამოკიდებულებით შესაძლოა კერებში დაგროვილი ღვარცოფული მასის სრული სიმძლავრის განსაზღვრა რეოლოგიურ მახასიათებლებთან კავშირში.

თავი 3. ფორმირებული ღვარცოფის მდგრადობა

3.1. კერაში ფორმირებული ღვარცოფის მდგრადობის

შეფასების მათემატიკური მოდელები

ნატანით გაჯერებული ჰიპერკონცენტრირებული მაღალი სიმკვრივის ღვარცოფების ფორმირება ეროზიულ ღრანტეებში ხდება, რომელიც სათავეებში კალაპოტთა სისტემით არის წარმოდგენილი და მათი შევსება ზემოთ მდებარე მთის ქანების მდგრადობის კარგვითაა გამოწვეული. ღვარცოფსადინარებში ღვარცოფთა ფორმირება შესაძლებელია აგრეთვე წყალშემკრები აუზის გაშიშვლებულ ფერდობებზე ატმოსფერული ნალექების ზემოქმედებით.

ღვარცოფის მდგრადობის დაკარგვა კერაში და პროცესების შეფასება, მოვლენის სირთულის გამო, კვაზი-ერთგვაროვნობიდან გამომდინარე, ეფუძნება გამარტივებული მეთოდების გამოყენებას. იგი ითვლება მოხერხებულ და უმარტივეს მეთოდად და როგორც შემადგენელი კომპონენტების ფიზიკური სიდიდეების შეფასების დროს, ასევე ჯერ კიდევ შედგენის სტადიაზე გამოსაყენებელი განტოლებების შემადგენელი ფაქტორების გასაშუალოების შემთხვევაში ღვარცოფის მოდელი ასეთ პირობებში განიხილება როგორც კვაზი-ერთგვაროვანი, ხოლო მოძრაობის აღწერა ერთგანზომილებიანი განტოლებების გამოყენებით არის შესაძლებელი.

ღვარცოფთა დინამიკისა და მათი შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების შეფასების პრინციპებიდან გამომდინარე, პირველი მიახლოებით, აუცილებელია ანალიზი არა მხოლოდ მათი გავლის შედეგებზე, არამედ მდგრადობის კარგვის შესაძლებლობებზე. კერებიდან ფორმირება ან სადინარში შემხვედრი წინააღმდეგობებით მდგრადობის დაკარგვა შესწავლილ უნდა იქნეს ინოვაციური მიდგომებით [89, 90, 91, 92].

ღვარცოფთა მდგრადობის საკითხების შესწავლა როგორც ნიუტონური, ისე არანიუტონური მოდელების განხილვისას, შეიძლება ჩაითვალოს

ხარჯის განსაზღვრის მეთოდულად, რაც ღვარცოფწარმომქმნელი მასის დაძაბულობის შესაძლებლობებთან არის დაკავშირებული.

ღვარცოფწარმომქმნელ კერებში ეროზიული ღრანტეებიდან ან ხელოვნურად შექმნილი მიწის კაშხლების რღვევის შრეობრივად ან მთლიანი მასივის სახით ფორმირება მცურავი ზედაპირების დაძაბულ მდგომარეობასთან და გარე ძალების ან წონის მოქმედებით შესაძლებლობებთან არის დაკავშირებული. ღვარცოფწარმომქმნელ მასაში გარე ძალების განაწილება როგორც თვისობრივად, ისე რაოდენობრივად, ამ უკანასკნელის მცურავი ზედაპირის ფართობზე, ფორმაზე, სიხისტეზე და შემადგენელი კომპონენტების ურთიერთთანაფარდობაზეა დამოკიდებული. ღვარცოფწარმომქმნელი მასის დაძაბულობა, ზემოთ აღნიშნულთან ერთად, ჩამოყალიბების გენეზისთან და ფაზური შემადგენლობით შეიძლება იყოს განპირობებული. წარმოდგენილი გარემოებები მკვეთრად ასხვავებს ღვარცოფებს მყარი სხეულებისაგან და დაძაბულობის წარმოქმნის შესაძლებლობა ნებისმიერი კვეთის ყოველ წერტილშია შესაძლებელი. აღნიშნულიდან გამომდინარე, ღვარცოფთა დაძაბული მდგომარეობის შეფასება შეიძლება განხორციელდეს იმავე მეთოდების გამოყენებით, როგორც ეს მყარ სხეულებში ხდება და განაწილებული ძალები, ძაბვები როგორც უწყვეტი გასაანგარიშებლად აღებული ერთეულოვანი კვეთის ფართობის შერჩეულ წერტილზე. ღვარცოფთა მდგრადობა ფორმირების ადგილებში განიხილება, თუ ის სადინარში ან გამოტანის კონუსებზე ტალღის ფორმით ხორციელდება, რომელთა სახეებიდან ყურადღებას უწყვეტი, დინამიკური და მონოკლინური სახე იპყრობს [93, 94, 95, 96].

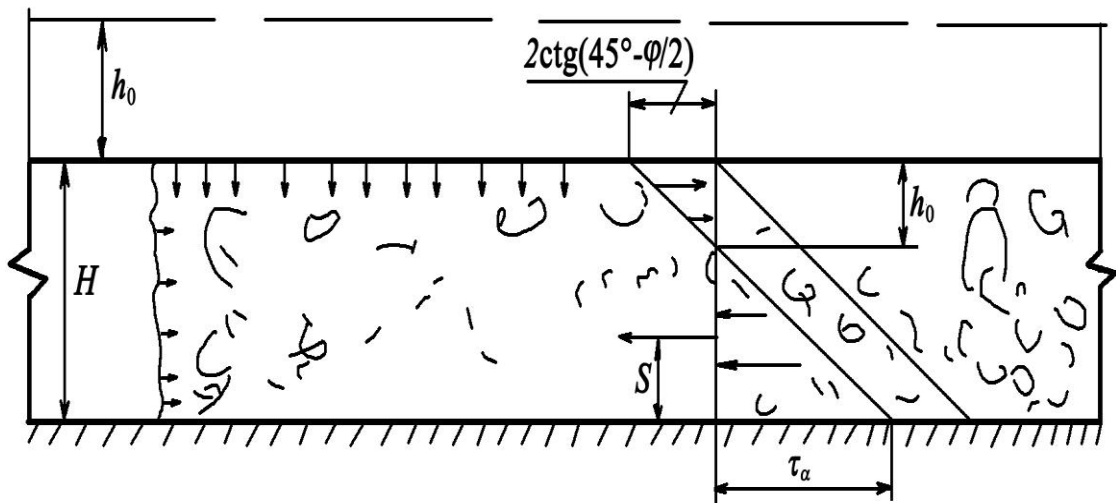
მდგრადობის კარგვის დროს, როგორც დენადმა ტანმა, შეიძლება განიცადოს ჰიდრავლიკური და ჰიდროლოგიური პარამეტრების ცვლილება როგორც უწყვეტი ისე ნახტომისებური სახით. ყველა შემთხვევაში ტალღათა წარმომქმნა შეიძლება გამოწვეული იყოს ღვარცოფსაცავის დაცლით ასევე ხელოვნურად შექმნილი მიწის ნაგებობის გარღვევით ღვარცოფული ტანის მასაში ქვის ჩანართის ზომებისა და ფორმების ფართო

სპექტრით შემხვედრი წინააღმდეგობების არაერთგვაროვნებით და სხვ.

დინების შემთხვევაში ნაკადი მდგრადობას ინარჩუნებს იმ შემთხვევაში როცა შეშფოთება მისი სადინარის საკონტაქტო ზედაპირთან ისეთია, რომ გავლენის ჩაქრობა შემხვედრი ნაწილაკებით ხდება.

ღვარცოფთა საინჟინრო ამოცანების გადაწყვეტის დროს მნიშვნელოვანია მათ კერებში ფორმირებული მასის მდგრადობის კარგვის შესაძლებლობები, მასივის ჩამოშვავების შესაძლებლობა და ჩამომეწყვრა და შესაბამისად მიღებული ხარჯის პროგნოზი. ასეთი შემთხვევების შეფასება შესაძლებელია კერაში განლაგებული ღვარცოფწარმომქმნელი მასის დაძაბულობიდან გამომდინარე.

კერაში დაგროვილი ღვარცოფული მასიდან ხარჯის მიღების მოდელად თუ მივიჩნევთ მდგრადობის რღვევას როგორც უდაწნეო მოძრაობის შედეგს და მას გამოვსახავთ განივი ძალით გამოწვეული ძხები ძაბვის ფუნქციით, აქტიური წნევის გაანგარიშების მოდელი ბმული ღვარცოფწარმომქმნელი მასისათვის შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს ნახაზზე მოცემული სქემის საფუძველზე (ნახ. 5).



ნახ. 5. ბმულ ღვარცოფში აქტიური წნევის საანგარიშო სქემა

ვიხილავთ ღვარცოფული მასის დაძაბულობის მდგომარეობას მისი ტანის ნებისმიერ Z მანძილით დაშორებულ წერტილებში. გვერდითი წნევის განსაზღვრის დროს, როცა მასა ბმულია σ_e ზემოქმედება ყველა

მიმართულებით აქტიური წნევის საწინააღმდეგოდაა მიმართული. როცა მისი მნიშვნელობა C ბმულთან და შინაგანი ხახუნის ψ კოეფიციენტთან და შინაგანი ხახუნის კუთხესთან არის დაკავშირებული $\sigma = C \operatorname{ctg} \varphi$

$$H_0 = \frac{\sigma}{\gamma} = \frac{C \operatorname{ctg} \varphi}{\gamma}. \quad (3.1.1)$$

როცა ჩამომეწყვრის ზედაპირის სადაწნეო მხარე ვერტიკალურია და ღვარცოფწარმოქმნელი მასის ზედაპირი ჰორიზონტალური აქტიური წნევის ინტენსივობა σ_α მის ფუძეზე

$$\sigma_\alpha = \gamma(H + H_0) \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - \sigma = \gamma \left(H + \frac{C \operatorname{ctg} \varphi}{\gamma} \right) \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - C \operatorname{ctg} \varphi. \quad (3.1.2)$$

ბმული ღვარცოფული მასის შემთხვევაში აქტიური ძალის წნევის სიდიდე მის მთელ სიმაღლეზე ბმულობის გამო მცირდება და შესაბამისად მისი მნიშვნელობა

$$\sigma_\alpha = \gamma H \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2C \operatorname{ctg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right). \quad (3.1.3)$$

ბმულობის გამო ღვარცოფული მასის ზედა ნაწილში და ზედაპირზე აქტიური წნევა უარყოფით მნიშვნელობას იღებს და სიღრმის ამ ნაწილზე აქტიური წნევის ზემოქმედება 0-ის ტოლია. ზედაპირიდან ნულოვანი წერტილის h_0 სიღრმეზე მდებარეობის შემთხვევაში $\sigma_\alpha = 0$ და შესაბამისად

$$h_0 = \frac{2C}{\gamma \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)} = \frac{2C}{\gamma \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi} - \operatorname{tg} \varphi \right)}. \quad (3.1.4)$$

აქტიური განივი წნევის სიდიდე სადაც ადგილი აქვს საგრადიენტო შრის გავრცელების შესაძლებლობას

$$\sigma_\alpha = \gamma H \left(1 - \frac{h_0}{H} \right) \psi. \quad (3.1.5)$$

ღვარცოფული მასების ცოცვადობა მაშინ იწყება და განსაკუთრებული სიმწვავეით მაშინ არის მნიშვნელოვანი, როცა ისინი განიცდიან გვერდითი დატვირთვის ზემოქმედებას. ასეთ შემთხვევაში ცოცვადობის პროცესი გაცილებით უფრო ადრეა მოსალოდნელი, ვიდრე ეს მარტო ვერტიკალური

დატვირთვის დროს ხდება.

იმისდა მიხედვით, თუ როგორი ხასიათის დეფორმაციის განვითარებაა მოსალოდნელი, ღვარცოფწარმომქმნელ მასაში მდგრადობის კრიტერიუმების შესაფასებლად ზღვრული წონასწორობის შემთხვევაში ვიყენებთ მხებ და ნორმალურ ძაბვებს შორის დამოკიდებულების შემდეგ კანონზომიერებას

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + C_e + \Sigma_H + C_c, \quad (3.1.6)$$

სადაც τ – მხები ძაბვაა (ნ/მ^2);

σ – ნორმალური ძაბვა (ნ/მ^2);

φ – შინაგანი ხახუნის კუთხე, როცა ტენიანობა W -ს ტოლია;

C_e – ხისტი სტრუქტურული ბმული (ნ/მ^2);

Σ_H – წყალ-კოლოიდური ხასიათის ბმულობა როცა ტენიანობა W -ს ტოლია.

მხებ და ნორმალურ ძაბვებს თუ გამოვსახავთ შესაბამისი ცნობილი ფორმულებით როცა ცოცვითი ზედაპირის დახრის კუთხე α -ს ტოლია

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_2 \sin^2 \alpha \\ \tau &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin^2 \alpha \end{aligned} \right\}. \quad (3.1.7)$$

მე-(3.1.7) დამოკიდებულებაში მდგრადობის პირობა, ძაბვის განაწილების გათვალისწინებით:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} 2 \operatorname{Sin} \cos \alpha = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_2 \operatorname{Sin}^2 \alpha + C.$$

რადგან, როცა $\operatorname{tg}^2 \left(45^\circ \frac{\sigma}{2} \right) = \psi$ -ს ტოლია, ბმული ღვარცოფული მასი-

სათვის მთავარ ძაბვებს შორის ფარდობაა

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) \psi, \quad (3.1.8)$$

ხოლო ბმულობა გამოსახულია $C = \frac{\partial h_0}{2} \sqrt{\varphi}$ ზღვრული წონასწორობის

პირობით

$$\sigma_1 \left(1 - \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right) = \frac{2\phi 10\phi\sigma_1}{2} \left(1 + \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right) + \frac{2\text{Sin}\phi C}{\text{tg}\phi}. \quad (3.1.9)$$

მაბეების სიღრმეზე გავრცელების კანონიდან გამომდინარე და (3.1.3) განტოლების გათვალისწინებით (3.1.4)-ში, გვექნება:

$$\frac{h_0}{H} = \frac{\text{Sin}\phi(1+\psi) - (1-\psi)}{(1-\text{Sin}\phi)\psi - \cos\phi\sqrt{\psi}}. \quad (3.1.10)$$

როცა ღვარცოფწარმომქმნელ კერაში მდგრადობის რღვევის შეფასების კრიტერიუმად ხარჯია მიღებული და მისი განსაზღვრა შვედოვ-ბინგამის მოდელზე დაყრდნობით ხდება, მივიღებთ

$$Q = B \int_H^0 \gamma du, \quad (3.1.11)$$

(3.1.11) განტოლებაში შვედოვ-ბინგამის მოდელის გამოყენებით

$$Q = \frac{BgH^3 i}{6\nu} \left(2 - \frac{3\tau_0}{\rho g H i} \right). \quad (3.1.12)$$

სადაც τ_0 – საწყისი წინააღმდეგობა ძვრაზე (ნ/მ^2);

ν – ღვარცოფის სიბლანტის კინემატიკურობის კოეფიციენტი;

B – ღვარცოფწარმომქმნელი კერის სიგანე (მ.);

ρ – ღვარცოფწარმომქმნელი მასის სიმკვრივე (ნ/მ^3);

i – ღვარცოფწარმომქმნელი კერის ქანობი.

(3.1.12) მოდელის შესაბამისად, ღვარცოფული მასა კარგავს მდგრადობას და იწყებს მოძრაობას პირობების გათვალისწინებით:

$$2 > 3 \frac{\tau_0}{\rho g H i}, \quad (3.1.13)$$

ე.ი.

$$\tau_0 < \frac{2}{3} \tau. \quad (3.1.14)$$

როცა მდგრადობადაკარგული ღვარცოფის მასა მოძრაობს გულით და საგრადიენტო შრით, ე.ი. $\tau_0 = \partial i h_0$, ასეთ შემთხვევაში

$$h_0 < \frac{2}{3} H. \quad (3.1.15)$$

(3.1.11) განტოლებაში შვედოვ-ბინგამის მოდელით მხები ძაბვის ნაკადის სიღრმეზე განაწილების კანონიდან გამომდინარე, როცა საკონტაქტო ზედაპირთან მისი მნიშვნელობა, როცა ღვარცოფის სიღრმე H -ის ტოლია $\tau = \rho i H$, ხარჯის სიდიდე

$$Q = \frac{BgiH^3}{\nu} f, \quad (3.1.16)$$

შესაბამისად

$$f(\beta) = \frac{h_0}{2H} \left(1 - \left(\frac{h_0}{H} \right)^3 \right). \quad (3.1.17)$$

(3.1.16) განტოლებით მოძრაობა უზრუნველყოფილია შემდეგი პირობის გათვალისწინებით

$$\frac{H}{3} \left(1 - \left(\frac{h_0}{H} \right)^3 \right) > \frac{h_0}{2} \left(1 - \left(\frac{h_0}{H} \right)^2 \right), \quad (3.1.18)$$

$$h_0 < 0,9H. \quad (3.1.19)$$

სადინარეში ღვარცოფის მოძრაობის შემთხვევაში იგი დაკავშირებულია ინერციასა და იმპულსთან და ინარჩუნებს მდგრად რეჟიმს. როცა დაცულია ნელცვლადი მოძრაობის რეჟიმი დინამიკური ეფექტების გარეშე. ასეთ შემთხვევაში გრავიტაციული ძალები გაწონასწორებულია წინააღმდეგობის ძალებით. როცა წონასწორობის ეს პროცესი ირღვევა ხდება ნაკადის მდგრადობის დაკარგვა და ტალღების წარმოქმნა.

ბმულ ღვარცოფებში მდგრადობის რღვევას ნაკადის მოძრაობის დროს ადგილი აქვს ისეთ პირობებში, როცა უწყვეტი ერთგანზომილებიანი ტალღის სიჩქარე V_β ჭარბობს დინამიკური ტალღის C სიჩქარეს, რომელიც ვრცელდება ნაკადის თავისუფალ ზედაპირზე, როცა მისი საშუალო სიჩქარე V -ს ტოლია.

არაპრიზმატულ კალაპოტებში ღვარცოფის დაუმყარებელი არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებიდან გამომდინარე თანაბარი მოძრაობის დროს წინააღმდეგობის ქანობისა და სადინარის ქანობის ტოლობის შემთხვევაში საშუალო სიჩქარე

$$V = \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \psi C \sqrt{hi}. \quad (3.1.20)$$

შესაბამისად, ტალღის გავრცელების სიჩქარე

$$C = \sqrt{gh \left(1 - \frac{h_0}{h}\right)} \psi. \quad (3.1.21)$$

ღვარცოფის მდგრადობა გრძივი ტალღის ფორმით მოძრაობის შემთხვევაში ირღვევა ისეთ პირობებში, როცა ტალღის სიჩქარე ჭარბობს მისი საშუალო სიჩქარესა და დინამიკური ტალღის გავრცელების სიჩქარეთა ჯამს

$$V_B > C + V. \quad (3.1.22)$$

ო. ნათიშვილის შრომებით [18, 19] დასაბუთებულია, რომ გრძივი ტალღის გავრცელების სიჩქარე საშუალო სიჩქარეზე 3-ჯერ დიდია ე.ი.

$$3V > C + V. \quad (3.1.23)$$

(3.1.21)-ის გათვალისწინებით (3.1.23)-ში, როცა $\left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \psi = a$

$$3aC \sqrt{h \sin \alpha} > aC \sqrt{h \sin \alpha} + \sqrt{gha}, \quad (3.1.24)$$

ე.ი.

$$2aC \sqrt{h \sin \alpha} > \sqrt{gha}. \quad (3.1.25)$$

ლამინარული მოძრაობის შემთხვევაში სიჩქარის წინააღმდეგობის კოეფიციენტი

$$C = \sqrt{\frac{\text{Re}}{8}} g. \quad (3.1.26)$$

მოძრაობის ქანობი $i = \sin \alpha$, შესაბამისად (3.1.25) უტოლობას ექნება სახე

$$\text{Re} > \frac{1}{2a \sin \alpha} \quad \text{ან} \quad \frac{Vh}{\nu} > \frac{1}{2a \sin \alpha}. \quad (3.1.27)$$

როცა $a = 1$ -ს, მდგრადობის რღვევა მოსალოდნელია უტოლობის შემთხვევაში

$$\frac{Vh}{\nu} > \frac{1}{2 \sin \alpha}. \quad (3.1.28)$$

(3.1.27) უტოლობა შეესაბამება ნაკადის მოძრაობის შემთხვევას მოძრავი ტალღების ფორმით, რომელსაც შეიძლება ჰქონდეს ადგილი ფერდობზე თავსხმა წვიმების დროს. (3.1.27)-ის შეფარდებით (3.1.28)-თან ღვარცოფების მდგომარეობა მის რეოლოგიურ მახასიათებლებთან არის დაკავშირებული და იზრდება რეოლოგიური მახასიათებლების გაზრდის საფუძველზე

$$\text{Re}_c > \text{Re}_H \frac{1}{2 \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \psi} . \quad (3.1.29)$$

3.2. მოძრავი ჰიპერკონცენტრირებული ნაკადის მდგრადობის კრიტერიუმი

მოძრავი ჰიპერკონცენტრირებული ნაკადის გარემოზე ზემოქმედების გააქტიურებისა და განმეორებადობის სიხშირის მნიშვნელოვნად გაზრდის გამო მოვლენის კვლევის თეორიულმა საკითხმა განსაკუთრებული ინტერესი მნიშვნელოვანი აქტუალობის გამო შეიძინა, რომ ისინი წარმოადგენენ კალაპოტური ნაკადების ერთ-ერთ ანომალურ ნაირსახეობას, რომლებისთვისაც სატრანზიტო უბანზე დამახასიათებელია მოძრაობის რეჟიმის, კერძოდ, წყნარიდან მძაფრში გადასვლა ან პირიქით. გადასვლა და ტალღურ დინებაში გადასვლის შესუსტება, ამასთან ერთად, მდგრადობა დაკარგული ნაკადისათვის დამახასიათებელია შემხვედრი წინააღმდეგობების ზემოქმედების განსაკუთრებულობით. ის გამორჩეულია ზემოქმედების განსაკუთრებულობით როგორც კალაპოტურ პროცესებზე, ისე მასში განლაგებული ნაგებობების საიმედოობაზე. კრიტიკულობითაა გამორჩეული სადინართა იმ მონაკვეთებზე, სადაც მათი სატრანზიტო უბნის გადაკვეთა რკინიგზებით, საავტომობილო გზებით, საირიგაციო, წყალმომარაგების მაგისტრალებით და გაზსადენებით ხდება. ზემოთ მოყვანილ შემთხვევაში ღვარცოფის ჰიდრავლიკური რეჟიმის ცვლილებით ხდება თანაბარი მოძრაობის მდგრადობის რეჟიმის დაკარგვა [97, 98, 99, 100].

