

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ნანა ბერაია

ბმული ღვარცოფის რისკები და ენერგეტიკული მახასიათებლები

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა „მშენებლობა“

შიფრი 0732

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0171, საქართველო

2022 წელი

საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტი

სამშენებლო ფაკულტეტი

წყალმომარაგების, წყალარინების, თბოაირმომარაგების და შენობების

საინჟინრო აღჭურვის დეპარტამენტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავცანით ნანა ბერიას მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „**ბმული ღვარცოფის რისკები და ენერგეტიკული მახასიათებლები**“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის -----
-----საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

-----, ----- 2022 წელი

ხელმძღვანელი:

ედუარდ კუხალაშვილი

ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი,

პროფესორი

რეცენზენტი:

იური ქადარია

პროფესორი

რეცენზენტი:

ვაჟა ტრაპაიძე

ასოცირებული პროფესორი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2022 წ.

ავტორი: ნანა ბერაია

დასახელება: „ბმული ღვარცოფის რისკები და ენერგეტიკული
მახასიათებლები“

სადოქტორო პროგრამა: „მშენებლობა“

ხარისხი: მისანიჭებელი კვალიფიკაცია — აკადემიური დოქტორი

სხდომა ჩატარდა:

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემოთ მოყვანილი 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

ლანდშაფტური ინფრასტრუქტურის მდგრადობა და გარემოს დაცვა ბუნებრივი ანომალიების ენერგეტიკული მახასიათებლების პოტენციალთანაა დაკავშირებული. სადღეისო მონაცემებით დაბალია არსებული მოდელებით შერჩეული გარემოსდამცავი საინჟინრო გადაწყვეტების ეფექტურობა სადინარში ღვარცოფების გაძლიერებული ზემოქმედების გამო. ბუნებრივი ანომალიები ხასიათდება მაღალი ტრანსპორტუნარიანობით, მათ გააჩნიათ თვითფორმირების განსაკუთრებულობა, რაც არსებული გაანგარიშების მეთოდების-მეთოდოლოგიის კორექტირებასა და დაზუსტებას საჭიროებს.

აღნიშნულიდან გამომდინარე:

- შეფასებულია ღვარცოფულ კერებში ფორმირებული ღვარცოფწარმომქმნელი მასის მდგრადობის რღვევისა და მოძრაობის დაწყების შესაძლებლობები; მიღებულია ენერგეტიკული მახასიათებლების დროში ცვლილების საპროგნოზო განტოლებები, გრუნტების მექანიკის ანალოგიაზე დაყრდნობით და ხარისხობრივი ფუნქციის გამოყენებით – კერაში ფორმირებული ღვარცოფის ხარჯის პროგნოზი;
- დადგენილია სატრანსპორტო ზონაში ნაკადის ქცევა და ენერგეტიკული მახასიათებლები. ენერჯის განტოლებებზე დაყრდნობით მიღებულია არაპრიზმატულ სადინარში არათანაბარი მოძრაობის მათემატიკური მოდელი ღვარცოფის მუდმივი და ცვლადი ხარჯით მოძრაობისას;
- ღვარცოფსადინარებში მოძრავი ღვარცოფებისათვის შერჩეულია ენერგეტიკული მახასიათებლების პროგნოზირების ინოვაციური მოდელი, რომლის საფუძველზეც გამოყვანილია ხარჯის, საშუალო სიჩქარის, წინააღმდეგობის ქანობის, დინამიკური სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულებები;
- ღვარცოფის მოძრაობის გათვალისწინებით მიღებულია ნაკადის კრიტიკული მდგომარეობის, ნახტომის წარმოქმნის და მასში ენერჯის დანაკარგის, კრიტიკული მდგომარეობის განმსაზღვრელი პარამეტრების საანგარიშო დამოკიდებულებები. ენერჯის განტოლებიდან გამომდინარე, დადგენილია მოძრაობის რეჟიმის ცვლილების შესაძლებლობები და ღვარცოფთა დრეკადობა, გამოყვანილია სიმკვრივის, მოცულობისა და სიღრმის ცვლილების საანგარიშო დამოკიდებულებები;
- დაუმყარებელი მოძრაობის მოდელით დასაბუთებულია ტალღის სიჩქარის საშუალოსთან განსხვავებულობა, ხოლო არათანაბრად მოძრავი ღვარცოფისათვის სადინარის

პრიზმატულობასთან კავშირში დადგენილია სიგანისა და სიჩქარის ცვლილება, დაზუსტებულია მათი ზღვრები;

- დადგენილია შემხვედრი წინააღმდეგობების გავლენა მოძრაობის შესაძლებლობაზე, გამოყვანილია წინააღმდეგობის ქანობისა და ნაგებობათა გეგმაში განლაგებას შორის მანძილის საანგარიშო დამოკიდებულებები.

Abstract

Sustainability of landscape infrastructure and environmental protection are related to the potential of the natural anomalies energy characteristics. According to current data, the efficiency of environmental engineering solutions selected by existing models is low due to the enhanced impact of debris flows while moving in the pipeline. Natural anomalies are characterized by high transportability. They have the peculiarity of self-formation, which requires the correction and refinement of existing calculation methods-methodology.