ტალლის ფორმით მოძრავი ნაკადი მისი წინამორბედისგან ხასიათდება ჰიდროლოგიური და ჰიდრაულიკური მახასიათებლების განსხვავებული მნიშვნელობებით. აქედან გამომდინარე, კალაპოტის მდგრადობისა და დეფორმაციის სიდიდეთა განსაზღვრული პარამეტრები სრულად ვერ აღწერს პროცესის არსს და ვერ იძლევა პრაქტიკისათვის დამაკმაყოფილებელ შედეგებს.

კალაპოტური პროცესების შეფასების ძირითად განმსაზღვრელ კრიტერიუმად ნაკადის საშუალო სიჩქარეა მიჩნეული. კვლევებით დადასტურებულია, რომ ნაკადის თანაბარი მოძრაობის სხვა რეჟიმში გადასვლა და მდგრადობის დარღვევის შედეგად ადგილი აქვს როგორც ტრანსპორტუნარიანობის გაზრდის ან შემცირების შესაძლებლობას, ასევე ხდება ჰიდრაულიკური პარამეტრების მნიშვნელოვანი ცვლილება.

აქედან გამომდინარე, ტალღური ფორმის მოძრავი ნაკადის ძალური ზემოქმედების შესაძლებლობები მნიშვნელოვნად განსხვავებულია არსებულისგან და ამ მიმართულებით კვლევის აუცილებლობა თანამედროვეობის აქტუალურ პრობლემად რჩება.

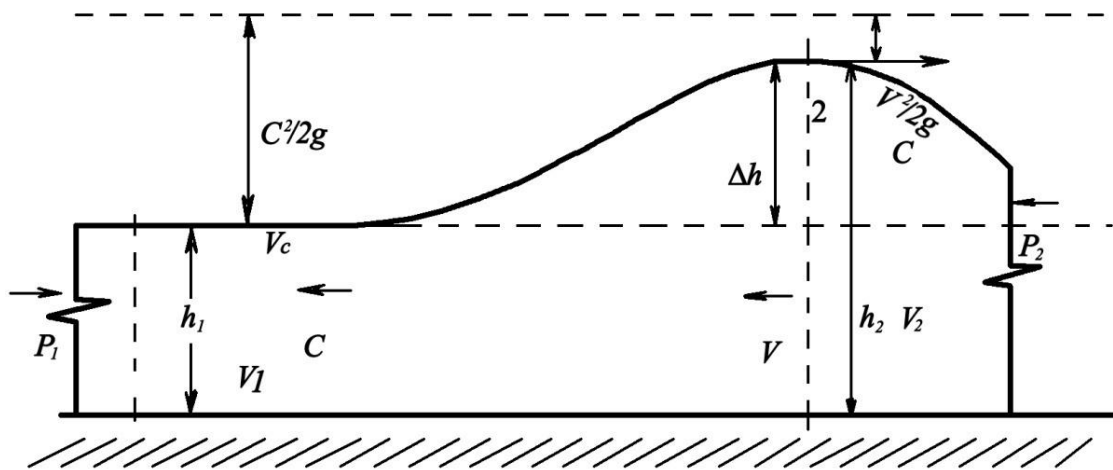
ღვარცოფის თანაბარი მოძრაობის მდგრადობის რღვევა, მის ზედაპირზე ტალღის წარმოქმნა, ჰიდრაულიკური პარამეტრების უწყვეტად და საფეხურებრივად ცვლილება, მრავალი ურთულესი ხასიათის ფაქტორის ზემოქმედებით არის გამოწვეული და ამ პროცესების შესწავლა მოვლენასთან რთული მათემატიკური მოდელების ადაპტირებასთან არის დაკავშირებული.

მდგრადობის რღვევის ზემოთ მოყვანილი შესაძლებლობებიდან, როცა რეჟიმის პროცესის ფორმირება მდორედ მიმდინარეობს, მიღებული ტალღის ფორმა უწყვეტი სახითაა წარმოდგენილი, ხოლო თუ პროცესი უეცრად ხდება, ასეთი სახით ჩამოყალიბებული ზედაპირი დინამიკური სახითაა ცნობილი.

ღვარცოფის ზედაპირზე წარმოქმნილ ტალღას ხშირად მნიშვნელოვანი ამპლიტუდა გააჩნია, რომლის გათვალისწინება გარემოსდაცვით საპროექტო გადაწყვეტილებებში მნიშვნელოვან რეალობას წარმოადგენს.

მის შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ადგილი უკავია ღვარცოფის დამრტყმელი ძალის და რეაქციის ძალით გამოწვეული მოძრაობის ცვლილებას მასის უწყვეტობის პირობებში, როცა მოძრაობა ტალღის ფორმით ხდება.

საკონტროლო მოცულობაში ტალღის ფორმის ღვარცოფის სიჩქარის დადგენა ხდება მე-6 ნახაზზე მოცემული სქემით.



ნახ. 6. ღვარცოფის ტალღის ფორმით გადაადგილების სქემა

ნახაზზე მოცემული სქემის მიხედვით ღვარცოფი, რომლის საკონტროლო კვეთებში სიღრმეები არის h_1 და h_2 , ტალღის ფორმით და V_1 სიჩქარით გადაადგილების შემთხვევაში რაოდენობის ცვლილება შეიძლება შემდეგნაირად იქნეს წარმოდგენილი:

$$\frac{\alpha' \gamma}{g} Q(V_1 - V_2) = P_2 - P_1, \quad (3.2.1)$$

სადაც α' სიჩქარის შემასწორებელი კოეფიციენტი და იცვლება $1,05 \div 1,08$ ფარგლებში;

γ – ღვარცოფის მოცულობითი წონა;

V_1, V_2 – შერჩეულ კვეთებში მოძრავი ნაკადის საშუალო სიჩქარეები (მ/წმ);

P_1, P_2 – შერჩეულ კვეთებში მოქმედი წნევები (ნ/მ²);

Q – ღვარცოფის ხარჯი (მ³/წმ).

ტალღის შერჩეული კვეთების სიჩქარეებს $F = \Delta P t$ ძალის იმპულსის

შემთხვევაში თუ წარმოვადგენთ ცოცხალი კვეთის ფართობებით, როცა კვეთებში წნევის განაწილება ემორჩილება ჰიდროსტატიკის კანონს

$$\frac{\alpha' \gamma Q^2}{g} \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_1 \omega_2} = \Delta P. \quad (3.2.2)$$

პრიზმული სწორკუთხა კვეთის ($\omega = Bh$) კალაპოტისათვის:

$$\frac{\alpha' \gamma}{g} Q^2 \frac{h_2 - h_1}{h_1 h_2} = \Delta P. \quad (3.2.3)$$

საანგარიშო ფორმულის მიხედვით:

$$\Delta h = h_1 - h_2. \quad (3.2.4)$$

ფორმულა (3.2.4)-ის გათვალისწინებით ფორმულა (3.2.3)-ში

$$\frac{\alpha' \gamma}{g} \frac{Q}{\Delta P} = 1 + \frac{h_1}{\Delta h}. \quad (3.2.5)$$

ფარდობა $\frac{\Delta h}{h_1}$ წარმოადგენს ნაკადის გაჭიმვით ბმული ღვარცოფის

ფარდობითი დეფორმაციის სიდიდეს.

ტალღის დასაწყისი შეესაბამება ღვარცოფის გაჭიმვას, ხოლო ბოლო – კუმშვის პროცესს. აქედან გამომდინარე:

$$\frac{\Delta h}{h_1} = \frac{a^3 + 4\sqrt{a}}{4}, \quad (3.2.6)$$

სადაც Δh არის ტალღის სიმაღლე (მ);

h_1 – ნაკადის სიღრმე (მ);

ξ – კოეფიციენტის და შინაგანი ხახუნის კუთხის ფუნქციას წარმოადგენს: $\psi = \left(\sqrt{1 + tg^2 \varphi - tg \varphi} \right)^2$.

(3.2.6) ფორმულის გათვალისწინებით (3.2.5) ფორმულაში, შესაბამისი გარდაქმნებისა და გამარტივებების საფუძველზე გვექნება:

$$\Delta P = \frac{\alpha' \gamma Q V}{g} \frac{a^3 + 4\sqrt{a}}{a^3 + 4\sqrt{a} + 4}. \quad (3.2.7)$$

თუ შემოვიღებთ აღნიშვნას $(1 - h_0 / h_1) = a$, წნევის საანგარიშო დამოკიდებულებებს ექნება სახე:

$$\Delta P = \frac{\alpha' \gamma Q V}{g} \frac{2\sqrt{a} + a}{a + 2\sqrt{a} + 4}, \quad (3.2.8)$$

$$\Delta P = \frac{(a^3 + 4\sqrt{a})(2 + \sqrt{a})^2 - 16}{(a^3 + 4\sqrt{a})(2 + \sqrt{a})^2} \cdot \frac{\alpha' \gamma \omega V^2}{g}.$$

როცა რეოლოგიური მახასიათებლების 0-ის ტოლია, ე.ი. $h_0 = 0$, $\varphi = 0$, მაშინ $a = 1$ და, შესაბამისად, ძალის იმპულსში:

$$\Delta P = 0,644 \frac{\alpha' Q a}{g}. \quad (3.2.9)$$

შემფოთებული ზონის მიმართ გარე ძალის იმპულსში, როცა ნაკადის სიჩქარე V -ს ტოლია:

$$\Delta P = (\rho C V + \rho V^2) \omega, \quad (3.2.10)$$

როცა ნაკადის სიჩქარე $V \gg C$, მაშინ:

$$\Delta P = \rho C V \omega = \rho C V \frac{Q}{V} = \rho C Q. \quad (3.2.11)$$

$$K = \left(1 - \frac{h_0}{h}\right); \quad a = \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \psi; \quad \psi = \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\beta}{2}\right);$$

$$\frac{h_0}{h} = 0 \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) = 1; \quad \varphi = 0; \quad \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\beta}{2}\right) = 1; \quad \psi = 1;$$

$$\frac{h_0}{h} = 0,2; \quad \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) = 0,8; \quad \varphi = 30; \quad \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\beta}{2}\right) = 0,577; \quad \psi = 0,335;$$

$$\frac{h_0}{h} = 0,4; \quad \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) = 0,6; \quad \varphi = 45; \quad \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\beta}{2}\right) = 0,41; \quad \psi = 0,175;$$

$$\frac{h_0}{h} = 0,6; \quad \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) = 0,4; \quad \varphi = 60; \quad \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\beta}{2}\right) = 0,26; \quad \psi = 0,07;$$

$$\frac{h_0}{h} = 0,8; \quad \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) = 0,2; \quad \varphi = 75; \quad \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\beta}{2}\right) = 0,13; \quad \psi = 0,017;$$

$$\frac{h_0}{h} = 1; \quad \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) = 0; \quad \varphi = 90; \quad \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\beta}{2}\right) = 0; \quad \psi = 0.$$

(3.2.11)-ის გატოლებით (3.2.8)-თან მივიღებთ:

$$C = \alpha' V \frac{a^3 + 4\sqrt{a}}{a^3 + 4\sqrt{a} + 4}. \quad (3.2.12)$$

როცა უწყვეტი ტალღა უსწრებს დინამიკურს, მაშინ პირველსაწყისი თანაბარი მოძრაობის პირობა ირღვევა და იგი არამდგრადია. ΔP ძალის იმპულსით გამოწვეული ტალღის სიჩქარე შემფოთებული ტალღის ზონაში, ნაკადის თავისუფალი ზედაპირზე, შეიძლება ხასიათდებოდეს სიჩქარით $V < C$, რომელიც წყნარი მდგომარეობის დროს გამოისახება უტოლობით $V < C$. ე.ი. დინების ზემოთ ტალღის ცენტრი V სიჩქარის მიმართულებით გადაადგილდება, ხოლო ტალღის გავრცელების სიჩქარე შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს V_c სიდიდით:

$$V \gg C + V. \quad (3.2.13)$$

თუ (3.2.12)-ს შევიტანთ (3.2.13)-ში, მივიღებთ:

$$V_c = V + V\alpha' \frac{a^3 + 4\sqrt{a}}{a^3 + 4\sqrt{a} + 4}. \quad (3.2.14)$$

ტალღის გავრცელების სიჩქარე რეოლოგიურ მახასიათებლებთან კავშირში, როცა მისი შემასწორებელი კოეფიციენტი $\alpha' = 1,05$, ტოლია:

$$V_c = V \frac{(1 + \alpha')(a^3 + 4\sqrt{a})}{a^3 + 4\sqrt{a} + 4}, \quad (3.2.15)$$

წყლის შემთხვევაში, ე.ი. როცა $a = 1$, ტალღის გავრცელების სიჩქარე:

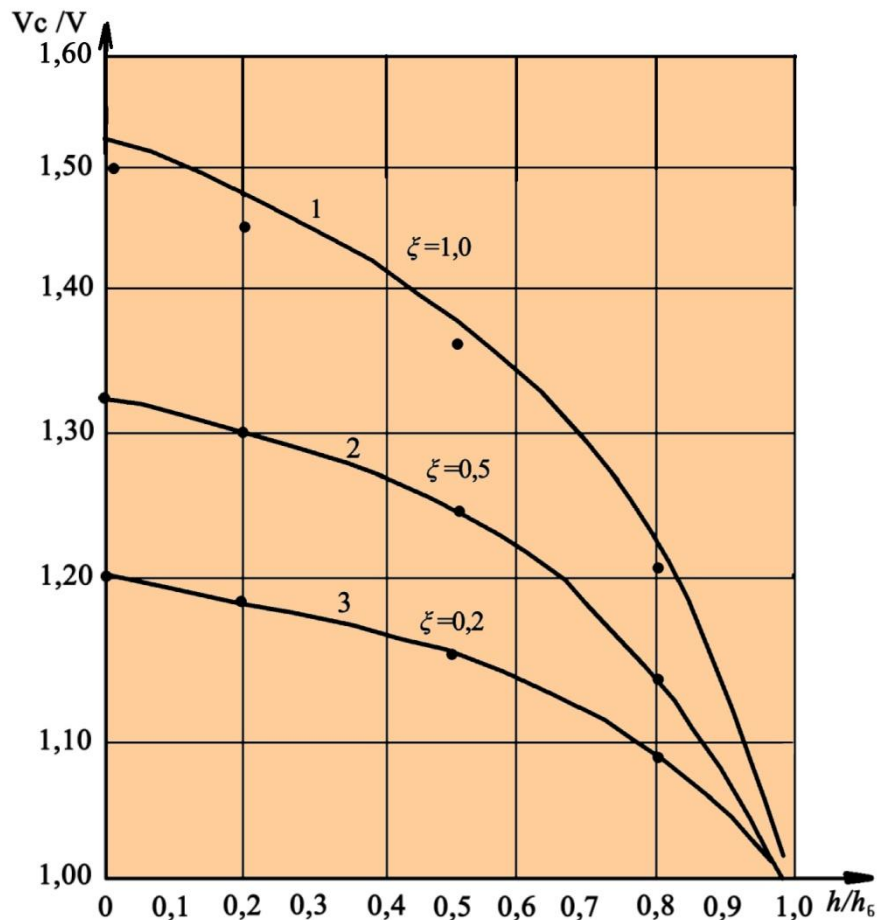
$$V_c = 1,5. \quad (3.2.16)$$

ე.ი. ტალღის გადაადგილების სიჩქარე ნაკადის საშუალო სიჩქარეზე 1,5-ჯერ მეტია. ანალოგიური დამოკიდებულებაა მიღებული ო. ნათიშვილის მიერ ნაკადის მდგრადობის საკითხის შესწავლის დროს [81].

თვალსაჩინოების მიზნით ფარდობით სიდიდეებში მოცემულია ტალღის გადაადგილების სიჩქარის კავშირი რეოლოგიურ მახასიათებლებთან.

როგორც გრაფიკული დამოკიდებულების (ნახ. 7) ანალიზი ადასტურებს, ღვარცოფის რეოლოგიური მახასიათებლების გაზრდით ტალღის გავრცელების სიჩქარის შესაძლებლობა მცირდება, ხოლო რაც შეეხება ტალღის ნაკადის საშუალო სიჩქარესთან ფარდობას, მისი სიდიდე ყოველთვის 1-ზე მეტია და მაქსიმალური სიდიდე 1,5-ის ტოლია. ე.ი. ჰიპერკონცენტრირებულ ნაკადებში ტალღის წარმოქმნის შესაძლებლობა წყალთან შედარებით

მცირდება რეოლოგიური მახასიათებლების გავლენის გამო და ჰიდრავლიკური თვალსაზრისით ნაკადი უფრო მდგრადია.



ნახ. 7. ტალღის გადაადგილების სიჩქარის კავშირი რეოლოგიურ მახასიათებლებთან 1) $\psi = 1$, 2) $\psi = 0,5$, 3) $\psi = 0,2$

მოდრაობის რეჟიმის დაკარგვა ღვარცოფში ხშირად იწვევს ხარჯის, სიღრმის, სიჩქარის უწყვეტად ან საფეხურებრივად ცვლილებას, სადინართა კალაპოტი ხასიათდება მდგრადობის რღვევისა და გაზრდილი ტრანსპორტუნარიანობის შესაძლებლობებით. აქედან გამომდინარე, ტალღის ნაკადის მახასიათებელ პარამეტრებთან კავშირის დამყარებით შესაძლებელია რაოდენობრივად შეფასდეს ტალღური მოძრაობის გავლენა კალაპოტურ დეფორმაციაზე.

მოდრაობის რეჟიმის მდგრადობის შეფასების მიზნით მხედველობაში თუ მივიღებთ, რომ $h = h_1$, საშუალო სიჩქარე იქნება:

$$V = aC\sqrt{hi}, \quad (3.2.17)$$

ღვარცოფის ტალღის სიჩქარე:

$$V = \sqrt{gha}. \quad (3.2.18)$$

(3.2.17)-სა და (3.2.18)-ს თუ გავითვალისწინებთ (3.2.13)-ში, მდგრადობის დაკარგვის შემთხვევაში უტოლობას ექნება სახე:

$$15aC\sqrt{hi} > C\sqrt{hi} + \sqrt{gha}, \quad (3.2.19)$$

საიდანაც

$$C > 2\sqrt{\frac{g}{ia}}. \quad (3.2.20)$$

როცა $h=0$ და $\varphi=1$, მიღებული განტოლება ემთხვევა წყლის მდგრადობის რღვევის საანგარიშო დამოკიდებულებას.

ტალღის გავრცელების სიჩქარე:

$$C > 2\sqrt{\frac{g}{ia}}. \quad (3.2.21)$$

ღვარცოფისა და წყლის ერთი და იმავე სიღრმეებისა და ქანობის შემთხვევაში შესაძლო სიდიდე რეოლოგიურ მახასიათებლებთან კავშირში:

$$C_R/C_w > 2\sqrt{\frac{1}{a}}.$$

გრაფიკული დამოკიდებულება $C_w/C_\varphi f(a)$ მოცემულია ნახაზზე 8.