Following abovementioned:

- The possibilities of breaking the stability of the debris-flow forming mass established in the debris-flow hearts, and of starting the movement are evaluated; predictive equations of change of energy characteristics over time are obtained; prediction of debris-flow formed in the hearth based on the analogy of soil mechanics and using a qualitative function are obtained as well;
- Flow behavior and energy characteristics in the transport zone are determined. Based on energy equations, a mathematical model of unequal motion in a non-prismatic duct is obtained when moving at a constant and variable flow rate;
- An innovative model for predicting energy characteristics has been selected for the debris flows, moving in the debris-flow ducts; and based on which the calculated dependencies of flow rate, average speed, resistance slope, and dynamic velocity are derived;
- Considering the debris-flow movement, the calculation relationships of the critical condition of the flow, the generation of the jump and the loss of energy in it, and the parameters that determine the critical state are obtained. Based on the energy equation, the possibilities of the movement mode change and the elasticity of the debris-flows are determined; the computational relations of the change of density, volume and depth are derived;
- The unsteady motion model substantiates the difference from the average velocity of the wave velocity; And for unevenly moving debris-flow in connection with the prismatic shape of the duct, changes in width and velocity are established, and their limits are specified as well;
- The effect of oncoming obstacles on the movement possibility is established; the calculated dependencies of the distance between the slope of the resistance and the layout in the plan of the constructions are derived.

შინაარსი

1. საკითხის ზოგადი მიმოხილვა	13
თავი 1. ღვარცოფთა ენერგეტიკული მახასიათებლების შესწავლის თანამედროვე მდგომარეობა, ანალიზი და განზოგადება	18
1.1 ღვარცოფთა ფორმირება და დინამიკის თავისებურება.....	18
1.2 ღვარცოფთა ენერგეტიკული მახასიათებლების საანგარიშო მოდელები.....	22
1.3 ღვარცოფთა ენერგეტიკული მახასიათებლების საანგარიშო დამოკიდებულებები	28
1.4 აქტივაციის და დაზიანების ხარისხის მიხედვით ღვარცოფთა გავრცელება საქართველოს ტერიტორიაზე.....	39
თავი 2. ბმულ ღვარცოფთა მოძრაობა ღია კალაპოტებში	42
2.1 ჰიპერკონცენტრირებული ღვარცოფის მოძრაობის მათემატიკური მოდელი.....	42
2.2 ღია სადინარებში ბმული ღვარცოფის ხარჯის განსაზღვრა.....	49
2.3 ღვარცოფსადინარების პრიზმატულობა და ნაკადის ენერგეტიკული მახასიათებლები	63
თავი 3. ბმულ ღვარცოფთა ჰიდრაულიკა	80
3.1 ღვარცოფწარმომქმნელი კერიდან დაძრული მასის ხარჯის განსაზღვრა.....	80
3.2 სიმძლავრის დანაკარგები ბმულ ღვარცოფში	87
3.3 ბმული ღვარცოფის კრიტიკული მდგომარეობა და განმსაზღვრელი მახასიათებლები	89
3.4 ნახტომის მოვლენა ბმულ ღვარცოფში	94
თავი 4. ღვარცოფთა პოტენციალის შეფასება და გარემოს დაცვა.....	97
4.1 ღვარცოფთა ჰიდროლოგიური მახასიათებლები და როლი წყლის რესურსების ინტეგრირებულ მართვაში.....	97
4.2 ბმული ღვარცოფის ზემოქმედება სარეგულაციო ბარაჟებზე.....	111
4.3 ღვარცოფსარეგულაციო დაცვის ეფექტურობა.....	118
დასკვნები	127
გამოყენებული ლიტერატურა.....	130

ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1. კრიტიკული სიღრმის საანგარიშო ცხრილი.....	48
ცხრილი 2. ნატურაში ფიქსირებული და ფორმულა (2.2.50.)-ით გაანგარიშებულ სიჩქარეთა მნიშვნელობები.....	62
ცხრილი 3. ღვარცოფის სიღრმისა და სიჩქარის ცვლილება რეჟიმთან კავშირში სადინარებში ნაკადის სიგანის გაფართოებისა და კუმშვის დროს, როცა $i_{\text{ლ}} = i_{\text{ლფ}}$	79
ცხრილი 4. ნალექების უზრუნველყოფის კავშირი ინტენსივობასთან.....	101
ცხრილი 5. ნალექების ინტენსივობის, ხანგრძლივობისა და უზრუნველყოფის ცვლილების ხასიათი მდინარე მტკვრის წყალშემკრებ აუზში.....	102
ცხრილი 6. მოსული ნალექების სიდიდის კავშირი უზრუნველყოფასთან.....	103
ცხრილი 7. უზრუნველყოფის სხვადასხვა სიდიდის შემთხვევაში ფორმულა (4.1.6.)-ით გაანგარიშებული შედეგების შედარება რეალურად არსებულ სიდიდეებთან.....	105
ცხრილი 8. სხვადასხვა მდინარეთა წყალშემკრებ აუზებში ზედაპირული ჩამონადენის ფორმულით გაანგარიშებული სიდიდეები გ. დ. როსტომოვის შემოთავაზებულ საანგარიშო ფორმულით მიღებულ შედეგებთან.....	107
ცხრილი 9. ღვარცოფის მასაში წყლისა და შემადგენელი კომპონენტების შეცულობის სიდიდეები	110
ცხრილი 10. ფულადი ნაკადები, რომლებიც წარმოიქმნება ღვარცოფდამცავი ნაგებობის მშენებლობისა და ექსპლუატაციის შედეგად, ათას ლარობით..	119
ცხრილი 11. წმინდა დაყვანილი ღირებულების (NPV), აგრეთვე, უკუგების შიდა განაკვეთის სიდიდე (IRR) ღვარცოფისაგან დამცავი ობიექტების მშენებლობაში.....	121

ნახაზების ნუსხა

ნახ.1. ღვარცოფის მოძრაობის საანგარიშო მოდელის სქემა.....	43
ნახ.2. კრიტიკული სიღრმეების საანგარიშო გრაფიკები.....	48
ნახ.3. სითხის თანაბარი უდაწნეო მოძრაობის სქემა.....	51
ნახ.4. ღვარცოფის მოძრაობის სქემა	56
ნახ.5. გრაფიკული დამოკიდებულება $f(\beta) = f(h_0 / H)$	58
ნახ.6. გრაფიკული დამოკიდებულება $\frac{\bar{V}}{V_{აბჟ}} = f\left(\frac{h_0}{H_0}\right)$ ψ -ის სავადასახვა მნიშვნელობის დროს.....	60
ნახ.7. შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ღვარცოფის ზემოქმედების სქემა.....	66
ნახ.8. გრაფიკული დამოკიდებულება $\rho_0 / \rho_1 = f(a)$	70
ნახ.9. გრაფიკული დამოკიდებულება $f(a) = a; \left(\frac{V}{c}\right)^2 = a$	76
ნახ.10. გრაფიკული დამოკიდებულება $H(t) = (t)^a$ კოეფიციენტის სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს: 1. $a=0,2$; 2. $a=0,4$; 3. $a=0,6$; 4. $a=0,8$	87
ნახ.11. $h_{გრ.} = f\left[\frac{\omega_{გრ.}^3}{B_{გრ.}} \left(1 - \frac{h_0}{h_{გრ.}}\right)^3 \varphi^3\right]$ დამოკიდებულების გრაფიკი.....	93
ნახ.12. მდინარე დურუჯის წყალშემკრებ აუზში ნალექების დამოკიდებულების გრაფიკი უზრუნველყოფასთან: 1. \otimes ექსპერიმენტული წერტილები; 2. თეორიული მრუდი.....	103
ნახ.13. $P = f(Q)$ დამოკიდებულების გრაფიკი: 1. \otimes ექსპერიმენტული წერტილები; 2. თეორიული წერტილები.....	104
ნახ.14. $i = f\left(a, \frac{d}{h}\right)$ დამოკიდებულების გრაფიკი.....	115
ნახ.15. ღვარცოფსადინარში ბარაჟის განლაგების ჭრილი; 1. საორიენტაციო ნაგებობა; 2. ზედა ბიეფში საპროექტო ნაგებობის დაცილება საორიენტაციო ნაგებობიდან, როცა $i_0 < I$; 3. საპროექტო ნაგებობის დაცილება საორიენტაციო ნაგებობიდან, როცა $i_0 > I$	116
ნახ.16. ღვარცოფდამცავი სტრუქტურის მშენებლობაში კაპიტალდაბანდებების ეკონომიკური ცვლილება (y) კონკრეტული რეგიონის ტერიტორიაზე გამავალი ღვარცოფების სიხშირეზე (x) დამოკიდებულებით, როცა მოსალოდნელი ეკონომიკური ზიანი 200.0 ათას აშშ დოლარამდეა.....	123
ნახ.17. ღვარცოფდამცავი სტრუქტურის მშენებლობაში კაპიტალდაბანდებების ეკონომიკური ეფექტურობის ცვლილება (y) კონკრეტული რეგიონის ტერიტორიაზე გამავალი ღვარცოფების სიხშირეზე	

(x) დამოკიდებულებით, როცა მოსალოდნელი ეკონომიკური ზიანი 1000.0 ათას აშშ დოლარამდეა	124
ნახ.18. ღვარცოფდამცავი სტრუქტურის მშენებლობაში კაპიტალდაბანდების ეკონომიკური ეფექტურობის ცვლილება (y) კონკრეტული რეგიონის ტერიტორიაზე გამავალი ღვარცოფების სიხშირეზე (x) დამოკიდებულებით, როცა მოსალოდნელი ეკონომიკური ზიანი 2000.0 ათას აშშ დოლარამდეა	125

სურათების ნუსხა

სურ. 1. დვარცოფების რაოდენობა რეგიონების მიხედვით.....37

მადლიერების გვერდი

მადლობას ვუხდით ჩემს სამეცნიერო ხელმძღვანელს, სტუ–ს ცოტნე მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის მთ. მეც. თანამშრომელს, ტექნ. მეცნ. დოქტორს ედუარდ კუხალაშვილს უდიდესი დახმარებისთვის ამ სადისერტაციო ნაშრომის წარმატებით დასრულების საქმეში, თითქმის ყოველდღიური პრაქტიკულ–თეორიული კომუნიკაციისთვის და სამუშაოების ეფექტური ორგანიზებისთვის;

მადლობას ვუხდით ინსტიტუტის დირექტორს, ტექნ. მეცნ. დოქტორს, პროფესორ გივი გავარდაშვილს ჩემი, როგორც დოქტორანტისთვის გაწეული სამუშაოსა და ხელშეწყობისთვის;

მადლობას ვუხდით განყოფილების ხელმძღვანლებს, რომლებმაც თემატიკასთან დაკავშირებით სასარგებლო რჩევები მომცეს;