როგორც გრაფიკული დამოკიდებულება გვიჩვენებს, ჰიპერკონცენტრირებულ ნაკადში წყალთან შედარებით რეოლოგიური მახასიათებლების გავლენის შედეგად მდგრადობის მნიშვნელობა იზრდება, რაც იმის მაჩვენებელია, რომ ნაკადის მოძრაობის რეჟიმი უფრო მაღალი ხარისხის მდგრადობით ხასიათდება წყალთან შედარებით.

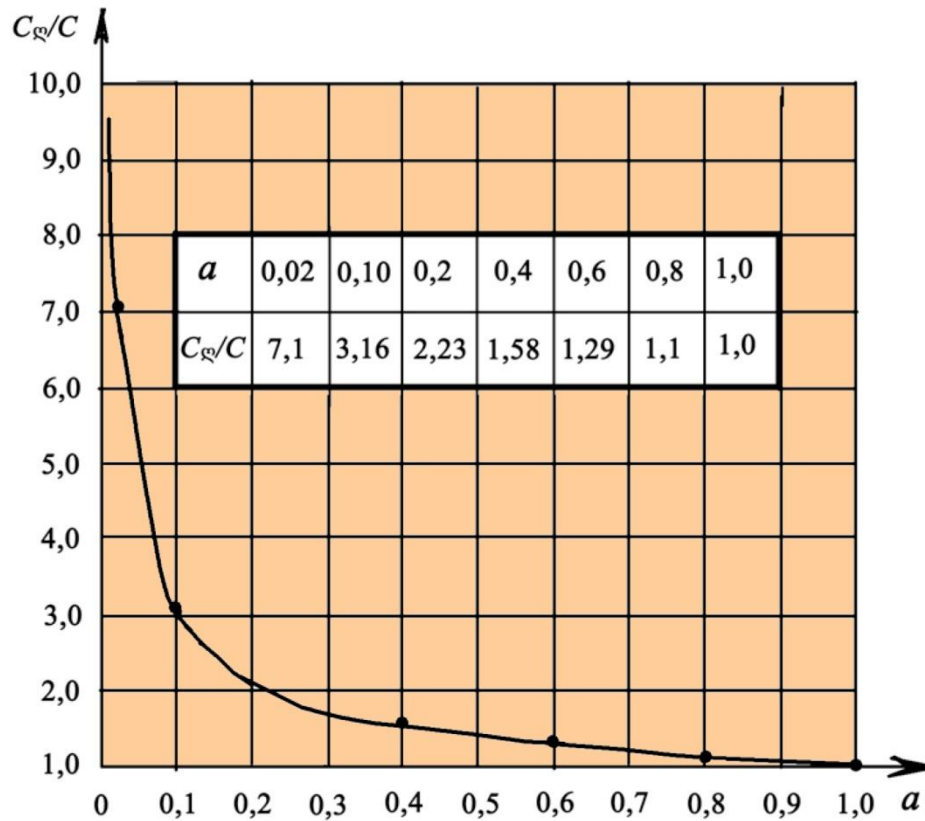
ბმული ღვარცოფის ენერგია და მდგომარეობა როგორც საინჟინრო ამოცანათა გადაწყვეტის პრაქტიკა ადასტურებს, საანგარიშო დამოკიდებულებაში პარამეტრთა შორის განსაკუთრებულ ადგილს კრიტიკული სიღრმე იკავებს, ამიტომ მისი გაანგარიშებისთვის, როცა ღვარცოფული ნაკადის რეალური სიღრმე h -ის ტოლია, ვსარგებლობთ კვეთის ენერგიის საანგარიშო

დამოკიდებულებით:

$$\varepsilon = h \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) \varphi + \frac{aV^2}{2g} \quad (3.2.22)$$

ახ

$$\varepsilon = h + \frac{aV^2}{2g} - h(1 - \varphi) - h_0\varphi. \quad (3.2.23)$$



ნახ. 8. $\frac{C_g}{C_f} f(a)$ დამოკიდებულების გრაფიკი

(3.2.23) დამოკიდებულებაში h_0 სიდიდის განსაზღვრა ბრტყელი ზედაპირების ცოცვადობის მეთოდიდან გამომდინარეობს, ე.ი. ძვრის ძალის საანგარიშო დამოკიდებულებას აქვს სახე:

$$P = \frac{\gamma h^2}{2} \left(1 - \frac{h_0}{h} \right)^2 \varphi, \quad (3.2.24)$$

რადგან წნევის სიდიდე $P = \gamma h_{\text{ს.გ.}} \omega$ და შესაბამისად, $h_{\text{ს.გ.}} = h/2$. იმ შემთხვევაში, როცა $B = 1$ და $\omega = h$, შეგვიძლია დავწეროთ:

$$\frac{\gamma h^2}{2} = \frac{\gamma h^2}{2} \left(1 - \frac{h_0}{h} \right)^2 \varphi. \quad (3.2.25)$$

(3.2.24) განტოლების გამარტივებით და h_0 -ის მიმართ კვადრატული განტოლების ამოხსნით გვექნება:

$$h_0 = h \frac{\sqrt{\varphi} - 1}{\sqrt{\varphi}}. \quad (3.2.26)$$

h_0 -ის მნიშვნელობას თუ გავითვალისწინებთ (3.2.22)-ში, მივიღებთ:

$$\varepsilon = h - h(1 - \varphi) - h\varphi \frac{\sqrt{\varphi} - 1}{\sqrt{\varphi}} + \frac{aQ^2}{2g\omega^2 K^2}. \quad (3.2.27)$$

(3.2.26) დამოკიდებულების დიფერენცირებით გვექნება:

$$\frac{d\varepsilon}{dh} = d\left(h + \frac{aV^2}{2g}\right) - \frac{1 - \varphi}{\varphi} \frac{dh}{dh} - \frac{\sqrt{\varphi} - 1}{\sqrt{\varphi}} \frac{dh}{dh}. \quad (3.2.28)$$

დაბოლოს, მივიღებთ:

$$\frac{d\varepsilon}{dh} = -\frac{aQ^2}{gK^2\omega^3} B + \varphi \left(1 - \frac{h_0}{h}\right). \quad (3.2.29)$$

$$\frac{aQ^2 B}{gK^2\omega^3} = K^2; \quad \frac{aq^2}{g} = K^3.$$

როცა კვეთის ენერგია არის მინიმალური ანუ $\frac{d\varepsilon}{dh} = 0$, მაშინ:

$$\frac{aQ^2}{gK^2\omega^3} B = K = \left(1 - \frac{h_0}{h}\right)\psi. \quad (3.2.30)$$

(3.2.29) საანგარიშო დამოკიდებულება ემთხვევა წყლის ნაკადის საანგარიშო დამოკიდებულებას.

(3.2.29) დამოკიდებულების გარდაქმნებითა და გამარტივებით მივიღებთ კრიტიკული სიღრმის საანგარიშო განტოლებას:

$$h_{\text{კრი}}^3 = \frac{aq^2}{g} \left(1 - \frac{h_0}{h}\right)^3 \psi^3, \quad \text{ე.ი.} \quad h_{\text{კრი}} = \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \psi^3 \sqrt[3]{\frac{aq^2}{g}}. \quad (3.2.31)$$

კრიტიკული სიღრმის საანგარიშო (3.2.31) განტოლება წარმოდგენილი სახით შეიძლება მივიღოთ მოძრაობის რაოდენობის განტოლებით, რაც მოდელის გამოყენების სიზუსტეზე მიუთითებს.

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, როცა ტალღის სიჩქარე ნაკადის გადაადგილების სიჩქარის ტოლია, პროცესი შეიძლება განიხილოს, როგორც

მძაფრი მოძრაობის გადასვლა წყნარ რეჟიმში ან პირიქით. ღვარცოფთა ღია სადინარებში მოძრაობის დროს, როგორც სუფთა ჰიდრავლიკაში, ისე აქაც, ადგილი აქვს ნაკადის სხვადასხვა მდგომარეობას: მძაფრი, წყნარი და კრიტიკული.

ანალოგიური დაყოფა შეიძლება ბმულ ღვარცოფებში. ასეთი დაყოფა არ ატარებს ფორმალურ ხასიათს და გარკვეული სიზუსტით განსაზღვრავს სასაზღვრო პირობების დანიშნვის შესაძლებლობას. საინჟინრო ამოცანების გადაწყვეტის დროს აუცილებელია აგებულ იქნეს ნაკადის მოძრაობის თავისუფალი ზედაპირის მოხაზულობა და ანალიზის საფუძველზე განხორციელდეს ენერჯის ჩამქრობი ნაგებობის გაანგარიშება, ნაკადის მოძრაობის რეჟიმების შეფასება, ღვარცოფსაცავის ან მეწყრით შექმნილი კაშხლების გარღვევის შედეგად წარმოქმნილი ნაკადის მახასიათებლების შეფასება, კრიტიკული სიმაღლის, სიჩქარის, ხარჯის და სხვა პარამეტრების განსაზღვრა და სხვ.

ბმული ღვარცოფის მოძრაობის შემთხვევაში ნაკადის მდგომარეობის შესაძლებლობები შეიძლება შეფასებულ იქნეს უტოლობით:

$$\frac{aQ^2}{g\omega^3} B \leftrightarrow T, \quad (3.2.32)$$

სადაც T არის უგანზომილებო პარამეტრი და წყლის შემთხვევაში იგი 1-ის ტოლია, ხოლო ღვარცოფისათვის T -ს სიდიდეა:

$$T = \left(1 - \frac{h_0}{h}\right)^3 \psi^3, \quad (3.2.33)$$

სადაც ψ არის კოეფიციენტი და ღვარცოფის შინაგანი ხახუნის კუთხეზეა დამოკიდებული;

h_0 – ბმულობის ეკვივალენტური სიღრმე;

a – კორიოლისის კოეფიციენტი;

Q – ბმული ღვარცოფის ხარჯი;

B, ω – სიგანე თავისუფალ ზედაპირზე და ცოცხალი კვეთის ფართობი;

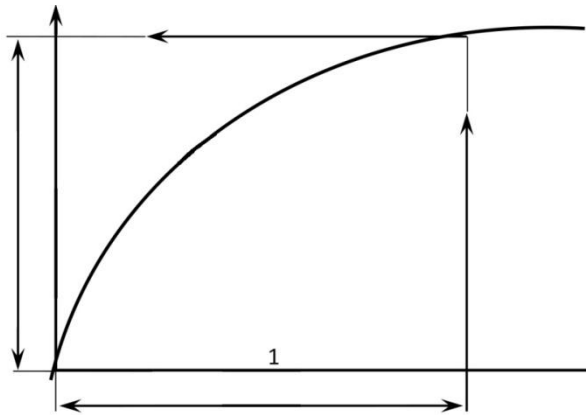
g – სიმძიმის ძალის აჩქარება.

ღვარცოფის კრიტიკული მახასიათებლების განსაზღვრა და ბმული ღვარცოფის ერთგანზომილებიანი დაუმყარებელი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლების გამოყენება შესაძლებელია, როცა სიღრმის სიდიდის სიგანეზე წარმოებული $\frac{dh}{dt} = \infty$, ე.ი. მნიშვნელის სიდიდე 0-ის ტოლია. ნაკადის წყვეტადობის ასეთ მდგომარეობას შეესაბამება დამოკიდებულება:

$$\frac{aQ^2}{g} = \frac{\omega_{\text{კრ}}^3}{B} \psi^3 \left(1 - \frac{h_0}{h_{\text{კრ}}} \right). \quad (3.2.34)$$

ნიუტონური სითხეების ჰიდრავლიკის ანალოგიურად, კრიტიკული მდგომარეობის შემთხვევაში ღვარცოფის კრიტიკული სიღრმის განსაზღვრის პირობა წარმოდგენილია (3.2.33) განტოლებით, რომელიც ასევე შეიძლება წარმოვადგინოთ გრაფიკულად, ფუნქციონალური დამოკიდებულების სახით:

$$h_{\text{კრ}} = f \left[\frac{\omega_{\text{კრ}}^3}{B} \left(1 - \frac{h_0}{h_{\text{კრ}}} \right)^3 \psi^3 \right] \frac{aQ^2}{g}.$$



ნახ. 9. $h_{\text{კრ}} = f \left[\frac{\omega^3}{B} \left(1 - \frac{h_0}{h_{\text{კრ}}} \right)^3 \psi^3 \right] \frac{aQ^2}{g}$ დამოკიდებულების გრაფიკი

(3.2.33) განტოლებაში, როცა $h = h_{\text{კრ}}$ და მარჯვენა ნაწილი 1-ის ტოლია, ე.ი.

$$\varphi^3 \left(1 - \frac{h_0}{h_{\text{კრ}}} \right) \psi^3 = 1, \quad (3.2.35)$$

ხოლო ამონახსნს h_0 სიღრმის მიმართ ექნება შემდეგი სახე:

$$h_0 = -h_{\text{გრ}} \frac{1-\psi}{\psi}. \quad (3.2.36)$$

(3.2.35) განტოლებიდან ნათლად ჩანს, რომ ბმულობის ეკვივალენტურ სიღრმეს აქვს მოძრაობის საწინააღმდეგო მიმართულება. მისი სიდიდე რეოლოგიური მახასიათებლების ფუნქციას წარმოადგენს, რადგან ბმულ ღვარცოფში, როცა შეჭიდულობა არის c , შინაგანი ხახუნის კუთხე φ და მოცულობითი წონა γ , მაშინ კრიტიკული სიღრმე რეოლოგიასთან კავშირში შეიძლება განსაზღვრულ იქნეს დამოკიდებულებით:

$$h_{\text{გრ}} = -\frac{2c}{\gamma} \frac{\sqrt{\varphi}}{\varphi}. \quad (3.2.36)$$

ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე, როცა (3.2.33) განტოლებაში მარცხენა ნაწილი 1-ის ტოლია, კრიტიკული სიღრმის საანგარიშო დამოკიდებულება მიიღებს სახეს:

$$h_{\text{გრ}} = h_0 + \frac{1}{\psi} \sqrt[3]{\frac{aq^2}{g}}. \quad (3.2.37)$$

(3.2.37) განტოლება წარმოადგენს ბმული ღვარცოფის კრიტიკული სიღრმის ბმულობას ეკვივალენტური სიღრმის გათვალისწინებით:

$$h_{\text{გრ}} = \frac{1}{2\psi} \left(1 - \psi + \sqrt[3]{\frac{aq^2}{g}} \right). \quad (3.2.38)$$

სატრანზიტო უბნებზე ღვარცოფის მოძრაობის პირობების შეფასების დროს, მისი კრიტიკული მახასიათებლები იძენენ განსაკუთრებულ მნიშვნელობას. მახასიათებლების შეფასების მიზნით, კერძოდ, კრიტიკული სიღრმის განსაზღვრის დროს შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ნაკადის მოძრაობის რაოდენობის განტოლებები.

ბმული ღვარცოფის თავისუფალი ზედაპირის მკვეთრი ნახტომისებრი ცვლილებები ხდება არა მხოლოდ ღვარცოსაცავებისა და ღვარცოფის მასის მიერ წარმოქმნილი კაშხლების გარღვევის შემთხვევაში, არამედ ყოველთვის, როდესაც ზემოქმედება შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ხდება, ნაკადი იცვლის მოძრაობის რეჟიმებს.

3.3. სადინარის და ბმული ღვარცოფის კრიტიკული მახასიათებლები

ისე, როგორც სხვა სითხეები შემთხვევაში, ღვარცოფის კრიტიკული მდგომარეობის შეფასებისა და საანგარიშო დამოკიდებულებებით აღწერის მიზნით განიხილება მოძრაობის რეჟიმების სხვადასხვა შემთხვევები.

სადინარში ღვარცოფთა მოძრაობის დროს, როცა კალაპოტის სიგანე B -ს, ხარჯი Q -ს, ცოცხალი კვეთის ფართობი ω -ს, სიმძიმის ძალის აჩქარება g -ს და რეოლოგიის განმსაზღვრელი პარამეტრი a -ს იოლია, კრიტიკული მდგომარეობა შეიძლება შეფასდეს უტოლობის მეშვეობით:

$$\frac{aQ^2}{g\omega^3} \leftrightarrow a^3. \quad (3.3.1)$$

როცა ღვარცოფი ტალღის სახით არის ფორმირებული და თავისუფალი ზედაპირის სიღრმის ცვლილების პროგნოზირების საშუალებას იძლევა მოძრაობის მიმართულებით, კრიტიკული მდგომარეობის შეფასება რეჟიმების ცვლილებით არის შესაძლებელი და შემხვედრი წინააღმდეგობების შერჩევ და საპროექტო მახასიათებლების განსაზღვრა მასზე დაყრდნობით სირთულეს არ წარმოადგენს.

ღვარცოფის თავისუფალი ზედაპირი იმ შემთხვევაში განიცდის წყვეტას, როცა სიღრმის წარმოებული მოძრაობის მიმართულებით უსასრულობის ტოლი ხდება, ე.ი. $dh/dl = \infty$.

კრიტიკული მდგომარეობის შეფასების მიზნით განიხილება ნაკადის კუთრი ენერჯიის მოძრაობის მიმართულებით, ისე სიღრმეზე ცვლილებების შესაძლებლობები.

ე.ი. ღვარცოფის კვეთის ენერჯია სიმაღლესთან კავშირში

$$\varepsilon = h \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) \Psi + \frac{\alpha V^2}{2g}, \quad (3.3.2)$$

სადაც ε – მოძრავი ნაკადის კვეთის ენერჯიის სიდიდეა (ჯ);

h_0 – ბმულობის ეკვივალენტური სიღრმე (მ);

h – ღვარცოფის სიღრმე (მ);

Ψ – შინაგანი ხახუნის კუთხის კოეფიციენტი $\Psi = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\alpha}{2}\right)$;

α – სიჩქარის უთანაბრობის კოეფიციენტი;

V – მოძრავი ნაკადის სიჩქარე (მ/წმ);

g – სიმძიმის ძალის აჩქარება (მ/წმ²).

(3.3.1) განტოლების მარჯვენა მხარეს თუ დავუმატებთ და გამოვაკლებთ ნაკადის სიღრმეს, მაშინ კვეთის ენერჯიის სიდიდე, როცა ღვარცოვის ცოცხალი კვეთის ფართობი $\omega_c = \omega K$, შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს ფორმულით:

$$\varepsilon = h + \frac{aQ^2}{2gK^2\omega^2} - h \left[1 - \Psi \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) \right]. \quad (3.3.3)$$

(3.3.2)-ის დიფერენცირებით მივიღებთ:

$$\frac{d\varepsilon}{dh} = -\frac{aQ^2}{2a^2\omega^3} + a. \quad (3.3.4)$$

როცა კვეთის ენერჯია მინიმალურია – $d\varepsilon/dh = 0$,

$$\frac{aQ^2}{g} = \frac{\omega^3}{B} a^3. \quad (3.3.5)$$

რეოლოგიური მახასიათებლების 0-თან ტოლობის შემთხვევაში, ე.ი. როცა ბმულობის ეკვივალენტური სიღრმე $h_0 = 0$ და $\Psi = 1$, (3.3.5) დამოკიდებულება მიიღებს სახეს:

$$\frac{aQ^2}{g} = \frac{\omega^3}{B}. \quad (3.3.6)$$

განტოლება (3.3.4) კინემატიკურ კოეფიციენტთან კავშირში შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს:

$$\frac{d\varepsilon}{dh} = a - \Pi_K. \quad (3.3.7)$$

(3.3.7) დამოკიდებულებით იკვეთება კიდევ ერთი უბრალო კრიტიკული ნაკადის მდგომარეობის შეფასების მიზნით.

კრიტიკული მდგომარეობის დროს $\Pi_K = a$;

წყნარი მდგომარეობის დროს $\Pi_K > a$;

მძაფრი მდგომარეობის დროს $\Pi_K < a$.

ასეთ შემთხვევაში, რაც უფრო განსხვავებულია კინეტიკურობის პარამეტრი a -ს მნიშვნელობისაგან, მით უფრო მეტად იზრდება სიმპაფრის ხარისხი.

(3.3.5) განტოლება იმ შემთხვევაში აკმაყოფილებს პირობას, როცა ნაკადის სიღრმე კრიტიკულის ტოლია და აქედან გამომდინარე, ამ განტოლებიდან უნდა განხორციელდეს მისი მნიშვნელობის განსაზღვრა.