მადლობას ვუხდით სტუ–ს პროფესურას, რომელთაც სასარგებლო კრიტიკული შენიშვნები მომცეს კოლოკვიუმებისა და თემატური სემინარების ჩატარებისას;

მადლობას ვუხდით სადისერტაციო საბჭოს წევრებს, რეცენზენტებს, რომელთა სამსჯავროზეც წარსდგა მოცემული სადისერტაციო ნაშრომი;

მადლობას ვუხდით შოთა რუსთაველის ეროვნულ სამეცნიერო ფონდს საგრანტო დაფინანსებისთვის, რამაც საშუალება მომცა სწავლა გამეგრძელებინა დოქტორანტურაში;

მადლობას ვუხდით ცოტნე მირცხულავას სახელობის წყალთა მეურნეობის ინსტიტუტის ახალგაზრდა მეცნიერებს, რომლებმაც, გამომდინარე გამოცდილებიდან, ფრიად სასარგებლო რჩევები მომაწოდეს;

მადლობას ვუხდით ჩემი ოჯახის წევრებს ქმედითი დახმარებისთვის, მორალური მხარდაჭერისთვის.

შესავალი

მდგრად ლანდშაფტურ ინფრასტრუქტურას ადამიანის ცხოვრებასა და მოღვაწეობაში განსაკუთრებული ადგილი უჭირავს. ცხოვრების კეთილმოწყობის დონე გარკვეულწილად ბუნებაზე მოქმედი ანომალიების რისკებთანაა დაკავშირებული.

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. ამ ტერიტორიის ინფრასტრუქტურა მდგრადობისა და ეკოლოგიური წონასწორობის რღვევის შემთხვევებით გამუდმებით ცვალებადია ბუნებრივი ანომალიების გამო. ეკოლოგიური წონასწორობის დისბალანსითა და ზარალის შედეგების განსაკუთრებული ზემოქმედების სიხშირით გამოირჩევა ბმული ღვარცოფები, რომელთა გააქტიურება ბოლო 10 წლის მონაცემებით გეომეტრიული პროგრესითაა გაზრდილი.

ხშირია შემთხვევა, როცა თვითფორმირებად სადინარში ნაკადის მოძრაობის მიმართულებით ნატანი წარიტაცება ან დაილექება. ნაკადის მნიშვნელოვანი დამანგრეველი ძალისა და ენერგეტიკული მახასიათებლების დიდ დიაპაზონში ცვლილების გამო ხშირად ირღვევა სანაპირო ზოლი და კალაპოტიდან იღვრება მასა. დარეგულირებულ კალაპოტებში არასწორად შერჩეული სარეგულაციო ღონისძიებების საპროექტო პარამეტრები ან ნაგებობათა კონსტრუქციული გადაწყვეტები ვერ იძლევა ღვარცოფზე ზემოქმედების რეგულირების შესაძლებლობებს და სადინარის კალაპოტი ხშირად იხერგება. ღვარცოფის მიერ მიყენებული ზარალი უკანასკნელ წლებში საშუალოდ მილიონობით ლარით განისაზღვრა.

სადინარებში ნაკადის გაჭედვის გამო მიყენებულმა ზარალმა კატასტროფული ხასიათი მიიღო.

თემის აქტუალობა. ლანდშაფტური ინფრასტრუქტურის მდგრადობა და გარემოს დაცვა ბუნებრივი ანომალიების ენერგეტიკული მახასიათებლების პოტენციალთან არის დაკავშირებული. მოვლენის გარემოზე ზემოქმედების განსხვავებულობის გამო მოქმედი ანომალიების საანგარიშო მოდელებით აღწერა და ინოვაციური მეთოდოლოგიის მოვლენასთან ადაპტაცია, შეფასების მეთოდების სრულყოფა და საანგარიშო დამოკიდებულებებით აღწერა ძნელად გადასაწყვეტ ამოცანათა კატეგორიას განეკუთვნება. დაბალია საანგარიშო მოდელებით შერჩეული გარემოსდაცვითი საინჟინრო გადაწყვეტების ეფექტურობა მოქმედი ანომალიების გაძლიერებული ზემოქმედების გამო. ასეთი ანომალიები სადინარში მოძრაობის დროს ხასიათდება მაღალი ტრანსპორტუნარიანობით, გააჩნია თვითფორმადობის განსაკუთრებულობა, რაც არსებული გაანგარიშების მეთოდების და მეთოდოლოგიის კორექტირებასა და დაზუსტებას საჭიროებს.

სამუშაოს მიზანი. ღვარცოფწარმომქმნელ კერებსა და სადინარებში ფორმირებული მაღალი სიმკვრივის ნაკადების შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების შესაძლებლობა, ლანდშაფტური ინფრასტრუქტურის ეკოლოგიური მდგრადობა მოქმედი ბუნებრივი ანომალიების სახეებსა და დარეგულირების დონესთან არის დაკავშირებული. ღვარცოფმცოდნეობის ისტორიიდან ნათელია, რომ მათი რეგულირების ღონისძიებები კომპლექსური ხასიათისაა და მასტაბილირებელი, შემკავებელი, მიმმართველი ნაგებობის სახეებით არის ცნობილი, ხოლო რეგულირების შესაძლებლობები ანომალიების სახეებთან და პოტენციალთან არის დაკავშირებული. მათ გრძელვადიან საექსპლუატაციო უზრუნველყოფას სასიცოცხლო მნიშვნელობა გააჩნია. არსებული მდგომარეობით გამოკვეთილია მოქმედი ანომალიების

ზემოქმედება და გამოყენებული ღონისძიებების წინააღმდეგობრივი შესაძლებლობები.