ღვარცოფთა მოძრაობის შესწავლას განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს ენერგეტიკული თვალსაზრისით. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ნაკადის როგორც კუთრი, ისე კვეთის ენერჯის ცვლილების ხასიათი მოძრაობის მიმართულებით. როცა ცნობილია კვეთის ენერჯის სიდიდე, მოსახერხებელია ღია სადინარებში დამყარებული მოძრაობის ფიზიკური არსის გამოვლენა და სხვა საინჟინრო ამოცანების ნათლად წარმოდგენა. როგორც რეალობა ადასტურებს, მოძრაობის დროს ნაკადის კუთრი ენერჯია E მოძრაობის მიმართულებით ყოველთვის მცირდება, $\frac{dE}{dl} < 0$ და მოძრაობა, კერძოდ, ამ ენერჯის ხარჯზე ხდება. რაც შეეხება კვეთის ენერჯის ცვლილებას მოძრაობის მიმართულებით საფარდი ჰორიზონტალური სიბრტყის მიმართ საჭიროებს სპეციალურ ახსნას.

განმარტებიდან გამომდინარე, ნაკადის კუთრი ენერჯის სრული მნიშვნელობა ღვარცოფისათვის შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს განტოლებით:

$$E = h + \frac{aV^2}{2g} - h \left[1 - \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) \psi \right]. \quad (3.3.8)$$

შესაბამისად, ნაკადის კვეთის კუთრი ენერჯის მნიშვნელობა

$$\frac{d\varepsilon}{dl} = \frac{dE}{dl} + i. \quad (3.3.9)$$

ი.ი. $\frac{d\varepsilon}{dl} = -\frac{Q^2}{a^2 \omega^2 c^2} + i + a - i. \quad (3.3.10)$

შესაბამისად, $\frac{d\varepsilon}{dl} = i \left[a + \left(\frac{K_0}{K} \right)^2 \frac{1}{a^2} \right], \quad (3.3.11)$

სადაც

$$\begin{cases} K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i}} \\ K = a\omega c\sqrt{h} \end{cases} \quad (3.3.12)$$

(3.3.11) განტოლებით ნათელია, რომ თანაბარი მოძრაობის შემთხვევაში, როცა $K_0 = K$, $\frac{d\varepsilon}{d\ell} = 0$ და $\varepsilon = const$ (არათანაბარი მოძრაობის შემთხვევაში $K_0 \neq K$) კვეთის ენერგია შეიძლება შემცირდეს ან გაიზარდოს მოძრაობის მიმართულებით ფარდობით $\frac{K_0}{K}$ -ს სიდიდესთან კავშირში.

ღვარცოფის ერთი და იგივე ხარჯის გადინება სადინარში მოძრაობის პირობებიდან გამომდინარე (ქანობი, სიმქისე) და რეოლოგიური მახასიათებლების გათვალისწინებით, შეიძლება განხორციელდეს სხვადასხვა სიჩქარით და შესაბამისად, განსხვავებულ სიღრმეზე.

შესაბამისად, რეოლოგიასთან კავშირში იცვლება როგორც პოტენციური ნაწილი კვეთის კუთრი ენერგიის, ისე მისი კინეტიკური ენერგიის ნაწილი. ისეთ შემთხვევაში, როცა $h > 0$, პოტენციური ნაწილი მეტია ნულზე, ხოლო სიჩქარის გაზრდის დროს, როცა კინეტიკური ენერგია მისწრაფვის უსასრულობისაკენ, მაშინ კვეთის კუთრი ენერგიაც მისწრაფვის უსასრულობისაკენ.

ნაკადის მდგომარეობის გამოვლენა და კრიტიკული მდგომარეობის შეფასება ხორციელდება მისი სიღრმის კრიტიკულთან გატოლებით. მისი განსაზღვრა შესაძლებელია შეფასდეს არა მხოლოდ ნაკადის მდგომარეობით, არამედ შეიძლება მისი საშუალებით განვახორციელოთ რიგი ჰიდრავლიკური გაანგარიშებები. თვით განმარტებიდან იკვეთება, რომ ასეთ შემთხვევაში კვეთის ენერგიის მნიშვნელობა მინიმალურია.

კრიტიკული სიღრმის განსაზღვრა სადინარის კალაპოტის სხვადასხვა კვეთის დროს

1) სწორკუთხა კვეთი

$$\frac{aQ^2}{g} = \frac{\omega K}{B_k} \psi^3 \left(1 - \frac{h_0}{h}\right)^3 \quad (3.3.13)$$

ცოცხალი კვეთის და ხარჯის გამოსახვითი საანგარიშო დამოკიდებულებები

$$\frac{aq^2}{g} = h_k^3 \psi^3 \left(1 - \frac{h_0}{h_k}\right)^3, \quad h_k = h_0 + \frac{1}{\psi} \sqrt[3]{\frac{aq^2}{g}}. \quad (3.3.14)$$

2) პარაბოლური კვეთი გაშლილი ფორმით

ასეთი კვეთი მქონე კალაპოტის ცოცხალი კვეთის საანგარიშო

$$\omega_k = \frac{2}{3} B h_k.$$

ასეთ შემთხვევაში (3.3.2) დამოკიდებულება მიიღებს სახეს:

$$\frac{aq^2}{g} = \frac{8}{27} B_k^2 h_k^2 \left(1 - \frac{h_0}{h_k}\right)^3 \psi^3, \quad (3.3.15)$$

ხოლო პერიმეტრის განტოლებას პარაბოლური კვეთისათვის აქვს სახე:

$$Y = P X^2, \quad (3.3.16)$$

საიდანაც $h_k = \frac{P}{4} \frac{B_k^2}{\psi \left(1 - \frac{h_0}{h_k}\right)}$ და $B_k^2 = \frac{4h_k}{P}$, შესაბამისად, (3.3.15) განტოლება

მიიღებს სახეს:

$$h_k = h_0 + \frac{1}{\psi} \sqrt[4]{\frac{27}{125} \frac{a^2 P}{g}}; \quad (3.3.17)$$

3) სამკუთხა კვეთი

სამკუთხა კვეთის მქონე სადინარის შემთხვევაში, როცა ფერდების დახრის კოეფიციენტი m -ის ტოლია, $B_k = 2m h_k \left(1 - \frac{h_0}{h_k}\right) \psi$, მაშინ შესაბამისად, კრიტიკული სიღრმის მნიშვნელობა

$$\frac{aQ^2}{g} = B_k h_k^3 \left(1 - \frac{h_0}{h_k}\right)^3 \psi^3 = 4m^2 h_k^2 \left(1 - \frac{h_0}{h_k}\right)^2 \psi^2 h_k^2 \left(1 - \frac{h_0}{h_k}\right)^3. \quad (3.3.18)$$

ე.ი.
$$h_k = h_0 + \frac{1}{\psi} \sqrt[5]{\frac{aQ^2}{4gm^2}}. \quad (3.3.19)$$

კრიტიკული სიჩქარეების განსაზღვრა

1) კალაპოტი სწორკუთხა კვეთის ფორმით

მეორე განტოლებაში ხარჯი გამოვსახოთ კრიტიკული სიჩქარეებით. როდესაც სიჩქარე კრიტიკულის ტოლია, მაშინ შესაბამისად, სხვა პარამეტრებიც იქნება კრიტიკული.

თუ ხარჯს გამოვსახავთ სიჩქარის საშუალებით და მას განვსაზღვრავთ (3.3.2) განტოლების მეშვეობით, მაშინ

$$\frac{aQ^2}{g} = \frac{\omega_k}{B_k} \psi^3 \left(1 - \frac{h_0}{h}\right)^3; \quad (3.3.20)$$

კალაპოტის სწორკუთხა კვეთის ფორმა

ცოცხალი კვეთის ფართობი

$$\omega = B_k h_k; \quad (3.3.21)$$

კრიტიკული სიჩქარე

$$V_k = \psi(1-\varphi) \sqrt{\frac{g}{a} h_k \psi(1-\alpha)}; \quad (3.3.22)$$

2) კალაპოტი პარაბოლური ფორმის კვეთით

$$\frac{2Q^2}{g} = \frac{\omega_k^3}{B} \psi^3 \left(1 - \frac{h_0}{h_k}\right)^3; \quad (3.3.23)$$

კრიტიკული სიჩქარე

$$V = \psi \left(1 - \frac{h_0}{h_k}\right) \sqrt{\frac{g}{a} \frac{2}{3} h_k \left(1 - \frac{h_0}{h_k}\right)}; \quad (3.3.24)$$

3) სამკუთხა ფორმა

$$\frac{2Q^2}{g} = \frac{\omega_k^3}{B} \left(1 - \frac{h_0}{h_k}\right)^3 \psi^3; \quad (3.3.25)$$

ცოცხალი კვეთის ფართობი

$$\omega_k = m h_k^2; \quad (3.3.26)$$

კრიტიკული სიჩქარე

$$V_k = \left(1 - \frac{h_0}{h_k}\right) \psi \sqrt{\frac{g}{a} \frac{h_k}{2} \left(1 - \frac{h_0}{h_k}\right)} \psi; \quad (3.3.27)$$

4) კალაპოტის ტრაპეციის განივი კვეთის ფორმა

ტრაპეციის განივი კვეთის მქონე კალაპოტისათვის ცოცხალი კვეთის ფართობი ω_k და სიგანე თავისუფალ ზედაპირზე B_k

$$\begin{cases} \omega_k = h_k(b + mh_k) \\ B_k = b + 2mh_k \end{cases}, \quad (3.3.28)$$

კრიტიკული სიჩქარე

$$V = \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \psi \sqrt{\frac{g}{a} \frac{h_k(b + mh_k)}{b + 2mh_k} \left(1 - \frac{h_0}{h_k}\right) \psi}. \quad (3.3.29)$$

კრიტიკული ქანობის განსაზღვრა

როცა ცნობილია კრიტიკული სიჩქარე, კრიტიკული ქანობის განსაზღვრა სირთულეს არ წარმოადგენს. თანაბარი მოძრაობის სიჩქარის ფორმულის მიხედვით

$$V = \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \psi c \sqrt{hi}. \quad (3.3.30)$$

თუ ამ ფორმულიდან განვსაზღვრავთ i -ს მნიშვნელობას, როცა $i = i_k$, $V = V_k$, $c = c_k$, $h = h_k$, მივიღებთ:

$$i = \frac{V_k^2}{C_k^2 \psi \left(1 - \frac{h_0}{h_k}\right)^2 h_k}, \quad (3.3.31)$$

$$V = \psi \left(1 - \frac{h_0}{h_k}\right) \sqrt{\frac{g}{2} \omega_k^3 \psi \left(1 - \frac{h_0}{h_k}\right)}. \quad (3.3.32)$$

ყველა მიღებული დამოკიდებულება, როცა რეოლოგიური მახასიათებლები 0-ის ტოლია, გარდაიქმნება სუფთა წყლის განტოლებებად.

$$\frac{dE}{de} = 0; \quad \frac{d\varepsilon}{dc} = i - \left[1 - \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \psi\right]; \quad \frac{d\varepsilon}{dc} = 0;$$

$$\varepsilon = h + \frac{aV^2}{2g} = h \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \psi - \frac{aV^2}{2g} = h + \frac{aV^2}{2g} - h \left[1 - \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \psi\right];$$

$$\frac{dQ}{d\ell} = \frac{d\left(h + \frac{aV^2}{2g}\right)}{d\ell} - \left[1 - \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \psi\right] \frac{dh}{d\ell};$$

$$\frac{d\varepsilon}{d\ell} = \frac{dh}{d\ell} - \left[1 - \left(1 - \frac{h_0}{h} H \right) \right] \frac{dh}{d\ell} + \frac{d\left(\frac{aV^2}{2g}\right)}{d\ell};$$

$$\frac{d\varepsilon}{d\ell} = \frac{dh}{d\ell} \left(1 - \frac{h_0}{h} H \right) + \frac{d\left(\frac{aV^2}{2g}\right)}{d\ell}; \quad \frac{d\varepsilon}{d\ell} = i \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) \psi - \frac{aQh^2B}{g\omega^3};$$

$$i = \frac{Q^2}{K^2\omega^2R}; \quad i \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) \psi = \frac{aQ^2B}{gK^2\omega^3}; \quad \frac{Q^2}{K^2\omega^2\ell} = \frac{aW^2V^2B}{gK^2\omega^3}.$$

თავი 4. ტალღის ფორმით ღვარცოფის მოძრაობა

4.1. გრძივი ტალღის ფორმით მოძრავი ღვარცოფის დიფერენციალური განტოლება

ღვარცოფთა ღია სადინარებში მოძრაობის რეჟიმი ხშირად დაუმყარებელია და ფორმირებული ხარჯის სიდიდე ნებისმიერ კვეთში დროის ფუნქციას წარმოადგენს.

ღვარცოფის მახასიათებელი პარამეტრები, კერძოდ, ხარჯი, ცოცხალი კვეთის ფართობი, შეიძლება დახასიათებული იქნეს საშუალო სიჩქარის ცვლილებით, სადინარის კალაპოტის შევსების სიღრმით ან დონის ცვალებადობით. აქედან გამომდინარე, ფორმირებული ნაკადის გაანგარიშების ძირითად ამოცანას სადინარის კვეთის მდებარეობასა და დროსთან კავშირში იმ მახასიათებელი პარამეტრების განსაზღვრა წარმოადგენს, როგორც არის სისქე და ცოცხალი კვეთის ფართობი.

ანომალური ბუნებიდან გამომდინარე, რეგულირების საკითხი და ყოველი კონკრეტული გადაწყვეტილების ურთიერთმართვადი ფაქტორების კომპლექსთან არის უშუალოდ დაკავშირებული. გაანგარიშების მეთოდების სრულყოფის მიზნით, მხედველობაში უნდა იქნეს მიღებული მოძრავი ნაკადის რეჟიმი და თავისუფალი ზედაპირის ფორმა. ღვარცოფთა ფორმირება და მოძრაობის ჩამოყალიბება სხვადასხვა გამომწვევი მიზეზით შეიძლება იყოს გამოწვეული. ხშირია შემთხვევა, როცა მათი მოძრაობის სახეობებიდან იკვეთება მათი ტალღის ფორმით მოძრაობა. რაც ჰიდრავლიკური რეჟიმის შეცვლით, რეოლოგიაში, ხერგილების გარღვევით, ჯებირებიდან დაძვრით, შემხვედრ წინააღმდეგობებზე გადადინებით ან დაჯახებით და სხვა მიზეზებით შეიძლება იყოს გამოწვეული. ღვარცოფთა დაუმყარებელი მოძრაობას, მისი ბუნებიდან გამომდინარე, შეიძლება კარგად მიესადაგოს გრძივი ტალღის ფორმით მოძრაობის შესაძლებლობა. მოძრაობის ნელცვლადი ბუნებიდან გამომდინარე, მის თავისუფალ ზედაპირს შეიძლება გააჩნდეს სიმრუდის ძალზე უმნიშვნელო სურათი. როგორც

დროში, ასევე სივრცეში და მისი თავისუფალი ზედაპირი კარგად შეესაბამება ბუნებაში ფიქსირებულ ღვარცოფის მოძრაობას ფორმით დროში და სივრცეში. ტალღის გავრცელების სიგრძე გაცილებით მნიშვნელოვანია დონის ცვალებადობასთან შედარებით. აღნიშნული შედარებით ამარტივებს მოვლენის ერთგანზომილებიანი მოდელით აღწერას და საანგარიშო დამოკიდებულებების გამოყვანის შესაძლებლობებს. ღვარცოფის დაუმყარებელი მოძრაობა შეიძლება აღწერილ იქნეს ხარჯის ცვლილებიდან გამომდინარე დროის ნებისმიერ მომენტში [101, 102].

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, ღვარცოფის დაუმყარებელი მოძრაობის მრავალფეროვნებიდან გამომდინარე და მოყვანილი მოსაზრებებით, ღვარცოფთა თავისუფალი ზედაპირის პროფილის ცვლილება, როგორც დროში, ისე სივრცეში, შეიძლება ადაპტირებულ იქნეს მოძრაობის გრძელი ტალღის სახესთან.

ღვარცოფის მოძრაობის მოდელის ასეთი გზით შერჩევის შესაბამისად, მისი რთული ბუნებიდან გამომდინარე და მოძრაობის სრულყოფილად აღწერის მიზნით შეიძლება გაკეთებული იყოს შემდეგი დაშვებები:

1. მოძრაობა არის ერთგანზომილებიანი, ნელცვლადი, როგორც დროში, ისე სივრცეში;

2. წინააღმდეგობის ძალების გამოსახვის დროს გამოიყენება იგივე მეთოდოლოგია, როგორსაც ვიყენებთ დამყარებული მოძრაობის შემთხვევაში.

სადინარში ღვარცოფის დაუმყარებელი მოძრაობას თან ახლავს მისი მოძრავი ტანის რხევა. ასეთი სახით დაუმყარებელი მოძრაობის აღწერის მიზნით და საანგარიშო მოდელების მოვლენასთან ადაპტირების, ნაკადის უკუდინების შესაძლებლობის და სადინარის კალაპოტის დრეკადობის მხედველობაში მიღებით უნდა განხორციელდეს.

ღვარცოფის სადინარში და დინამიკა და მოქმედ ძალებს შორის კავშირის განტოლებაში დაჩქარების ნაკადის საშუალო სიჩქარის შეცვლა მოძრაობის წინააღმდეგობის ძალების გათვალისწინებით შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს მოდელით:

$$\frac{\partial}{\partial \ell} \left(Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{aV^2}{2g} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial h_{\text{ჰობ}}}{\partial \ell} = 0, \quad (4.1.1)$$

სადაც V – ღვარცოფის მოძრაობის სიჩქარეა (მ/წმ);

$$Z + \frac{P}{\gamma} = a + h \quad \text{– ღვარცოფის თავისუფალ ზედაპირზე აღებული წერტილის დაცილება საფარდი სიბრტყიდან;}$$

t – კვეთებს შორის მოძრაობის დრო (წმ);

$h_{\text{ჰობ}}$ – შემხვედრი წინააღმდეგობებით გამოწვეული დაწნევის დანაკარგები (მ);

P/γ – ღვარცოფის თავისუფალ ზედაპირზე მოქმედი ატმოსფერული დაწნევა.

წარმოდგენილ (4.1.1) განტოლებაში თუ შევიტანთ Z -ის მნიშვნელობას, ღვარცოფის აქტიური სიღრმეს გამოვსახავთ $h = h_0 \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) \psi$ – სიდიდით, გვექნება:

$$\frac{\partial}{\partial \ell} \left[a + h \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) \psi + \frac{P}{\gamma} + \frac{aV^2}{2g} \right] + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial h_{\text{ჰობ}}}{\partial \ell} = 0. \quad (4.1.2)$$

თუ შემოვიღებთ აღნიშვნას $K = \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) \psi$, მაშინ (4.1.2) განტოლება

შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს სრულყოფილი ფორმით:

$$\frac{\partial}{\partial \ell} \left[a + h + \frac{aV^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} - h(1-K) \right] + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial h_{\text{ჰობ}}}{\partial \ell} = 0. \quad (4.1.3)$$

(4.1.3) განტოლებაში

$$a + h + \frac{P}{\gamma} = Z + \frac{P}{\gamma}, \quad \frac{\partial a}{\partial \ell} = -i, \quad h + \frac{aV^2}{2g} = \varepsilon, \quad \frac{\partial h_{\text{ჰობ}}}{\partial \ell} = \frac{V^2}{c^2 K^2 R},$$

$\frac{\partial}{\partial \ell} \left(h + \frac{aV^2}{2g} \right) = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \ell}$ გვექნება:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \ell} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial \ell} - (1-K) \frac{\partial h}{\partial \ell} = i - \frac{V^2}{K^2 c^2 R} = 0. \quad (4.1.4)$$

როცა სადინარში ღვარცოფის მოძრაობა უწყვეტი ფორმით ხდება და

ხარჯი Q -ს, ხოლო ცოცხალი კვეთის ფართობი ω -ს ტოლია, გვექნება:

$$\frac{\partial Q}{\partial \ell} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = 0. \quad (4.1.5)$$

მე-(4.1.5)-ე განტოლებაში ხარჯის მნიშვნელობას $Q = \omega V$ -ს თუ შევცვლით ცოცხალი კვეთის ფართობით, მივიღებთ:

$$V \frac{\partial \omega}{\partial \ell} + \omega \frac{\partial V}{\partial \ell} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = 0. \quad (4.1.6)$$

(4.1.6) და (4.1.4) განტოლებები ერთად წარმოადგენს ღვარცოფის დაუმყარებელი მოძრაობის განტოლებათა სისტემას.

დამყარებული მოძრაობის შემთხვევაში, როცა $\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial \omega}{\partial t} = 0$, მიღებული (4.1.6) და (4.1.4) განტოლებები ემთხვევა ნელცვლადი მოძრაობის იმ განტოლებებს, რომლებიც აღწერს დაუმყარებელ მოძრაობას პრიზმატული კალაპოტების შემთხვევაში და ცოცხალი კვეთის ფართობი მხოლოდ სიღრმის ცვლილების ფუნქციას წარმოადგენს. როცა სიგანე თავისუფალ ზედაპირზე B -ს ტოლია, პრიზმატულ კალაპოტში ღვარცოფის მოძრაობის შემთხვევაში

$$\frac{\partial \omega}{\partial h} = B. \quad (4.1.7)$$

ღვარცოფის სიღრმის ცვლილება სადინარის სიგრძეზე შესაბამისად შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს განტოლებით:

$$\frac{\partial h}{\partial \ell} = \frac{\partial Q}{\partial \omega} \frac{\partial \omega}{\partial \ell} = \frac{1}{B} \frac{\partial \omega}{\partial \ell}. \quad (4.1.8)$$

კვეთის ენერჯის ცვლილება მოძრაობის მიმართულებით

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \ell} = \frac{\partial h}{\partial \ell} + \frac{1}{2g}, \quad \frac{\partial (aV^2)}{\partial \ell} = \frac{\partial h}{\partial \ell} + \frac{1}{2g} aV \frac{\partial V}{\partial \ell}. \quad (4.1.9)$$

(4.1.9) განტოლებას თუ გავითვალისწინებთ (4.1.4) განტოლებაში, გვექნება

$$\frac{1}{B} \frac{\partial \omega}{\partial \ell} + \frac{1}{g} aV \frac{\partial V}{\partial \ell} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{1-K}{B} \frac{\partial \omega}{\partial \ell} = i - \frac{V}{\partial \ell} aV. \quad (4.1.10)$$

(4.1.10) განტოლების გარდაქმნებისა და გამარტივებების საფუძველზე

(4.1.6) განტოლებასთან ერთად დაუმყარებელი მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემას ღვარცოფისათვის ექნება სახე:

$$\begin{cases} \frac{1}{g} \left(aV \frac{\partial V}{\partial l} + \frac{\partial V}{\partial t} \right) - \frac{K}{B} \frac{\partial \omega}{\partial l} = i - \frac{V^2}{K^2 c^2 R} = 0 \\ V \frac{\partial \omega}{\partial l} + \omega \frac{\partial V}{\partial l} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (4.1.11)$$

(4.1.11) განტოლებათა სისტემის ამონახსნი რთული ანალიზური ფორმისაა. აღნიშნულიდან გამომდინარე, პრაქტიკულ გაანგარიშებებში სისტემის ამოხსნის მიზნით შეიძლება გამოყენებულ იქნეს მიახლოებითი მეთოდები. აღსანიშნავია ინტეგრირების და რიცხვითი მეთოდების გამოყენების ხერხები.

გაანგარიშების პირველი მეთოდის გამოყენების შემთხვევაში განტოლებათა სისტემის მახასიათებლების განსაზღვრა მიახლოებით ინტეგრირებასთან არის დაკავშირებული.

მეორე ხერხით მოძრაობის განტოლებების მახასიათებლების განსაზღვრა რიცხვითი მეთოდების გამოყენებით ხდება.

(4.1.11) განტოლებათა სისტემის ამოხსნის მიზნით ვიყენებთ პირველ მეთოდს და სიჩქარისა და ცოცხალი კვეთის ფუნქციონალური დამოკიდებულებების სახით:

$$\begin{cases} V = V(\ell, t) \\ \omega = \omega(\ell, t) \end{cases} \quad (4.1.12)$$

(4.1.12) განტოლებათა სისტემა ჩაკეტილია ℓ და t ცვლადების ცვლილების შესაძლებლობის საზღვრებში და გააჩნია პირველი რიგის უწყვეტი წარმომადგენლები. (4.1.12) განტოლებათა სისტემით წარმოდგენილ განტოლებებში წარმომადგენლები დროის განსაზღვრულ მომენტში შეესაბამება ღვარცოფის ნელცვლად მოძრაობას სადინარის განსაზღვრულ მონაკვეთზე.

დაუმყარებელი მოძრაობის შესაბამისი (4.1.11) განტოლებათა სისტემა ერთად იძლევა (4.1.12) განტოლებათა სისტემის ამოხსნის შესაძლებლობას. სიჩქარის V ცოცხალი კვეთის ფართობის ცვლილება შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს შემდეგი სახით:

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = \frac{\partial\omega}{\partial t} + \frac{\partial\omega}{\partial l} \frac{dl}{dt} \\ \frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial l} \frac{dl}{dt} \end{cases} \quad (4.1.13)$$

როგორც (4.1.13) განტოლებათა სისტემა გვიჩვენებს, სადინარის მიმართულებით $l = f(t)$ ხაზზე წარმოებულები $\frac{\partial\omega}{\partial t}$, $\frac{\partial\omega}{\partial l}$, $\frac{\partial V}{\partial t}$, $\frac{\partial V}{\partial l}$ ერთმანეთთან ურთიერთკავშირის გარდა დაკავშირებულია (4.1.11) განტოლებათა სისტემასთან, რომელშიც ω , V , $\frac{d\omega}{dt}$, $\frac{dV}{dt}$ დაკვირვებებით ცნობილი სიდიდეებია, გადაადგილების $l = f(t)$ კანონზომიერებიდან გამომდინარე.

(4.1.13) განტოლებათა სისტემიდან თუ განვსაზღვრავთ $\frac{\partial V}{\partial t}$ და $\frac{\partial\omega}{\partial t}$ -ს

მნიშვნელობებს, გვექნება:

$$\begin{cases} \frac{\partial\omega}{\partial t} = \frac{d\omega}{dt} - \frac{\partial\omega}{\partial l} \frac{dl}{dt} \\ \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{dV}{dt} - \frac{\partial V}{\partial l} \frac{dl}{dt} \end{cases} \quad (4.1.14)$$

(4.1.14) განტოლებათა სისტემის გათვალისწინებით (4.1.11) განტოლებათა სისტემაში, გვექნება

$$\begin{cases} \frac{1}{g} \left(aV \frac{\partial V}{\partial l} + \frac{dV}{dt} - \frac{\partial V}{\partial l} \frac{dl}{dt} \right) + \frac{K}{B} \frac{\partial\omega}{\partial l} = i - \frac{V^2}{K^2 c^2 R} \\ V \frac{\partial\omega}{\partial l} + \omega \frac{\partial V}{\partial l} + \frac{d\omega}{dt} - \frac{\partial\omega}{\partial l} \frac{dl}{dt} = 0 \end{cases} \quad (4.1.15)$$

(4.1.15) განტოლებათა სისტემის ამოხსნას ვაწარმოებთ $\frac{\partial V}{\partial l}$ და $\frac{\partial\omega}{\partial l}$ -ის

მიმართ. თუ შემოვიღებთ უცნობების აღნიშვნებს $x = \frac{\partial V}{\partial l}$, $y = \frac{\partial\omega}{\partial l}$

$$\begin{cases} \frac{1}{g} \left(aVx + \frac{dV}{dt} - \frac{dl}{dt} x \right) + \frac{K}{B} y = i - \frac{V^2}{K^2 c^2 R} \\ Vy + \omega x + \frac{d\omega}{dt} - y \frac{dl}{dt} = 0 \end{cases} \quad (4.1.16)$$

(4.1.16) განტოლებათა სისტემაში გამარტივებებისა და გარდაქმნების

შედეგად გვექნება:

$$\begin{cases} \left(aV - \frac{dl}{dt} \right) x + \frac{K}{B} gy = \left(i - \frac{V^2}{K^2 c^2 R} \right) g - \frac{dV}{dt} \\ \omega x + \left(V - \frac{dl}{dt} \right) y = \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (4.1.17)$$

(4.1.17) განტოლებათა სისტემა წარმოადგენს პირველი ხარისხის ორუცნობიან განტოლებათა სისტემას, სადაც

$$a_1 = aV - \frac{dl}{dt}; \quad b_1 = \frac{K}{B} g; \quad c_1 = \left(1 - \frac{V^2}{c^2 K^2 R} \right) g - \frac{dV}{dt}; \quad a_2 = \omega; \quad b_2 = V - \frac{dl}{dt}; \quad c_2 = \frac{d\omega}{dt}.$$

$$\text{ე.ო.} \quad \begin{cases} a_1 x + b_1 y = c_1 \\ a_2 x + b_2 y = c_2 \end{cases} \quad (4.1.18)$$

წარმოდგენილ განტოლებათა სისტემის ამონახსნები დეტერმინანტების სახით შემდეგნაირად შეიძლება იყოს წარმოდგენილი:

$$x = \frac{\partial V}{\partial \ell} = \frac{\begin{vmatrix} c_1 & b_1 \\ c_2 & b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}} = \frac{D_1}{D} = \frac{c_1 b_2 - b_1 c_2}{a_1 b_2 - a_2 b_1}, \quad (4.1.19)$$

$$y = \frac{\partial \omega}{\partial \ell} = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & c_1 \\ a_2 & c_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}} = \frac{D_2}{D} = \frac{a_1 c_2 - a_2 c_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1}.$$

როცა წარმოდგენილი ამონახსნებით x -ის და y -ის მნიშვნელობების განმსაზღვრელი სიდიდე D განსხვავებულია 0-ისგან, ამონახსნები x და y $\ell = f(t)$ სახის მიმართ იძლევა ერთადერთ ამონახსნს $\frac{\partial V}{\partial \ell}$ და $\frac{\partial \omega}{\partial \ell}$ წარმოებულებისას, რომელიც მხოლოდ ცოცხალი კვეთის ფართობზე და V საშუალო სიჩქარეზეა დამოკიდებული. ასეთ შემთხვევაში ტალღის არავითარი ფორმის წარმოქმნას არ აქვს ადგილი.

თუ ტალღის ფრონტი, რომელზედაც ხდება დაკვირვება, ნამდვილად არსებობს $\ell = f(t)$ ხაზის მიმართულებით, აუცილებელია არსებობდეს ამონახსნების ორი მნიშვნელობა. როგორც დეტერმინანტების თეორიიდან

არის ცნობილი, ასეთ შემთხვევაში აუცილებელია დაკმაყოფილდეს პირობა $D = D_1 = D_2 = 0$. ადვილი შესამოწმებელია, რომ როცა $D = D_1$, მაშინ D_2 -ც უტოლდება 0-ს. მაშინ თუ გავხსნით D და D_1 განმსაზღვრელს, მივიღებთ

$$\begin{cases} D = a_1 b_2 - a_2 b_1 = \left(aV - \frac{dl}{dt} \right) \left(V - \frac{dl}{dt} \right) - \frac{\omega K}{B} g = 0 \\ D_1 = \left[g \left(1 - \frac{V^2}{c^2 R K^2} \right) - \frac{dV}{dt} \right] \left(V - \frac{dl}{dt} \right) - \frac{K}{B} g \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (4.1.20)$$

შესაბამისად, დაუმყარებელი მოძრაობის წრფივ განტოლებათა სისტემას, როცა $a \approx 1,0$, აქვს სახე

$$\begin{cases} \left(\frac{dl}{dt} \right)^2 - 2V \frac{dl}{dt} + V^2 - \frac{g\omega K}{B} = 0 \\ \left(\frac{dl}{dt} - V \right) \left[\frac{dV}{dt} - g \left(1 - \frac{V^2}{c^2 R K^2} \right) \right] - \frac{Kg}{B} \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (4.1.21)$$

(4.1.21) განტოლებათა სისტემის ამოხსნით $\frac{dl}{dt}$ -სთან კავშირში:

$$\frac{dl}{dt} = V \pm \sqrt{\frac{g\omega K}{B}}. \quad (4.1.22)$$

$\frac{dl}{dt}$ -ს მნიშვნელობას თუ შევიტანთ (4.1.21) განტოლებათა სისტემის

მეორე განტოლებაში, მივიღებთ განტოლებათა სისტემას, როცა

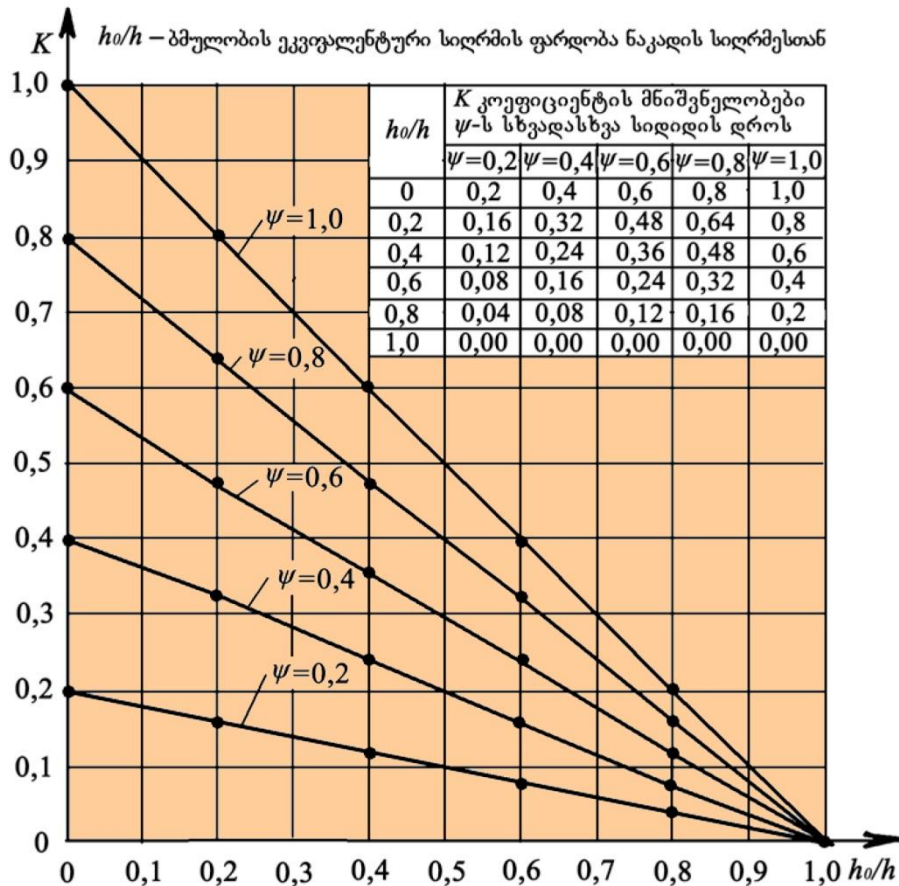
$$\begin{cases} dl = \left(V + \sqrt{\frac{g\omega K}{B}} \right) dt \\ dV + \sqrt{\frac{Kg}{B\omega}} = g \left(1 - \frac{V^2}{c^2 R K^2} \right) dt \end{cases} \quad (4.1.23)$$

როცა

$$\begin{cases} dl = \left(V - \sqrt{\frac{g\omega K}{B}} \right) dt \\ dV - \sqrt{\frac{Kg}{B\omega}} = g \left(1 - \frac{V^2}{c^2 R K^2} \right) dt \end{cases}, \quad (4.1.24)$$

$$\begin{cases} dl = \left(V + \sqrt{\frac{g\omega K}{B}} \right) dt; \\ dl = \left(V - \sqrt{\frac{g\omega K}{B}} \right) dt. \end{cases} \quad (4.1.25)$$

(4.1.25) განტოლებათა სისტემაში K კოეფიციენტი წარმოადგენს ღვარცოფულობის მახასიათებელ პარამეტრს. როცა მისი მნიშვნელობა $K = 1$, (4.1.25) განტოლებათა სისტემის თითოეული მათგანი ემთხვევა წყლის გრძელი ტალღის ფორმით მოძრაობის შემთხვევებს. თვალსაჩინოების მიზნით მოგვყავს გრაფიკული დამოკიდებულება $K = f(h_0/h)$ – კავშირში შინაგანი ხახუნის კოეფიციენტის სხვადასხვა მნიშვნელობების დროს (ნახ. 10).



ნახ. 10. გრაფიკული დამოკიდებულება $K = f(h_0/h)$; $K = (1 - h_0/h)\psi$

მიღებული განტოლებათა სისტემის ამოხსნა ხდება გადამკვეთი ხაზების ორი ოჯახის – მახასიათებელთა ბადით, რომელიც წარმოადგენს ყველა მცირე მოსალოდნელი ტალღის გავრცელების შესაძლებლობას, რომელსაც შეუძლია დაარღვიოს ტალღა, რომელიც განისაზღვრება 4.1.12) განტოლებათა სისტემით.

მიღებული განტოლებათა სისტემების ფიზიკური არსი შემდეგში

მდგომარეობს: (4.1.23) განტოლებათა სისტემა წარმოადგენს ნაკადის მიმართულებით გრძივი ტალღის განტოლებას, ხოლო (4.1.24) განტოლება წარმოადგენს უკუტალღის ფრონტის დიფერენციალურ განტოლებას; განისაზღვრება t , l , V და ω მახასიათებლები, რაც აკმაყოფილებს (4.1.23) და (4.1.24) განტოლებათა სისტემებს. ე.ი. პირდაპირი და უკუტალღების დიფერენციალური განტოლებების სისტემის სახით.

4.2. ტალღის გავრცელება ღვარცოფში

ღვარცოფი წარმოადგენს კალაპოტური ნაკადების ერთ-ერთ გამორჩეულ სახეობას, რომელსაც გააჩნია როგორც რეოლოგიური მახასიათებლების დიდ დიაპაზონში ცვლილების შესაძლებლობები, ასევე მოძრაობის მდგრადობის კარგვის განსხვავებული თავისებურებანი. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია მათ შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედება და დინამიკური დარტყმები. როცა შემხვედრ წინააღმდეგობათა სიმტკიცე და წინააღმდეგობის გაწევის შესაძლებლობები ნაკლებია მისი ზემოქმედების შესაძლებლობებზე, ხდება მისი ტალღის შემფოთება და მოძრაობის საწინააღმდეგო მიმართულებით ტალღის გავრცელება. ადგილი აქვს მოძრავ მასაში მისი სიგრძის გარკვეულ ნაწილზე დაძაბული მდგომარეობის შეცვლას მყისიერად და დინამიკური ტალღის წარმოქმნას.

შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ასეთი ნაკადების შეფასება და შემფოთების ზონის მახასიათებლების დადგენა აუცილებლად ნატურასთან მიახლოებული საანგარიშო სქემის საფუძველზე უნდა განხორციელდეს, რაც შესაძლებელს გახდის საინჟინრო ამოცანების პრაქტიკისათვის მისაღები სიზუსტით გადაწყვეტას.

აღნიშნულიდან გამომდინარე, შემფოთების ზონის გარემოში დრეკადი დეფორმაციების გავრცელების შესწავლის მიზნით განიხილება ცილინდრული ფორმის მქონე ღვარცოფული მასა.

მოძრაობის ვექტორისადმი შემხვედრი წინააღმდეგობის დაყენების შემთხვევაში ღვარცოფული მასის მასზე დაჯახების დროს მის ტანში

წარმოიქმნება შემფოთებული ზონა სიგრძით ΔL . როცა შემფოთების გავრცელების სიგრძეზე ტალღის გავრცელების სიჩქარე C , მასის მოძრაობის სიჩქარე V_0 -ის ტოლია, შემხვედრი წინაღობის რეაქცია გამოიწვევს მის კუმშვას ΔL_1 სიდიდით, ხოლო განივი კვეთის ცვლილებას $\Delta\omega = \omega - \omega_0$. შემფოთების ზონაში შემოსული ღვარცოფის მოცულობა ნაკადის უწყვეტობის პირობიდან გამომდინარე

$$\Delta W = Q\Delta t = \omega_0 V_0 \Delta t. \quad (4.2.1)$$

დრეკად-დეფორმაციული ხაზოვანი კანონის საფუძველზე პროპორციულობის ზღვრებში ღვარცოფის ტალღის შეფარდებითი კუმშვის სიდიდე, როცა დრეკადობის მოდული E -ს ტოლია

$$\frac{\Delta L_1}{\Delta L} = \frac{\Delta P}{E}, \quad (4.2.2)$$

შესაბამისად, ღვარცოფის შემფოთების შედეგად მიღებული მოცულობა

$$\Delta W_1 = \frac{\Delta P}{E} \Delta L \omega_0, \quad (4.2.3)$$

სადაც ΔW_1 – ღვარცოფის დაკავებული მოცულობაა შემფოთებული ზონის კუმშვის საფუძველზე;

ω_0, V_0 – ღვარცოფის ცოცხალი კვეთის ფართობი, მოძრაობის საშუალო სიჩქარე;

Δt – ღვარცოფის ტანში შემფოთების გავრცელების დრო;

ΔP – დინამიკური დარტყმის ძალის შესაბამისი წნევა;

E – ღვარცოფის დეფორმაციის მოდული.