აქედან გამომდინარე, სამუშაოს მიზანს ენერგეტიკულ მახასიათებლებზე, საანგარიშო მოდელებსა და ჰიდრავლიკაზე დაყრდნობით ინოვაციური საანგარიშო მოდელების შექმნა და ნაკადის ანომალურობის გათვალისწინებით ენერგეტიკული პარამეტრების საანგარიშო დამოკიდებულებების გამოყვანა, შერჩეული მოდელებით ღვარცოფსადინარების რეგულირების გაანგარიშების მეთოდოლოგიის სრულყოფა წარმოადგენს.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები. მთისა და მთისწინა ლანდშაფტების ჰიდროგრაფიული ქსელის წყალშემკრები აუზები; ჩამონადენის ფორმირებაზე მოქმედი გეოგრაფიული და კლიმატური ფაქტორები და მათი ჩამონადენის ფორმირებაში გამოყენების მეთოდები; ღვარცოფწარმომქმნელი აუზები და კერებში ფორმირებული ღვარცოფწარმომქმნელი მასის მდგრადობის და რღვევის განსაზღვრელი ფაქტორები; ენერგეტიკული მახასიათებლების განსაზღვრის მეთოდები; სადინარში ნაკადის ქცევა და მათემატიკური მოდელები; მოძრაობის დიფერენციალური განტოლების შედგენის მეთოდები; ღვარცოფსადინარში მოძრავი ნაკადის ენერგეტიკული მახასიათებლები და მათი განსაზღვრის მეთოდები; სადინარების მორფომეტრია და მისი გავლენის შეფასების მეთოდები ნაკადის ძრაობის რეჟიმებზე; კლიმატური ფაქტორების გავლენა და მისი ზემოქმედება ღვარცოფულ ჩამონადენზე; სატრანზიტო ღვარცოფსადინარები და ნაკადის რეგულირების მეთოდები.

ნაშრომის ძირითადი შედეგები და მეცნიერული სიახლე.

– შეფასებულია კერებში ფორმირებული ღვარცოფწარმომქმნელი მასის მდგრადობის რღვევისა და მოძრაობის დაწყების შესაძლებლობები, მიღებულია ენერგეტიკული მახასიათებლების დროში ცვლილების საპროგნოზო განტოლებები ხარისხობრივ ფუნქციებზე დაყრდნობით,

ხოლო კერაში ფორმირებული ხარჯის პროგნოზი აქტიური წნევასა და ხარჯს შორის დაფუძნებულია გრუნტების მექანიკის ანალოგიაზე;

– სატრანსპორტო ზონაში ნაკადის ქცევისა და ენერგეტიკული მახასიათებლების პროგნოზირების მიზნით ენერჯის განტოლებებზე დაყრდნობით მიღებულია არათანაბარი მოძრაობის მათემატიკური მოდელი არაპრიზმატულ სადინარში ღვარცოფის მუდმივი და ცვლადი ხარჯით მოძრაობის დროს;

– ღვარცოფსადინარებში მოძრავი ღვარცოფებისათვის შერჩეულია ენერგეტიკული მახასიათებლების პროგნოზირების ინოვაციური მოდელი, რომლის საფუძველზე გამოყვანილია ხარჯის, საშუალო სიჩქარის, წინააღმდეგობის ქანობის დინამიკური სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულებები;

– ენერჯის განტოლებებზე დაყრდნობით განხორციელებულია ნაკადის კრიტიკული მდგომარეობის წარმოქმნის შესაძლებლობები, ნახტომის წარმოქმნის და მასში ენერჯის დანაკარგის, კრიტიკული მდგომარეობის განმსაზღვრელი პარამეტრების საანგარიშო დამოკიდებულებები. რეოლოგიიდან გამომდინარე, დადგენილია მოძრაობის რეჟიმის ცვლილების შესაძლებლობები, ღვარცოფთა დრეკადობა. გამოყვანილია სიმკვრივის, მოცულობისა და სიღრმის ცვლილების შესაძლებლობები;

– დაუმყარებელი მოძრაობის მოდელით დასაბუთებულია, ტალღის სიჩქარე საშუალო სიჩქარეს სამჯერ სჭარბობს, ხოლო არათანაბრად მოძრავი ღვარცოფისათვის სიგანისა და სიჩქარის ცვლილება დადგენილია სადინარის პრიზმატულობასთან კავშირში;

– შემხვედრი წინააღმდეგობების გავლენით დადგენილია წინააღმდეგობის ქანობის საანგარიშო დამოკიდებულება და ნაგებობათა განლაგების შესაძლებლობა გეგმაში.

ნაშრომის გამოყენების სფერო. ნაშრომში მიღებული შედეგები შეიძლება გამოყენებული იქნეს სამოქალაქო, სამრეწველო მშენებლობის და აგრარული მეცნიერებებისა და ბიოსისტემების ინჟინერინგის დარგში,

მაგისტრებისა და დოქტორანტების, აგრეთვე, ჰიდროინჟინერიის, ჰიდრომელიორაციის, ჰიდროლოგიის, საინჟინრო ეკოლოგიის დარგების სპეციალისტების მიერ. ნაშრომი დიდ დახმარებას გაუწევს ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების დაპროექტება-მშენებლობითა და ექსპლუატაციით დაინტერესებულ სპეციალისტებს.