(4.2.3) განტოლების მარჯვენ მხარეს გავამრავლებთ და გავყოფთ ერთი და იგივე მოცულობის შემთხვევაში

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_0} = \varepsilon_1 \quad (4.2.4)$$

და შესაბამისად, დრეკადობის მოდულების ფარდობა

$$E = E_0 \varepsilon_1; \quad (4.2.5)$$

სადაც E_0 – წყლის დრეკადობის მოდულია.

ღვარცოფის დრეკადობის მოდულის განსაზღვრა რთულ ამოცანათა კატეგორიას განეკუთვნება. თუ (4.2.5) გავითვალისწინებთ (4.2.2), გვექნება

$$\frac{\Delta L_1}{\Delta L} = \frac{\Delta P}{E_0 \varepsilon_1}. \quad (4.2.6)$$

შემფოთებით მიღებულ ზონაში გამჭიმავი ძალა ცდილობს ღვარცოფის ტანის შემფოთებული ნაწილის გარღვევას მისი დინამიკური ღერძის მართობულად, რასაც ეწინააღმდეგება სტრუქტურული კავშირების ხახუნისა და შეჭიდულობის ძალების შედეგად წარმოქმნილი ეკვივალენტური სისქე.

დარტყმის შედეგად შემფოთებული ზონის გაჭიმვით ადგილი აქვს მისი განივი კვეთის ზომების შემცირებას $e = \Delta\omega/\omega_0$ სიდიდით.

თუ შეფარდებით დეფორმირებით მიღებულ გვერდით კუმშვას წარმოვადგენთ დამოკიდებულებით, როცა კუმშვის კოეფიციენტის მნიშვნელობა σ -ს ტოლია

$$\frac{\Delta L_1}{\Delta L} = e\sigma = \sigma \frac{\Delta\omega}{\omega}, \quad (4.2.7)$$

შემფოთებით გამოწვეული განივი კვეთის ცვლილება

$$\omega + \Delta\omega = \omega_0(1 + e), \quad (4.2.8)$$

გაჭიმვით ცოცხალი კვეთის ცვლილება მის სიგრძესთან კავშირში

$$\Delta L - \Delta L_1 = \Delta L(1 - \sigma e), \quad (4.2.9)$$

შემფოთებული ზონის მოცულობა

$$W_2 = \omega_0 \Delta L [1 + e(1 - 2\sigma) + e^2 \sigma^2 - 2e\sigma] - e^3 \sigma. \quad (4.2.10)$$

(4.2.11) განტოლებაში მცირე სიდიდეთა უგულებელყოფის საფუძველზე შემფოთებული ზონის მოცულობა

$$W_2 = \omega_0 \Delta L [1 + e(1 - 2\sigma)]. \quad (4.2.11)$$

გაჭიმვით მიღებული მოცულობის ნაზრდი საწყის მოცულობასთან შეფარდებით

$$\Delta W_2 = \frac{\Delta P}{L_0 \varepsilon_1} \frac{1 - 2\sigma}{\sigma} \omega_0 \Delta L. \quad (12)$$

შეშფოთებული ზონის ნაზრდის მოცულობის გატოლება შემოსული ღვარცოფის მასასთან იძლევა

$$\frac{V_0}{C} = \frac{\Delta P}{L_0 \varepsilon_1} \frac{1-2\sigma}{\sigma}. \quad (4.2.13)$$

შეშფოთებული ზონის მასის მიმართ გარე ძალის იმპულსი

$$\Delta P = \rho C V_0 + \rho V_0^2. \quad (4.2.14)$$

(4.2.14) განტოლებაში, რადგან ტალღის გავრცელების სიჩქარე გაცილებით მეტია ნაკადის მოძრაობის საშუალო სიჩქარეზე

$$V_0 = \frac{\Delta P}{\rho C}. \quad (4.2.15)$$

(4.2.15) ის გათვალისწინებით (4.2.12)-ში ტალღის გავრცელების სიჩქარის სრული მნიშვნელობა ღვარცოფის ტანში, რადგან E_0 / L

$$C = \sqrt{\varepsilon_1 \frac{E_0}{\rho_0} \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\sigma}{1-2\sigma}}, \quad (4.2.16)$$

შესაბამისად ღვარცოფულ მასაში მისი სიდიდე

$$C = C_0 \sqrt{\varepsilon_1} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho} \frac{\sigma}{1-2\sigma}}. \quad (4.2.17)$$

ჩატარებული კვლევების საფუძველზე ღვარცოფის გვერდითი კუმშვის კოეფიციენტი

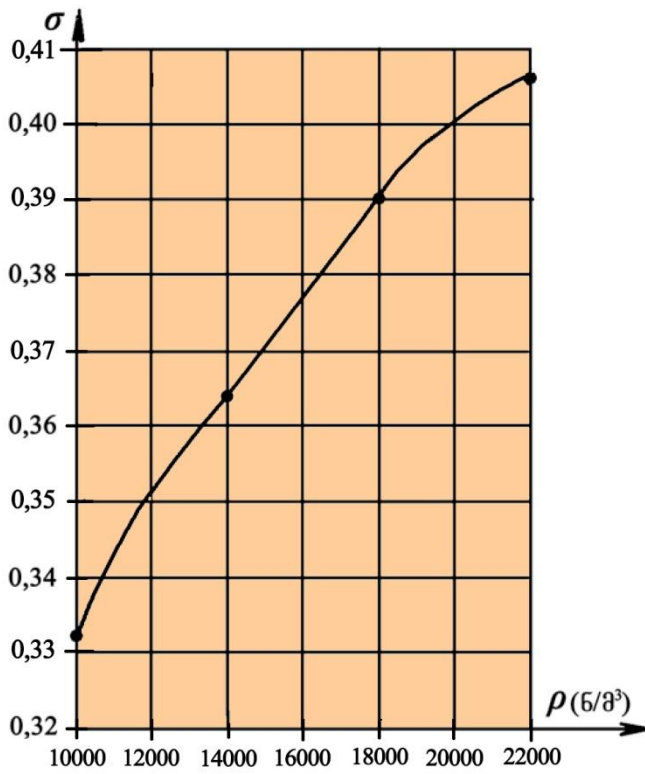
$$\sigma = \frac{\rho}{\rho_0 + 2\rho}. \quad (4.2.18)$$

თვალსაჩინოების მიზნით ღვარცოფის გვერდითი კუმშვის კოეფიციენტი ცვლილების სიმკვრივესთან კავშირში გრაფიკულად მოცემულია ნახაზზე (ნახ. 11).

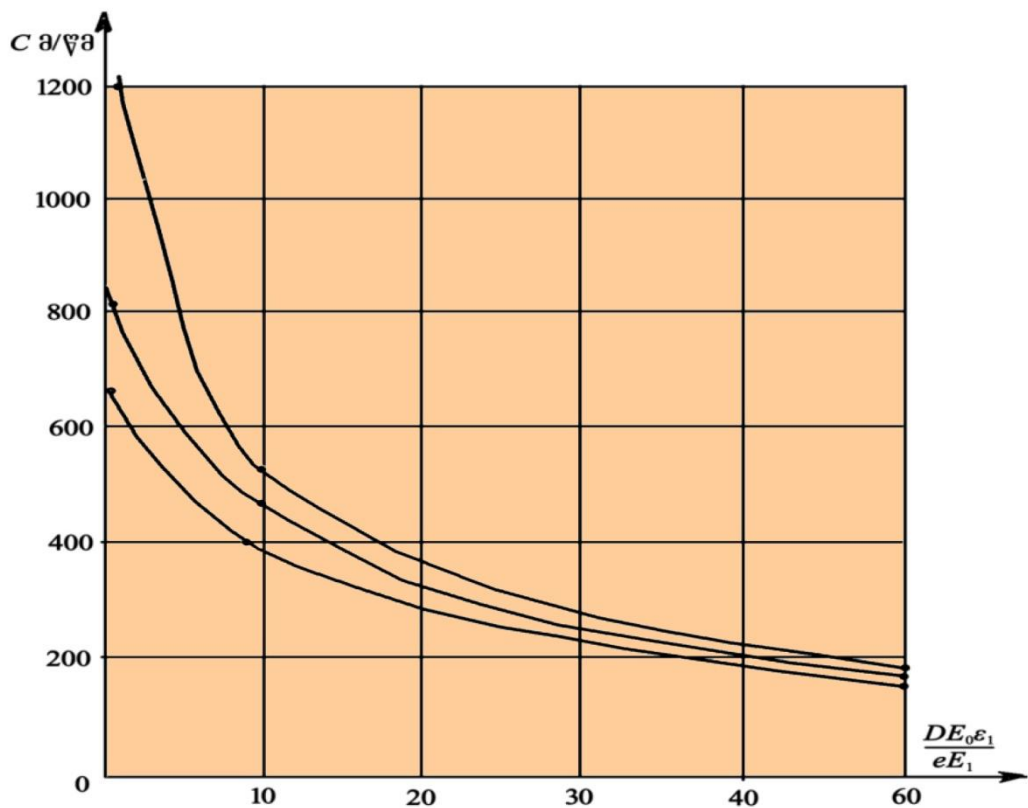
(4.2.17)-ის გათვალისწინებით (4.2.16)-ში ღვარცოფის ტალღის გავრცელების სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულება მიიღებს სახეს:

$$C = \sqrt{\frac{E_0 / \rho_0 \varepsilon_1}{1 + D E_0 \varepsilon_1 / e E_1}}. \quad (4.2.18)$$

(4.2.18)-ის გრაფიკული ილუსტრაცია, როცა $h_0 / h = 0$ -ს, სხვადასხვა $D E_0 \varepsilon_1 / e E_1$ მნიშვნელობების დროს მოცემულია ნახაზზე (ნახ. 12).



ნახ. 11. კუმშვის კოეფიციენტის სიმკვრივესთან დამოკიდებულების გრაფიკი $\sigma = f(\rho)$



ნახ. 12. ღვარცოფის ტანში ტალღის გავრცელების სიჩქარის დამოკიდებულება მის მახასიათებლებთან კავშირში

გვერდითი კუმშვის კოეფიციენტის სიდიდე სხვადასხვა მასალისათვის ერთმანეთისგან არის განსხვავებული და იცვლება ფიზიკური მდგომარეობის მიხედვით. კვლევის შედეგად მიღებული გვერდითი კუმშვის კოეფიციენტის მნიშვნელობები კარგ თანხვედრაშია პლასტიკური თიხების ანალოგიურთან ცვლილების ზღვრებთან. გრაფიკული ილუსტრაციიდან გამომდინარე, წყლის მამაში ტალღის გავრცელების სიჩქარისგან განსხვავებით, ეს მაჩვენებელი მნიშვნელოვნად მცირდება და რეოლოგიური პარამეტრების ფუნქციას წარმოადგენს. სტრუქტურული კავშირების მახასიათებელი პარამეტრების მნიშვნელობები, კერძოდ, ხახუნის კოეფიციენტისა და შეჭიდულობის ძალების კოეფიციენტის გაზრდის შედეგად ტალღის გავრცელების ფარდობითი სიდიდის მაქსიმალური მნიშვნელობა დაახლოებით 6-ჯერ და უფრო მეტად არის გაზრდილი, ხოლო როცა პარამეტრების გავლენა 0-ის ტოლი ხდება, ასეთ შემთხვევაში ტალღის გავრცელების სიჩქარის სიდიდე წყალში გავრცელებული ტალღის სიჩქარის ტოლია.

4.3. ტალღის ფორმით მოძრავი ღვარცოფის მახასიათებლები

ღვარცოფსადინარში ნაკადის ჰიდრავლიკური პარამეტრები და კალაპოტის მორფომეტრია ხშირად შეუსაბამო კავშირშია. ადგილი აქვს სადინარის კალაპოტის დეფორმაციას და მწყობრიდან გამოსვლას. გარდა ზემოაღნიშნულისა, დეფორმაციის განვითარების გამომწვევ მიზეზად შეიძლება კალაპოტების გაგანიერებული ან შევიწროებული უბნები იქნეს მიჩნეული. ასეთ სურათს შესაძლებელია ადგილი ჰქონდეს ისეთ შემთხვევაშიც, როცა ნაკადის რეგულირება აქტიური განივი ნაგებობებით ხდება.

კალაპოტის შევიწროება-გაფართოების ადგილებში ნაკადის სიღრმეთა ცვალებადობის პროცესს, კერძოდ მატებას ან შემცირებას თუ მივიჩნევთ გაჭიმვა-კუმშვის მოვლენად, მაშინ ფარდობითი დეფორმაციები, რომელსაც შეესაბამება ნაკადის ზემოთ აღნიშნული პროცესი, შესაძლებელია შეფასდეს ფარდობითი დეფორმაციის კოეფიციენტით.

შემადგენელ კომპონენტთა თანაფარდობაზეა დამოკიდებული ღვარცოფთა დინამიკის დაძაბული მდგომარეობის, აქტიური და პასიური წნევების სურათი ჰიდროტექნიკურ ნაგებობაზე ნაკადის მოძრაობის რეჟიმების ცვლილების და მდგრადობის დაკარგვის დაწყების და გამოტანის კონუსზე გაჩერების შესაძლებლობები.

კრიტერიალური საზღვრების უმნიშვნელო ცვლილებითაც კი ღვარცოფის ერთი სახიდან მეორეში გადასვლა ღვარცოფულობიდან გამომდინარე შემადგენელ კომპონენტთა ცვლილება უნდა აკმაყოფილებდეს წონითი თანაფარდობის ზღვრებს. წყლისა და მილიმეტრიან ნაწილაკებს შორის წონითი თანაფარდობის ზღვრები – $0,49 > \frac{P_{\text{წყ}}}{P_{\text{მ}}} > 0$, წყლის წონის ფარდობა მთლიან მასასთან – $0,1R \leq \frac{P_{\text{წყ}}}{P_{\text{მ}}} < 0,20$ და მილიმეტრიანი და მასზე ნაკლები ზომის ნაწილაკების წონის ფარდობა მყარ მასასთან – $0,45 > \frac{P_{\text{მ}}}{P_{\text{მყ}}} > 0,23$.

ღვარცოფთა მდგრადობის საკითხი შესაძლებელია შეფასდეს იმ შემთხვევაში როცა ცნობილია მათი დინებათა კანონზომიერება. ნაკადის სადინარებში მოძრაობის მათი ფორმის მრავალფეროვნებისა და მასში შემადგენელი კომპონენტების ცვლილების გამო ადგილი აქვს განსხვავებული რეჟიმებით მოძრაობას, ერთი სახიდან მეორეში გადასვლის და თავისუფალი ზედაპირის სხვადასხვა ფორმით მოძრაობის შემთხვევების პროცესი ძალზე რთულია და მისი აღწერის მიზნით ხშირად გამოყენებულია დამყარებული მოძრაობის განტოლებები [103, 104].

პროცესი კიდევ უფრო რთულდება ღვარცოფთა შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების დროს და მდგრადობის საკითხები კიდევ უფრო აქტიური ხდება, ადგილი აქვს ნაკადის სტრუქტურის რღვევას, მოძრაობის რეჟიმის ცვლილებას და მისი მოძრაობის სხვადასხვა რეჟიმებით ჩამოყალიბებას. როცა შემხვედრი წინააღმდეგობების ზემოქმედება ნაკადზე უმნიშვნელოა, ასეთ შემთხვევაში ადგილი აქვს ნაკადის გრძივი ტალღის ფორმით მოძრაობას. როცა შემხვედრი წინააღმდეგობის ზემოქმედება მნიშვნელოვანია,

ასეთ შემთხვევაში ადგილი აქვს შემფოთებული ზონის და ნაკადში დინამიკური ტალღის წარმოქმნას. ნაკადის სტრუქტურის რღვევის საკითხი განსაკუთრებულად საყურადღებოა იმ შემთხვევაში, როცა მისი ტრანზიტი ღვარცოფსადინარებით ხდება, ადგილი აქვს სადინარის ფორმის გავლენას მის მდგრადობაზე, იწვევს ნაკადის ტანის კუმშვას ან გაფართოებას. წყალთან შედარებით ღვარცოფებში ეს პროცესი მნიშვნელოვანია და გარკვეულ გავლენას ახდენს ნაგებობათა საპროექტო მაჩვენებლების დროს [1, 50,51, 69, 105, 106, 107].

შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ღვარცოფის ზემოქმედების დროს შემფოთებული ზონის წარმოქმნა და მის ტანში ტალღის წარმოქმნის შესაძლებლობა მოითხოვს მახასიათებელთა პარამეტრების სიდიდეთა საანგარიშო დამოკიდებულებებს. ღვარცოფში გამოვლენილი ტალღის გავრცელების სიჩქარის განსხვავებულობა ნიუტონის სითხეებთან შედარებით სამჯერ ნაკლებია დიფერენციალურ განტოლებათა შედეგებზე.

საინჟინრო თვალსაზრისით აუცილებელია სადინარების და სარეგულაციო ნაგებობების დაპროექტება ისეთი კრიტერიუმების გათვალისწინებით განხორციელდეს, როცა არ ხდება ნაკადის მდგრადობის რღვევა და მდგრადობის კოეფიციენტის ნორმატივებიდან გადახრა. წინააღმდეგ შემთხვევაში შესაძლებელია სადინარში წარმოიქმნას ან შეიძლება ადგილი ჰქონდეს სადინარის კალაპოტის დეფორმაციებს [72].

ღვარცოფთა რეგულირების სირთულეები სადინარებში მათი მოძრაობის დროს კალაპოტურ პროცესებზეა დამოკიდებული. აქედან გამომდინარე, ნაკადის სადინარში ისეთი ენერგეტიკული მახასიათებლებით უნდა მოძრაობდეს, როცა მაჩვენებლები შერწყმულია კალაპოტის მორფომეტრიასთან.

ღვარცოფთა მრავალწლიური შესწავლის ისტორია საშუალებას იძლევა დასაშვები სიზუსტით გამოყვანილ იქნეს ისეთი სახის საანგარიშო დამოკიდებულებები რომელთა გამოყენებით გახდება ნაკადის მოძრაობის მიმართულების როგორც ენერგეტიკული მახასიათებლების პროგნოზი, ასევე ნაკადის მოძრაობის რეჟიმის ცვალებადობა. შესაბამისად საინჟინრო

გადაწყვეტათა შერჩევა და ცალკეული შემთხვევების გათვალისწინება მარტივი ფორმით განხორციელდება.

სატრანზიტო მონაკვეთზე ნაკადზე ყოველგვარი შემხვედრი წინააღმდეგობის ზემოქმედება იწვევს მისი მოძრაობის პირობების შეცვლას და ამავე დროს იცვლება მისი კრიტიკული მახასიათებლები. როცა ტალღის სიჩქარე ნაკადის გადაადგილების სიჩქარის ტოლია, ასეთ შემთხვევაში მოძრაობის რეჟიმების ცვლილების შეფასება კრიტერიალური მაჩვენებლებით ხდება და ეს მაჩვენებელი ჰიდრავლიკაში წარმოდგენილი საშუალო კინეტიკური ენერჯის პოტენციურთან ფარდობის სიდიდით ხდება.

მთის რელიეფის პირობებში მიწის კაშხლის გარღვევა იწვევს დიდი გამრეცხი ენერჯის მქონე გამრღვევი ტალღის წარმოქმნას, რომელიც სწრაფად გარდაიქმნება ღვარცოფულ ნაკადად.

კაშხლის გარღვევის შედეგად წარმოქმნილი ტალღის ხარჯი დონის დაწევის სიჩქარისა და მისი შესაბამისი სიღრმის ნამრავლის ტოლია. დონის დაწევა გარღვევის დროს H საწყისი სიმაღლიდან $h = h_c$ კრიტიკულ სიღრმემდე ხდება და ნაკადის სიჩქარე ამ სიდიდეთა ცვლილების ფუნქციაა, ე.ი.

$$V = V_0 \pm 2\sqrt{gH} \mp 2\sqrt{gh}, \quad (4.3.1)$$

შემხვედრი ნაკადისადმი ტალღის საწინააღმდეგო მიმართულებით გავრცელების შემთხვევაში სიჩქარე, როცა მისი საწყისი მნიშვნელობა 0-ის ტოლია, შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი ფორმულით:

$$V = -2\sqrt{gH} + 2\sqrt{gh}. \quad (4.3.2)$$

შესაბამისად, ღვარცოფის ხარჯი

$$q = Vh = h(-2\sqrt{gH} + 2\sqrt{gh}). \quad (4.3.3)$$

როცა ტალღის სიმაღლე მნიშვნელოვანია, ტალღის სიჩქარესა და ნაკადის მახასიათებლებს შორის დამოკიდებულება C , კალაპოტის ფუძის ჰორიზონტთან α კუთხით დახრის შემთხვევაში იქნება:

$$C = \sqrt{gh \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \varphi \cos \alpha} \left(1 + \frac{3\Delta h}{4h} \frac{1}{\left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \varphi}\right), \quad (4.3.4)$$

სადაც C – არის ტალღის გავრცელების სიჩქარე (მ/წმ);

g – სიმძიმის ძალის აჩქარება (მ/წმ²);

h_0 – ბმულობის შესაბამისი ეკვივალენტური სიღრმე (მ);

φ – კოეფიციენტი, რომელიც შინაგანი ხახუნის კუთხის ფუნქციას ასრულებს;

Δh – ტალღის გავრცელების სიჩქარე;

h – ნაკადის სიღრმე (მ).