ნაშრომის მოცულობა. სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლისგან, მიმოხილვითი ნაწილისაგან, ოთხი თავისაგან, ძირითადი დასკვნების, გამოყენებული ლიტერატურისაგან. იგი წარმოდგენილია 141 ნაბეჭდ გვერდზე და მოიცავს 18 ნახაზსა და 11 ცხრილს.

**თავი 1. ღვარცოფთა ენერგეტიკული მახასიათებლების შესწავლის
თანამედროვე მდგომარეობა, ანალიზი და განზოგადება**

1.1. ღვარცოფთა ფორმირება და დინამიკის თავისებურებანი

ღვარცოფები შემადგენელი კომპონენტების ურთიერთთანაფარდობის გარკვეულ ზღვრებში ცვლილების გამო სპექტრის სახით არის წარმოდგენილი და მათგან რომელიმეს ძირითადად გამოყოფა რეოლოგიური მახასიათებლების ცვლილების გარკვეული ზღვრების შუალედს შეესაბამება. აქედან გამომდინარე, ღვარცოფსარეგულაციო ნაგებობათა კონსტრუქციული ელემენტების ზომების საპროექტო პარამეტრების შერჩევა სირთულეებთან არის დაკავშირებული და ძირითადად ჰიპერკონცენტრირებული ნაკადის ორ სახეობას ეყრდნობა:

1. ღვარცოფები, რომელთა მასაში მყარი ჩანართის წონა (80–90)%–ით არის წარმოდგენილი, კოლოიდური ნაწილი მასში განთავსებულია (3–6)%–ის ზღვრებში და წყლის მოცულობა (10–20)%–ს შეადგენს. წყლის კოლოიდურ ნაწილთან ფარდობითი მოცულობის სიდიდის გარკვეულ ზღვრამდე ცვლილების შემთხვევაში ღვარცოფი ხასიათდება ბმულობით და კვაზი–მყარი სხეულის თვისებებს ამჟღავნებს. ღვარცოფული მასის წონასწორობის რღვევა და მოძრაობაში მოყვანა გარე ძალებით ან ზღვრული წონასწორობის განმსაზღვრელი პარამეტრების ურთიერთთანაფარდობის კრიტიკულ საზღვრებთან არის დაკავშირებული. მოძრაობის პროცესში სიბლანტის გამო მას უერთდება კლდის ნამსხვრევები და კალაპოტური დანალექები, გააჩნია მაღალი ტრანსპორტუნარიანობა და გამოტანის კონუსებზე სიჩქარის შემცირების ან გაჩერების შემთხვევაში არ ხდება მისი მასის შემადგენელ კომპონენტებად დაშლა. მოცულობითი წონა (18000–23000) ნ/მ³ ზღვრებში მერყეობს.

2. ღვარცოფების მეორე სახე მთის ზედაპირული ჩამონადენით შექმნილი კალაპოტური ნაკადების ნაირსახეობით არის წარმოდგენილი.

სატრანზიტო მონაკვეთზე იგი ახორციელებს მთის ქანების დაშლის პროდუქტების გრანულომეტრიის ფართო სპექტრის ტრანსპორტირებას, ხასიათდება მოქმედების მცირე დროით, წონით შეიცავს მყარი მასის (20–30)%–ს, სიჩქარის შემცირების შემთხვევაში იშლება შემადგენელ კომპონენტებად, ხასიათდება უეცარი წარმოქმნით და მოცულობითი წონა (11000–17000) ნ/მ³ ზღვრებშია განთავსებული.

წარმოდგენილ ღვარცოფთა სახეებიდან ანომალურობისა და დიდი დამზოგავი ძალის, შესარჩევი ნაგებობების საპროექტო პარამეტრებისა და მშენებლობასთან დაკავშირებული სირთულეების გამო ყურადღებას იპყრობს პირველი სახე, რომელიც ყალიბდება კერებში. ასეთ ღვარცოფულ მასას შეუძლია გარკვეულ ზღვრამდე განიცადოს დეფორმაცია, ხოლო, როცა დაძაბულობა გადააჭარბებს ბმულობის შესაბამისი წინააღმდეგობის შესაძლებლობებს, მაშინ მისი ტანის უწყვეტობა ირღვევა და შემადგენელ კომპონენტებად იშლება.

ღვარცოფების შესწავლის ისტორიიდან გამომდინარე, კვლევები წარმოდგენილ მოვლენებზე XIX საუკუნის 20–იან წლებამდე აღწერილობით ხასიათს ატარებს. შემდეგი ეტაპი გამოირჩევა სისტემური კვლევებით, სამეცნიერო შრომებით, რომლებიც ღვარცოფთა სპექტრიდან მათი სახეების დაზუსტებას, ტერმინოლოგიას, ჰიდრავლიკისა და ჰიდროლოგიის ამოცანების გადაწყვეტას ეხება. ამ მიმართულებით კვლევის საკითხებმა ასახვა პოვა ი. ველიკანოვის, მ. გაგოშიძის, მ. მოსტკოვის, ს. ფლეიშმანის, ი. ხერხეულიძის, გ. ხმაღაძის, ლ. სულაქველიძის, ი. ბოგოლიუბოვას სამეცნიერო შრომებში [1, 2, 4, 5, 6, 7, 8].

უკანასკნელი პერიოდის სამეცნიერო ნაშრომებში განსაკუთრებული ადგილი უჭირავს გამოყენებულ მეთოდებს ჰიდროლოგიისა და მის მომიჯნავე დისციპლინებში — ჰიდრომექანიკა, გრუნტების მექანიკა და რეოლოგია. მასში გაშუქებულია ღვარცოფთა სტაციონალური, არასტაციონალური და არათანაბარი ტალღური მოძრაობის ამოცანები, დახვეწილია ღვარცოფებთან ბრძოლის მეთოდებისა და ახალი ტიპის

ინოვაციური ნაგებობების კონსტრუირების, მათ ზედაპირზე ნაკადის ძალური ზემოქმედების გადანაწილების შესაძლებლობები და სხვა საკითხები. ამ მხრივ ყურადღებას იპყრობს 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, გ. გავარდაშვილის, ი. ყრუაშვილის, ე. კუხალაშვილის სამეცნიერო შრომები [5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26].

ბოლო დროს ჩატარებული კვლევებით ღვარცოფები დაყოფილია სახეებად, მოცემულია მათი საანგარიშო სქემები, დაზუსტებულია ღვარცოფულობის განმსაზღვრელი რიგი კრიტერიუმები. თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევებით გათვალისწინებულია რეოლოგიური მახასიათებლების გავლენა როგორც დინამიკაზე, ისე სტატიკაზე და ოპერატიული აღწერის მიზნით შედგენილია დიფერენციალური განტოლებები.

საკითხთან ასეთი მიდგომით მიღებული დიფერენციალური განტოლებები ღვარცოფთა რეოლოგიურ პოსტულატებზეა დაფუძნებული და ადაპტირებულია ჰერპერკონცენტრირებული ნაკადის ამოცანებთან. განტოლებათა ინტეგრებით მიღებული შედეგები შემდეგ საფუძვლად დაედო ღვარცოფთა ზღვრული წონასწორობის, მოძრაობისა და ნაგებობათა ურთიერთქმედების საერთო დებულებების შემუშავებას. ამ მხრივ ყურადღებას იპყრობს ერთგანზომილებიანი წყალნარევიანი გრუნტის განტოლებები, რომელთა ამოხსნის საფუძველზე შესაძლებელი გახდა ღვარცოფთა დაძაბული დეფორმაციული მდგომარეობის ფართო სპექტრისათვის მიღებული ყოფილიყო მათი მოდელირების კრიტერიუმები [14,18].

საჭიროა მიენიშნოს ისიც, რომ ინოვაციური საინჟინრო ამოცანების გადაწყვეტის შემთხვევაში საიმედო ოპერატიულ საშუალებად მიჩნეულია ღვარცოფთა მოძრაობისა და უწყვეტობის ერთგანზომილებიანი

განტოლებები, რომელთა ამოხსნის მიზნობრიობა დასმული ამოცანის სახესთანაა დაკავშირებული. ამ მხრივ აღსანიშნავია ბოლო დროს მიღებული დიფერენცილური განტოლებები როგორც ბმული, ისე ტურბულენტური ღვარცოფებისათვის.

მიუხედავად უამრავი სამეცნიერო კვლევითი დაწესებულებების და საპროექტო ორგანიზაციების ძალისხმევისა, ბუნებრივ ანომალიებთან ბრძოლის საინჟინრო გადაწყვეტებმა ვერ მიიღო დასრულებული სახე. ჰიდროლოგიასა და ჰიდრაულიკაში არ მოგვეპოვება გარემოს დამცავი ნაგებობების საპროექტო პარამეტრების სრულყოფილი სამშენებლო ნორმები და წესები, რადგან ღვარცოფთა დინამიკა და გენეზისი სათანადოდ არ არის შესწავლილი.

ანომალურობის გამო შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების შემთხვევაში ნაკადი მდგრადობას კარგავს და ტალღის ფორმით მოძრაობს. ასეთი შემთხვევისათვის დამახასიათებელია ნაკადის როგორც ჰიდრაულიკური, ჰიდროლოგიური და ენერგეტიკული პარამეტრების ცვლილება, ისე სიჩქარის, სიღრმის, ხარჯის შემცირება ან გაზრდა — უწყვეტად ან საფეხურისებრივად. წარმოიქმნება ტალღის მნიშვნელოვანი ამპლიტუდა და გაიზრდება ნაკადის დამრტყმელი ძალის ეფექტი, რომელიც ნაგებობათა კონსტრუქციული ელემენტების შერჩევის დროს ხშირად არ არის გათვალისწინებული. ღვარცოფებისგან დაცვის მიზნით განსაკუთრებით საყურადღებოა შემხვედრი წინააღმდეგობებით ნაკადში წარმოქმნილი ტალღის მახასიათებლებისა და თავისუფალი ზედაპირის დადგენის ამოცანები.

ტალღის წარმოქმნა ღვარცოფში რთული დინამიკური პროცესია და ოპერატიული შესაძლებლობების გაფართოების მიზნით ტალღური პროცესების შეფასების დროს იგი შეიძლება განხილულ იქნეს ერთგანზომილებიანი ამოცანების ჩარჩოში. ღვარცოფთა ტალღური ფორმით მოძრაობასა და მისი პარამეტრების განსაზღვრას ეძღვნება აკადემიკოს ო. ნათიშვილის სამეცნიერო შრომები და მონოგრაფიები.