როცა ტალღის სიმაღლე უმნიშვნელოა, $\Delta h = 0$, მაშინ ტალღის სიჩქარე

$$C = \sqrt{gh \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \cos \alpha \varphi}, \quad (4.3.5)$$

როცა ტალღის სიმაღლე უმნიშვნელოა $\Delta h = 0$, მაშინ

$$\frac{h}{H} = \frac{4}{\left(2 + \sqrt{\left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \varphi \cos \alpha}\right)^2}, \quad (4.3.6)$$

როცა რეოლოგიური მახასიათებლები $h_0 = 0$, $\varphi = 1$, მაშინ

$$\frac{h}{H} = \frac{4}{\left(2 + \sqrt{\cos \alpha}\right)^2}, \quad (4.3.7)$$

როცა $\alpha = 0$, $h_0 \neq 0$, $\varphi \neq 0$

$$\frac{h}{H} = \frac{4}{9} \frac{4}{\left(2 + \sqrt{\varphi}\right)^2}, \quad (4.3.8)$$

როცა $\alpha = 0$, $\varphi = 1$, $h_0 = 0$

$$\left(\frac{h_0}{H}\right) = \frac{4}{9}, \quad (4.3.9)$$

დასკვნები

- ღვარცოფული ამოცანების და მაგალითების განხილვით მოყვანილია ის ძირითადი შედეგები, რომლებიც შემოთავაზებულია ჰიპერკონცენტრირებული ნაკადების დინამიკისა და ტალღური მოძრაობის შესწავლის დარგში, რომელსაც უპირატესად აქვს ადგილი მათი ფორმირებისა და სხვადასხვა სახის შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების დროს;
- ღვარცოფული პროცესების დინამიკის საკითხების ინტერპრეტირების დროს გამოყენებულია მოვლენის ახსნა ერთგანზომილებიან მოდელებზე დაყრდნობით, რომლებიც შედარებით მარტივია, ხოლო პრაქტიკული თვალსაზრისით სავსებით მისაღები. ტალღური რეჟიმით მოძრაობას საფუძვლად უდევს თანაბარი მოძრაობის აბსტრაქტული მოდელი და იგი წარმოადგენს როგორც გარკვეულ ეტაპს ღვარცოფების დინამიკისათვის დამახასიათებელი რთული ამოცანების გადაწყვეტის გზაზე;
- ინოვაციურ მეთოდოლოგიაზე დაყრდნობით შემოთავაზებულია ღვარცოფული ნაკადების ფიზიკურ-მექანიკური და დინამიკური მათემატიკური მოდელების აგების პრინციპები, რომელთა ბუნება მნიშვნელოვნად განსხვავდება ჩვეულებრივი ბლანტი სითხეებისთვისებისაგან;
- აღწერილია ღვარცოფული ნაკადების დამზრისა და მოძრაობის განმსაზღვრელი პარამეტრები, კერძოდ დამყარებული და დაუმყარებელი მოძრაობის;
- ღვარცოფის გავლის შემთხვევაში აუცილებელია განხორციელდეს ღვარცოფსადინარების მიმდებარე ტერიტორიებზე შედეგების პროგნოზირება, რომელიც საფუძვლად დაედება გარემოს დაცვის მეთოდების სრულყოფას. როგორც თერგის წყალშემკრები აუზის ღვარცოფულობის შესწავლის კვლევებმა დაადასტურა, აღნიშნული ზონისთვის დამახასიათებელია ღვარცოფწარმომქმნელი კერების მაღალი

ენერგეტიკული პოტენციალი, მდგრადობის განმსაზღვრელი რეოლოგიური პარამეტრების შემცირების განმსაზღვრელ ძირითად ფაქტორს კლიმატური, ტექნოგენური, კერაში განლაგებული ქანების გამოფიტვა წარმოადგენს;

- ღვარცოფთა შემხვედრი ზემოქმედების სიზუსტის და მდგრადობის შეკრების მიზნით შემოთავაზებულია დაუმყარებელი არათანაბარი მოძრაობის მოდელი დიფერენციალური განტოლების სახით. როგორც სადინარის კალაპოტის პრიზმატულობის, ისე არაპრიზმატულობის შემთხვევაში, როგორც ცვლადი, ისე მუდმივი ხარჯის დროს. განსაზღვრულია მოძრაობის რეჟიმების სხვადასხვა შემთხვევისათვის თანაბარი, კრიტიკული მდგომარეობის განმსაზღვრელი პარამეტრები. შეფასებულია ღვარცოფული მასის მოძრაობის რეჟიმების ცვლილების განმსაზღვრელი კრიტერიუმები;
- კერიდან ღვარცოფული მასის ტალღის ფორმით მოძრაობის და მდგრადობის რღვევის მათემატიკური მოდელი მიღებულია მრავალკომპონენტურობის გათვალისწინებით. მიღებულია ტალღის ფორმით ჩამოყალიბებული ღვარცოფის ზედაპირის და ხარჯის სანგარიშო დამოკიდებულებები. კერიდან ღვარცოფის დამკრის და უძრაობის პირობები შეფასებულია ბმულობის გათვალისწინებით. ტალღის ფორმით ჩამოყალიბების შემთხვევაში შეფასებულია მოძრავი ნაკადის სიჩქარის თანაბრად მოძრაობის შედარება და მისი სიდიდე 3-ჯერ ჭარბობს საშუალო სიჩქარის მნიშვნელობას. შემოთავაზებულ მოდელზე დაყრდნობით განსაზღვრულია სიმძლავრე ღვარცოფის კერიდან დამკრის დროს;
- კერიდან ღვარცოფის მდგრადობის რღვევის და პროცესის შეფასების მიზნით გამოყენებულია როგორც მისი დამაბულობა ისე კერიდან მიღებული ხარჯის სიდიდე და კვაზი-ერთგვაროვნობიდან გამომდინარე, შერჩეულია შეფასების მარტივი მეთოდები და მათემატიკური მოდელები. საანგარიშო სქემის პირველი ვარიანტის შერჩევის დროს გამოყენებულია გრუნტების მექანიკაში გამოყენებული ანალოგიები.

ღვარცოფულ მასაში ძაბვის გავრცელების და ბმულობის განმსაზღვრელი ეკვივალენტური მახასიათებლები ფარდობით მაჩვენებლებშია აღებული. ბმულობის ეკვივალენტური სიღრმისა და კერის სრული სიმაღლის ცვლილების შესაძლებლობა მასის შინაგანი ხახუნის კუთხითაა წარმოდგენილი;

- მიღებულია წონასწორული მდგომარეობის საანგარიშო ფორმულა საანგარიშო სქემის მე-2 ვარიანტის შერჩევის დროს, როცა კერიდან ადგილი აქვს ღვარცოფის ნაკადად ჩამოყალიბების შეფასებას, კრიტიკურად გამოყენებულია კერიდან ხარჯის მიღების მოდელი. კერიდან ღვარცოფის დაძვრას ადგილი აქვს იმ შემთხვევაში, როცა ბმულობის ეკვივალენტური სიღრმე კერის სიღრმის 0,9 ნაწილზე ნაკლებია;
- მოძრაობაში მყოფი ღვარცოფის შემთხვევაში, როცა ადგილი აქვს თანაბარი მოძრაობის მდგრადობის დაკარგვას და მის ტალღის ფორმით მოძრაობაში გარდასახვას. შეფასებულია ღვარცოფისა, ნიუტონური სითხეების და რეინოლდსის რიცხვების შედარება. ასეთ შემთხვევაში ღვარცოფის რეინოლდსის რიცხვი გაცილებით ჭარბობს ნიუტონური სითხეების რეინოლდსის მაჩვენებლებს და ბმულობისა და შინაგანი ხახუნის შემცირების შედეგად მის მაჩვენებელს ჰიპერბოლური სახე აქვს;
- სადინარებში ღვარცოფთა მოძრაობის დროს დამახასიათებელია მოძრაობის რეჟიმების, კერძოდ, წყნარიდან მძაფრში ან პირიქით, გადასვლის შემთხვევები და მდგრადობის კარგვის და შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების შესაძლებლობები. პრიზმატული სადინარებისათვის ნაკადის კუმშვა გაჭიმვაზე გამოწვეული დეფორმაციების გათვალისწინებით გამოყვანილია შემხვედრ წინააღმდეგობაზე დინამიკური ზემოქმედების საანგარიშო ფორმულა. ნაკადის მდგრადობის დაკარგვის შესაძლებლობა თანაბარი ძრაობიდან ტალღურში გადასვლის დროს შეფასებულია მდგრადობის დარღვევის შესაძლებლობა და წყალთან შედარებით მდგრადობა გაცილებით

დიდია და რეჟიმების შეცვლის შესაძლებლობა უფრო მაღალი ხარისხით ხასიათდება;

- ერთგანზომილებიანი დაუმყარებელი მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებაზე და კვეთის ენერგიაზე დაყრდნობით ნაკადის მოძრაობის რეჟიმებიდან გამომდინარე, შეფასებულია კრიტიკული მდგომარეობა და რეოლოგიასთან კავშირში მიღებულ საანგარიშო მოდელზე დაყრდნობით, კრიტიკული მდგომარეობის შეფასების მიზნით, მოცემულია მისი გრაფიკულად განსაზღვრის შესაძლებლობა;
- უტოლობის სახით მიღებული კრიტერიუმის საფუძველზე, კინემატიკური კოეფიციენტთან კავშირში დადგენილია მდგომარეობის და სიმძაფრის ან სიწყნარის შესაძლებლობები. გამოყვანილია კრიტიკული მდგომარეობის განსაზღვრელი პარამეტრების, კერძოდ სიღრმის, ქანობის, სიჩქარის ხარჯის მოდულის საანგარიშო დამოკიდებულებები სადინარის კალაპოტის ფორმების გათვალისწინებით;
- ღვარცოფთა გაანგარიშების მეთოდებისა და მეთოდოლოგიის სრულყოფის მიზნით შემოთავაზებულია გრძივი ტალღის ფორმით მოძრაობის მოდელი. დაუმყარებელი მოძრაობის განტოლებაზე დაყრდნობით მიღებულია დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა და ინოვაციურ მეთოდოლოგიაზე დაყრდნობით მიღებულია, როგორც ნაკადის ფრონტის/ ისე საწინააღმდეგო მიმართულების გრძივი ტალღის დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა;
- ღვარცოფის მასაში ტალღის გავრცელების შეფასების მიზნით შემოთავაზებულია მოდელი შემხვედრ წინააღმდეგობებზე მათი ზემოქმედებისას. მიღებულია ტალღის გავრცელების სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულება და მათი წინააღმდეგობების კუმშვის შესაძლებლობები. დადგენილია, რომ ღვარცოფში ტალღის გავრცელების სიჩქარე წყალთან შედარებით მცირდება და მისი მაქსიმალური მნიშვნელობა 7-ჯერ ჭარბობს აღნიშნულს;
- ტალღის ფორმით მოძრავი ღვარცოფისათვის გამოყვანილია ტალღის

სიჩქარის, ხარჯის, მოძრავი ნაკადის სიღრმის საწყისთან ფარდობის სხვადასხვა შემთხვევები რეოლოგიასთან კავშირში და მათი სიზუსტე შემოწმებულია წყალთან გამოყენებული მოდელებზე შედარების დროს.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. М., 1955, т. 2, 323 стр.
2. გავარდაშვილი გ. მდინარე დურუჯის აუზში ეროზიულ-ღვარცოფული პროცესების პროგნოზირება და მათი საწინააღმდეგო საინჟინრო-ეკოლოგიური ღონისძიებები. თბილისი, „მეცნიერება“, 2003 წ., გვ.116.
3. გავარდაშვილი გ. ქალაქ ყვარლის მოსახლეობის უსაფრთხოების უზრუნველყოფის მიზნით მდინარე დურუჯის კალაპოტში 2012 წლის მაისის თვეში განხორციელებული საველე კვლევის შედეგები. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული №67. თბილისი, 2012 წ., გვ. 22–31.
4. გავარდაშვილი გ. მდინარე დურუჯის ეკოლოგიური პრობლემები და გარემოსდამცავი ინოვაციური ღონისძიებები. თბილისი, გამომცემლობა „უნივერსალი“, 2018 წ., 262 გვ.
5. სუპატაშვილი თ. მდინარე დურუჯის აუზის ეკოლოგიური პრობლემები. XVIII საერთაშორისო კონფერენციის „გარემოს დაცვა, ბიოლოგიური და ეკოლოგიური მეცნიერებები და ინჟინერია“ სამეცნიერო შრომები, ბარსელონა, ესპანეთი, 2016 წ., გვ. 9–16.
6. Великанов М.А. Качественный динамический анализ селевого потока. Москва, изд-во АН СССР, серия "География и геофизика", т. 9, №4, 1945, стр. 353-363.
7. დანელია რ., კუხალაშვილი ე. ბმული ღვარცოფის დაუმყარებელი მოძრაობა. კალაპოტური პროცესების სამილსადენო ტრანსპორტისა და ჰიდროტექნიკური ნაგებობების ჰიდრავლიკისა და ჰიდროტექნიკის საკითხებზე სამეცნიერო კონფერენციების შრომები. თბილისი, 2000 წ., გვ. 43-45.
8. კუხალაშვილი ე. ბმული ღვარცოფის თავისუფალი ზედაპირის განტოლება პრიზმატულ კალაპოტებში დამყარებული არათანაბარი მოძრაობის დროს. საქართველოს სახელმწიფო აგრარული უნივერსიტეტის 70 წლისადმი მიძღვნილი სამეცნიერო კონფერენცია. თბილისი, 2000 წ., გვ. 370-375.
9. კუხალაშვილი ე., დანელია რ. ბმული ღვარცოფის დაუმყარებელი მოძრაობის სასრულო სხვაობანი განტოლებები. საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის წყალეკოლოგიის ინსტიტუტის სამეურნეო შრომათა კრებული. თბილისი, 2001 წ., გვ. 116-118.
10. მამასახლისი ჟ., კუხალაშვილი ე., ომსარაშვილი გ. არაპრიზმულ

კალაპოტებში მუდმივი სიღრმის ბმული ღვარცოვის მოძრაობის განტო-
ლება. სამეცნიერო შრომათა კრებული „აგრარული მეცნიერების პრობ-
ლემები“, ტ. XII, თბილისი, 2001 წ., 26–34 გვ.

11. Гагошидзе М.С. Селевые явления и борьба с ними. Тбилиси, изд-во «Сабчота Сакартвело», 1970, 386 стр.
12. Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Л., Гидрометеоиздат, 1980, 144 стр.
13. Беручашвили Г.М. Метод определения максимальных расходов селевых потоков в момент их возникновения. В книге «Проблемы противоселевых мероприятий», Алма-Ата, 1979, стр. 40-45.
14. Мирцхулава Ц.Е. Оценка риска повреждения противоселевых сооружений. М., Труды ВНИИ ГиМ, вып. 4, 1975, стр. 48-62.
15. Войнич-Сяноженцкий Т.Г., Беручашвили Г.Н. К гидравлической теории потоков лавинного характера. Тр. ЗакНИИГиМ., вып. 37(43), 1970, стр. 29-69.
16. Кереселидзе Н.Б. К проблеме устойчивости течения потока и его твердых границ в размываемых грунтах. Тбилиси, „მეცნიერება“, Труды ТНИСГЭИ, вып.1, 1968, стр. 38-45.
17. ნათიშვილი ო., თევზაძე ვ., დანელია ზ. ღვარცოვისა და ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების ჰიდრავლიკა. თბილისი, 1995 წ., 70 გვ.
18. ნათიშვილი ო.გ., თევზაძე ვ.ი. Основы динамики селей, Тбилиси, 2007, 214 стр.
19. ნათიშვილი ო.გ., თევზაძე ვ.ი. Волны в селях. ООО Издательство «Науч-мехиздат», М., 2011, 160 стр.
20. ნათიშვილი ო.გ., კრუაშვილი ი.გ. «Экологические проблемы защиты объектов от вредного воздействия селевых потоков». Журн. „Экологические системы и приборы“, №7, М., 2015, стр. 20-30.
21. ნათიშვილი ო., ყრუაშვილი ი., გავარდაშვილი გ., ინაშვილი ი. მეთოდური რეკომენდაციები ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობის პროექტირებისათვის (ჰიდრავლიკური გაანგარიშებები). საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული აკადემია, თბილისი, 2016 წ., 48 გვ.
22. Иорданишвили З.С., Сохадзе Л.Д. К вопросу об ударном воздействии структурного селевого потока на сквозные сооружения. „Эрозионные и селевые процессы и борьба с ними“. вып. 3, М., 1974, стр. 48-54.

23. Тевзадзе В.Н., Каладзе Б.Л., Кухалашвили Е.Г. Критериальные значения сложности селевых смесей высокой плотности. Прогноз и борьба с эрозией почв. Сб. научных трудов НИИГиМ, Тбилиси, 1987, стр.119-125.
24. Херхеулидзе Г.И. К определению нагрузок от воздействия селевого потока на поперечные преграды. Тр. Зак. НИГМИ, вып. 40(46), Гидрометеоиздат, Л., 1972 г., стр. 76-113.
25. Херхеулидзе И.И. Овражные и селевые выносы, М., Дориздат., 1947, 97 с.
26. Хмаладзе Г.Н. Выносы наносов реками Черноморского побережья Кавказа, «Гидрометеоиздат», 1978, стр. 165-166.
27. Приудзе Д.К. Определение уклона остановки селевых потоков. В кн. №6, М., 1978, стр. 118-121.
28. Takahashi. Debris flow. Tailor & Francis Group, London, UK, 2007, 465 p.
29. Гавардашвили Г.В. – Разработка схем расположения противоселевых сооружений на горных реках. Труды международной конференции по селевым явлениям и некоторым смежным проблемам, Тбилиси, 2001, стр. 33-39.
30. Круашвили И.Г. Сели и методы борьбы с ними. Тбилиси, ГТУ, 2014, 338 с.
31. Кухалашвили Е.Г. Об адаптации законов механики неньютоновских систем для описания динамики трехслойной модели структурных (грязе-каменных) селевых потоков. Сообщения АН Груз. ССР, т. 112, 31, Тбилиси, 1983, стр. 113-116.
32. გავარდაშვილი გ., ჩახაია გ. საქართველოს ძირითადი ღვარცოფული ტიპის მდინარეთა აუზების ტიპოლოგია და მათი შეფასება. „საქჰიდრო-ეკოლოგიის“ ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული. თბილისი, 2005 წ. გვ. 12-19.
33. გუბელაძე დ. კალაპოტური ნაკადები და მათი მოძრაობის ზოგიერთი თავისებურება. სამეცნიერო შრომათა კრებული. მეცნიერების პრობლემები, საერთაშორისო კრებული. თბილისი, ერევანი. სსაუ 1999 წ.
34. Charbadze Z., **Dadiani K.**, Sukhishvili N., Diakonidze B. Formation of subsequent mudflows in erosion spots. VII International Scientific and Technical Conference “Modern Problems of Water Management, environmental Protection, Architecture and Construction”, August 25-27, 2017.
35. უნდილაშვილი ნ. ბმულ ღვარცოფთა რეგულირების ღვარცოფსადინარების მორფომეტრიული მახასიათებლები. სამეცნიერო შრომათა კრებული

- „აგრარულ მეცნიერებათა პრობლემები“, ტომი XXXVI. თბილისი. 2005 წ., გვ. 198-200.
36. ხუცურაული ბ. ბმული ღვარცოფის ფორმირება და საანგარიშო ხარჯის პროგნოზირება. სამეცნიერო შრომათა კრებული „აგრარულ მეცნიერებათა პრობლემები“ თბილისი. ტ. XIII, 2001 წ. გვ. 139-144.
37. კუხალაშვილი ე., გავარდაშვილი გ., ირემაშვილი ი., ბერაია ნ., **დადიანი ქ.**, კიკნაძე ხ., მაიასაია ლ. წყალსაცავების კვების წყაროთა ჰიდროლოგიური მახასიათებლები და მათი როლი წყლის ინტეგრირებულ მართვაში. საქართველოს სოფლის მეურნეობის აკადემია, სამეცნიერო-პრაქტიკული ინტერნეტ-კონფერენცია, „საქართველოს აგროსაინჟინრო სექტორის სტაბილიზაციისა და განვითარების პრიორიტეტები კორონავირუსის პანდემიისა და მის შემდგომ პერიოდში“, 17-18 სექტემბერი, 2020 წ., თბილისი, გვ. 149-159.
38. Кухалашвили Э.Г. К оценке гранулометрического состава селевого потока. Республиканская научная конференция молодых ученых и аспирантов на тему «Водохозяйственное строительство и мелиорация в Грузии», Тезисы докладов, Тбилиси, 1982 г., стр. 18-19.
39. Кухалашвили Э.Г., Сичинава П.О., Ундилашвили Н.А. Условия движения многокомпонентных потоков. «Известия Аграрной Науки»; Т. 3, №4, Тбилиси, 2005, стр. 98-100.
40. Варганов М.В., Кечхошвили И.М., Бераиа Н.П., **Дадиანი К.**, Шогирадзе М. Количественная оценка влияния орошения на эффективность сельскохозяйственного производства. Wschodnio europejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal) №10(50), 2019, pp. 9-13.
41. Мирцхулава Ц.Е. Современные СТМИ возможности предсказания уязвимо-го состояния территории и объектов для катастрофических селей. Жур. Геоэкология №1, Тбилиси, 2006 г., ст. 57-65.
42. Сулаквелидзе Л.А. и др. Прохождение селевых потоков по руслу горного потока Шави Дуруджи 29.07.1956 г. Труды ГрузНИИГиМ, Тбилиси, 1957, вып. 18-19.
43. Варганов М.В., Кечхошвили И.М., Бераиа Н.П., **Дадиანი К.**, Кикнадзе Х.Л., Маисаиа Л.Д. Математические модели некоторых задач интегрального управления водными ресурсами. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.1.87, Европейский Союз Ученых. Серия: экономические и юридические науки. №6(87), 2021, стр. 3-7.

44. Шатберашвили Ф.А., Сичинава О.А., Сиамашвили А.П. Некоторые гидравлические и гидрометрические закономерности потока в устойчивых руслах. Сообщ. АН. Грузии, 1999 г., стр. 454-457.
45. Gubeladze D. The Transformation of Water Sector in Georgia. Annals of Agrarian Science №2, 2003, pp. 57-61.
46. Gubeladze D. Problems of fresh Water in industrial sector and methods of reduction their pollution. The 12 Stockholm Water Symposium, Abstract Volume, Sweden, 2002, pp. 99-101.
47. Kruashvili I., Inashvili I. Mathematical model of defining concentration and turbulent exchange coefficient in suspended streams. Annals of Agrarian Science, vol. 3, №1, 2005, pp. 98-102.
48. Katsarava T., Kupreishvili Sh., Sichinava P., **Dadiani K.** Hydromechanical model of catastrophic surface runoff discharge based on rheological parameters. GWMI-80, International Symposium "Floods and modern methods of control measures". 23-28 September, 20099 Tbilisi, Georgia, pp. 224-232.
49. კუპრეიშვილი შ., შურღაია ვ., სიჭინავა პ. ნიადაგ-გრუნტების ფილტრაციული მდგადობის კრიტერიუმები. წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული №66, თბილისი, 2011, გვ. 198-203.
50. ყრუაშვილი ი., კუხალაშვილი ე., ინაშვილი ი., ბზიავა კ., ნატროშვილი გ. ნიადაგ-გრუნტში წყლის ფილტრაციის ანომალიებთან დაკავშირებული საკითხების შესწავლა. სტუ-ის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტი, სამეცნ. შრომათა კრებული №67, 2012 წ., გვ. 231-236.
51. კუხალაშვილი ე., ბზიავა კ., ინაშვილი ი. ბმული ღვარცოფის გამოტანის კონუსებზე მოძრაობის პირობების პროგნოზი. სტუ-ის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტი, სამეცნ. შრომათა კრებული №68, 2013 წ., გვ. 126-128.
52. Klimiashvili L., Gurgenidze D., Inashvili I., Klimiashvili I. Determination of parameters of drip irrigation pipeline taking into account the concentration of flow. GTU, Hydroengineering, №1-2 (15-16), 2013, pp. 62-66.
53. ყრუაშვილი ი., კუხალაშვილი ე., ინაშვილი ი., ბზიავა კ., კირტავა ვ. ჰიპერკონცენტრირებული ნაკადების ჰიდრავლიკური მახასიათებლების გაანგარიშება ღვარსაშვზე გადადინების შემთხვევაში. საქართველოს სოფლის მეურნეობის მეცნიერებათა აკადემია. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია „კლიმატის ცვლილება და მისი გავლენა სოფლის მეურნეობის მდგრად და უსაფრთხო განვითარებაზე“, თბილისი, 2014 წ., გვ. 345-348.

54. Kruashvili I., Davitashvili A., Inashvili I., Natroshvili G. Regulation of soil moisture in irrigated agriculture. The Ministry of Education and Science, Water Management Institute, Scientific papers №69, 2014, pp.282-284.
55. Klimiashvili L., Davitashvili A., Inashvili I., Natroshvili G. Determination of water movement velocity in a soil. The Ministry of Education and Science, Water Management Institute, Scientific papers №69, 2014, pp. 150-152.
56. კლიმაშვილი ლ., გუბელაძე დ., გურგენიძე დ., ინაშვილი ი. კალაპოტის გამტარუნარიანობის ინტეგრალური მახასიათებლების დადგენა. სტუ, ჰიდროინჟინერია, №1-2 (17-18), 2014 წ., გვ. 20-27.
57. Натишвили О., Тевзадзе В., **Дадiani К.** Потери напора по длине в гиперконцентрированных наносами селевых потоках при абстрактно равномерном режиме. Труды Институт водного хозяйства Грузии, Тбилиси, 2010, стр. 191-192.
58. Натишвили О., Тевзадзе В., Чарбадзе З., **Дадiani К.** О нормативных документах в области селеведения. Труды Институт водного хозяйства Грузии, Тбилиси, 2010, №65.
59. კუხალაშვილი ე., გავარდაშვილი გ., ირემაშვილი ი., მაისაია ლ., კიკნაძე ხ., **დადიანი ქ.** მათემატიკური მოდელი ღვარცოფის ენერგეტიკული მახასიათებლების შეფასებისათვის. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის შრომათა კრებული, №74, 2019 წ., გვ. 100-107.
60. ყრუაშვილი ი., კუხალაშვილი ე., ინაშვილი ი., კლიმაშვილი ი. ღვარცოფულ კერებში დაგროვილი მასის წონასწორობის რღვევის განსაზღვრა ხარისხობრივი ფუნქციების გამოყენებით. სტუ, ჰიდროინჟინერია, №1-2 (17-18), 2014 წ., გვ. 63-71.
61. Kukhalashvili E., Kvashilava N., Kupreishvili Sh., Beraia N. Estimation of the associated mudflow impact on semi-conical through constructions, Annals of Agrarian Science, 15 (2017), 322-328, pp. 322-328.
62. კუხალაშვილი ე., ინაშვილი ი., ბზიავა კ., ყრუაშვილი ი., ლორთქიფანიძე დ. ღვარცოფსადინარში ტალღურად მოძრავი ბმული ღვარცოფის მახასიათებლების დადგენა. სტუ, “ჰიდროინჟინერია”, №1-2 (19-20), 2015, გვ. 70-74.
63. Kukhalashvili E., Gavardashvili G., Kupreishvili Sh., Beraia N. Effects of cohesive mudflow on semi-cylindrical anti-mud structure. „Construction of Optimized Energy Potential“, vol. 7, N2/2018, pp. 35-44.

64. ყრუაშვილი ი., კუხალაშვილი ე., ინაშვილი ი., ბზიავა კ. ღვარცოფული მოვლენები – რისკი, პროგნოზი, დაცვა. მონოგრაფია. თბილისი, საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2017 წ., 250 გვ.
65. ჭარბაძე ზ., დადიანი ქ., ნიბლაძე ნ., დიაკონიძე ბ. მდ. რიონის ღვარცოფული ხასიათის ძირითადი წყალსადინარები და მათი მთავარი პარამეტრები. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის შრომათა კრებული, №73, 2018 წ. გვ. 103-111.
66. ცანავა ლ., დადიანი ქ. ბუნებრივი სტიქიები მდ. არაგვის ღვარცოფულ შენაკადებზე. წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული. თბილისი, 2007 წ., 245 გვ.
67. Кулиев С.Н., Усьман Б.Н., Абдинов И.А. Вопросы гидравлики глинистых и цементных растворов. Баку, Азернесир, 1963, стр. 140.
68. ნატიშვილი ო.გ., თევადზე ვ.ი., **დადიანი კ.ვ.** Определение высоты обратной волны повышения селевого потока при его воздействии на поперечную глухую преграду. Журн. "Экологические системы и приборы", №9, 2008, стр. 60-62.
69. Алтунин В. Деформации русел канала Колос, М., 1972 г., 120 стр.
70. ნატიშვილი ო.გ., თევადზე ვ.ი. Одномерные наносонесущие русловые потоки. Москва, Издательство «Научтехиздат», 2012 г., 192 стр.
71. Степанов Б.С. О соотношении транспортных и гравитационных сил при движении селевых потоков. Селевые потоки. М., Гидрометеиздат, 1977, сб. №2.
72. ყრუაშვილი ი., ქაცარავა თ., კუხალაშვილი ე. ღვარცოფსაწინააღმდეგო ახალი ტიპის კონსტრუქციები. სამეცნიერო შრომათა კრებული „აგრარული მეცნიერების პრობლემები“, ტ. XX (2), თბილისი, 1997 წ., გვ. 180–186.
73. გოგსაძე ი., ბზიავა კ., ინაშვილი ი., უნდილაშვილი ნ. წყლის გამრეცხი სიჩქარის გავლენა არხის სტრუქტურის ფორმირებაზე. საქართველოს განათლებისა და მეცნიერების სამინისტრო, წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული, ტომი №64, 2009 წ., გვ. 67-70.
74. კუხალაშვილი ე., გავარდაშვილი გ. ღვარცოფსადინართა რისკების რეგულირება და ინოვაციური ნაგებობების გაანგარიშების მეთოდოლოგია, შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ცოტნე მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტი, თბილისი, 2021 წ., 51 გვ.

75. Kukhalashvili E., Gavardashvili G., Kupreishvili Sh., Beraia N. Expected Risk of Cohesive debris flows and Fighting Against Them. LAP_LAMBERT Academic Publishing, Germany, 2018, 87 p.
76. სიჭინავა ო., კუხალაშვილი ე., ყრუაშვილი ი., ინაშვილი ი. დატერასების მეთოდები – მეთოდური მითითება. საქართველოს სახელმწიფო აგრარული უნივერსიტეტი, საქ. მეცნ. აკად. წყალთა მეურნეობის და ეკოლოგიის ინსტიტუტი, 2004 წ., 16 გვ.
77. Диаконидзе Р., Хубулава И., **Дадiani К.**, Кикнадзе Х., Лордкипанидзе Ф., Наврозашвили М. Изменение климата планеты и гидроэкологические проблемы окружающей среды. Ж. «Экологические системы и приборы». Москва, 2008, №11, стр. 67-69.
78. თევზაძე თ., შავლაყაძე მ., **დადიანი ქ.** ბუნებრივ-ტექნოგენური კომპლექსების და საინჟინრო ნაგებობების ადაპტაციის პრობლემები გლობალური დათბობის პირობებში. სსიპ ჰიდროგეოლოგიისა და საინჟინრო გეოლოგიის ინსტიტუტი შრომათა კრებული, ტომი XVII, 2010 წ.
79. **Дадiani К.** Антропогенные причины наводнений. Сборник научных трудов Института водного хозяйства Грузинского технического университета, №67, 2012, стр. 40-44.
80. დიაკონიძე რ., ხარაიშვილი ო., ჭარბაძე ზ., **დადიანი ქ.**, ნიბლაძე ნ., სუბიშვილი ნ., ლორთქიფანიძე ფ. კატასტროფებით გამოწვეული მოსალოდნელი ეკოლოგიური პრობლემების სენსიტიურობისა და რისკების შეფასების კრიტერიუმების დამუშავება, მათი გამოყენება აღნიშნული პრობლემების პრევენციისათვის (საქართველო). საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ცოტნე მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის შრომათა კრებული, №69, 2014 წ., გვ. 78-83.
81. Натишвили О.Г., Круашвили И.Г. Защита инфраструктурных объектов от селевых потоков (Экологические проблемы) LAP_LAMBERT Academic Publishing, Germany, 2016, 104 p.
82. Natishvili O., Charbadze Z., **Dadiani K.**, Nibladze N. Numerical calculation of uneven traffic flow of hyper-concentrated sediment loaded mudflow with variable expenditures along its traffic. 4th International scientific and technical conference “Modern problems of water management, environmental protection, architecture and construction”, September 27-30, 2014. Dedicated to the 85 anniversary of the water management institute.
83. გავარდაშვილი გ., კუხალაშვილი ე., კვირკველია ი. სტეფანწმინდის (ყაზბეგის) რაიონში არსებული ღვარცოფსაშიშროება და სტიქიის

- რეგულირების გზები. VI საერთაშორისო კონფერენცია „წყალთა მეურნეობის, გარემოს დაცვის, არქიტექტურისა და მშენებლობის თანამედროვე პრობლემები“, თბილისი, 2016 წ.
84. ფანჭულიძე ჯ., დიაკონიძე რ., ჭარბაძე ზ., შავლაყაძე მ., დადიანი ქ., ნიბლაძე ნ., დიაკონიძე ბ., ხარაიშვილი ნ. წყლის საანგარიშო უზრუნველყოფის მაქსიმალური ხარჯების განსაზღვრის მეთოდიკა. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის შრომათა კრებული, №73, 2018 წ., გვ. 90-95.
 85. Круашвили И.Г., Кухалашвили Е.Г., Инашвили И.Д., Лордкипанидзе Д.Г., Бзиава К.Г. Установление гидравлических параметров селевых русел. Журн. "Экологические системы и приборы", №11, 2016 г., стр. 9-14.
 86. Круашвили И.Г., Кухалашвили Э.Г., Инашвили И.Д., Бзиава К.Г., Климиашвили И.Л. Математическая модель неравномерного движения связанного селя. ГТУ, Ж. «Гидроинженерия», №1-2, (17-18), Тбилиси, 2014, стр. 42-45.
 87. Тевзадзе В.И. К вопросу установления предельного напряжения сдвига модели структурной селевой массы. Труды ГрузНИИГиМ, Тбилиси, 1972, вып. 29, стр. 136-145.
 88. ყრუაშვილი ი., კუხალაშვილი ე., გავარდაშვილი გ., ღვარცოფის ენერჯის ჩამქრობი ნაგებობა. საქ. მეცნ. და ტექნ. კომიტ. „საქპატენტი“1994, ს.ს №001349.
 89. ყრუაშვილი ი., ქაცარავა თ., კუხალაშვილი ე. ღვარცოფის შეშფოთებული ზონის საანგარიშო მახასიათებლები. სამეცნიერო შრომათა კრებული „აგრარული მეცნიერების პრობლემები“, ტ. IX, თბილისი, 1997 წ., გვ. 229–230.
 90. ყრუაშვილი ი., ქაცარავა თ., კუხალაშვილი ე. კალაპოტური ჰიდროტექნიკური ნაგებობების ღიობების ძირითადი გაბარიტების შერჩევა. სამეცნიერო შრომათა კრებული „აგრარული მეცნიერების პრობლემები“, ტ. I, თბილისი, 1997 წ., გვ. 235–238.
 91. კუხალაშვილი ე., ინაშვილი ი., კლიმიაშვილი ი. არასტაციონარულ საფუძველზე ღვარცოფსაცავის მახასიათებლების ცვლილების კანონზომიერების განსაზღვრა. სტუ, ჟ. „ჰიდროინჟინერია“, №1-2 (17–18), თბილისი, 2014 წ., გვ. 46–53.
 92. Di Silvio G. Flood and sediment dynamics in mountain rivers. Preproceeding of the NATO ASJ and „Coping with floods“, E. Mojoraamana center Erice, November, 1992, pp. 110.

93. Яно К., Даидо А., Фундаментальные изучения грязекаменных потоков, Труды Института защиты от стихийных бедствий, т. 14, часть 2, Киото, 1985, стр. 69-93.
94. Natishvili O., Kuhxalashvili E., Gavardashvili G., Iremashvili I. One-dimension Mathematical Model of Energy Parameters of a Hyperconcentrated Mudflow. Journal „Annals of Agrarian Science“, Vol.18, No. 3 (2020), ISSN 1512-1887, pp. 251-257. <http://journals.org.ge/index.php/aans/issue/view/19/23>.
95. Beraia N. Cohesive Debris Flow Average Velocity and its Calculation Model. Znanstvena misel journal The journal is registered and published in Slovenia. ISSN 3124-1123 VOL.1, pp. 15-18.
96. **Dadiani K.** Determination of Cohesive Mudflow Strength and Expenditure. Znanstvena misel journal The journal is registered and published in Slovenia. ISSN 3124-1123 VOL.1, 1 pp. 18-21.
97. Gavardashvili G., Kuxalashvili E., Supatashvili T., Natroshvili G., Bziava K., Quparashvili I. The Research of Water Levels in the Zhinvali Water Reservoir and Results of Field Research on the Debris Flow Tributaries of the River Tetri Aragvi Flowing in it. Conference Proceedings, Rome, Italy, Jan. 17-18, 2019, Part V.
98. Gavardashvili G., Kukhalashvili E., Supatashvili T., Iremashvili I., Bziava K., Natroshvili G. Qufarashvili I. The Calculation of Maximal and Average Speed of Debris Flow Formed as a Result of Outstretched Water Wave on the Land Dam of Zhinvali. (IRC (Intern. Research Conf.- 2019) International Conference on Construction and Environmental Engineering. WASET. Barcelona, Spain, June 11-12, 2019, pp. 1029-1032 (იმპ.ფაქტ.).
99. Gavardashvili G., Kukhalashvili E., Supatashvili T., Iremashvili I., Qufarashvili I., Bziava K., Natroshvili G. Using the “CAPRA” Methodology for Analysis of the Critical State of the Zhinvali Earth Dam and Risks. International Conference on Economic Geology and Environmental Problems. WASET, Istanbul, Turkey, January 30-31, 2019, pp. 1914- 1918 (იმპ.ფაქტ.);
100. გვიშიანი ზ., ნანიტაშვილი მ., გურგენიძე დ., მღებრიშვილი მ. ღვარცოფული ნარევის რეოლოგიური მახასიათებლების განსაზღვრის საკითხი. მე-9 საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია „წყალთა მეურნეობის, გარემოს დაცვის, არქიტექტურისა და მშენებლობის თანამედროვე პრობლემები“, შრომათა კრებული, თბილისი, გამომცემლობა „საჩინო“, 2019 წ., გვ. 73-83.

101. Kukhalashvili E., Gavardashvili G., Kupreishvili Sh., Beraia N. The Effect of the bounded mudflow on the regulatory barrages, მე-7 საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია „წყალთა მეურნეობის, გარემოს დაცვის, არქიტექტურისა და მშენებლობის თანამედროვე პრობლემები“, 25–27 აგვისტო, 2017, გვ. 108–112.
102. Ростомов Г.Д. Формирование максимальных расходов воды рек по территории Закавказья, Тр. Зак. рег. ШИМ, 1982, вып. 77.83., стр. 24-31.
103. Сванидзе Г.Г., Цуцкиридзе Я.А. Основные гидрометеорологические явления на Кавказе. Гидрометеоиздат, Л., 1980 г., 288 стр.
104. წულუკიძე ლ., მაისაია ლ., კვიციანი ხ. ბორჯომის რაიონში სოფ. დაბასთან არსებულ მდ. ნაღვარევის ხეობაში ფორმირებული ღვარცოფის მიერ ტრანსპორტირებული მყარი ფრაქციების მოცულობის დადგენა ქვის ჩანართების კონფიგურაციის გათვალისწინებით. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტი სამეცნიერო შრომათა კრებული №70, თბილისი, 2015 წ., გვ. 209-214.
105. გავარდაშვილი ნ.გ. თბილისის მოსახლეობის უსაფრთხოების უზრუნველყოფა მდინარე ვერეს წყალშემკრებ აუზში ეროზიულ-ღვარცოფული პროცესების რეგულირების გათვალისწინებით. თბილისი, 2017 წ., 42 გვ., (თავი 1, 3).
106. გაგოშიძე შ., ქადარია ი., კახაძე გ., კოდუა მ. მაღლივი კაშხლებიდან ვარდნილი ნაკადებით კლდოვანი ფუძეების წარეცხვების გაანგარიშებისათვის. ჰიდროინჟინერია, N1-2 (29-30), 2021 წ.
107. გავარდაშვილი გ. ბმული ღვარცოფული ნაკადის სიჩქარის განსაზღვრა ჰაერის წინააღობის გათვალისწინებით. საქ. მეცნიერებათა აკადემიის მოამბე, თბილისი, 1995, ტ. 151, გვ. 444-447.