უკანასკნელ პერიოდში ორიგინალური ნაგებობების შექმნისა და კონსტრუქციული გადაწყვეტების სურათმა სხვა სახე მიიღო. ამას ადასტურებს ღვარცოფსაწინააღმდეგო ღონისძიებების გამოყენებისა და თვით ღვარცოფის შესწავლის I ეტაპები.

ღვარცოფებთან გამოყენებული სარეგულაციო ღონისძიებათა საექსპლუატაციო ანალიზითა და ღვარცოფული პროცესების კვლევის არსებული მასალებით გამოიკვეთა, რომ პირველ რიგში აუცილებელია მოვლენის ადვილად შესაცნობი პროცესების გამოყოფა, მათ შორის კავშირის შესაძლებლობების დაზუსტება და შემდგომ — თეორიის შექმნა. ამასთან ერთად, ღვარცოფთა ანომალურობის გამო სარეგულაციო ნაგებობათა კონსტრუირების დროს აუცილებელია გათვალისწინებული იქნეს მოქმედი ნაკადის ჰიდრავლიკურ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების შესაძლებლობები, ხოლო ნაგებობის შერჩევა მექანიკისა და ჰიდრავლიკის სრულ შესატყვისობასთან კავშირში უნდა განხორციელდეს. აღსანიშნავია ისიც, რომ ღვარცოფთა მოძრაობის რეჟიმის შესწავლა ურთიერთმართვადი ფაქტორების კომპლექსთანაა დაკავშირებული, რომელთა გათვალისწინება დიდ სიფრთხილეს საჭიროებს საანგარიშო მოდელების შერჩევისა და პროცესთან ადაპტაციის დროს.

1.2. ღვარცოფთა ენერგეტიკული მახასიათებლები და საანგარიშო მოდელები

ღვარცოფულ პროცესებთან მათემატიკური მოდელების ადაპტაცია ძალზე რთულია და ამას სამეცნიერო შრომებით რეკომენდებული დამოკიდებულებების ანალიზი ადასტურებს. გაანგარიშებით მიღებული შედეგები არსებული მოდელების გამოყენებით უფრო ნათელია. ძალზე რთულია მოვლენების როგორც თეორიულად აღწერის შესაძლებლობა, ისე ლაბორატორიულ პირობებში ექსპერიმენტების განხორციელება.

ღვარცოფულ პროცესებთან მათემატიკური მოდელების ადაპტაცია იმ გარემოებითაც რთულდება, რომ ანომალურობის გამო მათ დინამიკურ

სტრუქტურაზე მეცნიერთა შეხედულება განსხვავებულია. მეცნიერთა ერთი ნაწილი ღვარცოფის დინამიკას კვაზი-მყარი სხეულის ანალოგიურად იხილავს და მიიჩნევს, რომ საგრადიენტო შრე კალაპოტის ფსკერიდან ნაკადის სიღრმის გარკვეულ სიდიდეზე ვრცელდება, ხოლო მეორე ნაწილი ღვარცოფთა მოძრაობას განიხილავს საგრადიენტო შრის მთლიან სიღრმეზე გავრცელებით.

ზემოთ აღნიშნულთან ერთად მნიშვნელოვანია სხვა გამოკვლევებიც, მაგრამ ჩვენ შემოვიფარგლებით იმ მოდელების ანალიზით, რომლებიც სადღეისო მონაცემებით ღვარცოფთა ენერგეტიკული მახასიათებლების განსაზღვრის ოპერატიულ საშუალებად არის მიჩნეული.

ღვარცოფული პროცესების ამოცანების ანალიზიდან გამომდინარე, თანამედროვე პირობებში ოპერატიულ საშუალებად დიფერენციალურ განტოლებათა შეკრული სისტემა ითვლება. მათი გამოყენება მეტი სიზუსტით აგვიწერს ღვარცოფის დინების მექანიზმს და ასეთი მოდელები ნაკადის მოძრაობის ერთგანზომილებიანი თეორიის შესაქმნელ ბაზას წარმოადგენს. მათ გააჩნია გამოყენებითი ფუნქცია მოვლენის ჰიდრაულიკის ფართო კლასის ამოცანების გადასაწყვეტად.

თანამედროვე წარმოდგენით, ტურბულენტური ღვარცოფის დინება გულისხმობს წყლისა და მყარი ნაწილის ერთდროულ გადაადგილებას და მოძრაობის ასეთი სახე ორფაზიანი დინებით არის ცნობილი, რომელსაც ორკომპონენტთანსაც უწოდებენ, ხოლო ყოველი ფაზის მოძრაობის შეფასების ოპერატიულ საშუალებად კი უწყვეტობის, დინამიკისა და ენერჯის განტოლებებია გამოყენებული.

ნატანდატვირთული ნაკადების შემთხვევაში, სამეცნიერო შრომებში, ტურბულენტური მოძრაობის გასაშუალებელი განტოლების მისაღებად გამოყენებულია ორფაზიანი ნაკადის აქტუალური მოძრაობის ჰიდროდინამიკური დამოკიდებულებები. ნატანდართული ნაკადებისათვის ცვლადი ხარჯის დროს გადაწყვეტილია მოძრაობის გასაშუალებელი განტოლებების ინტეგრების საკითხები [5, 6, 27, 28].

ბმული ღვარცოფები მაღალი სიმკვრივის ნაკადთა შორის ბუნების ისეთი სტიქიური გამოვლინებაა, რომლის დინამიკის საკითხების გადაწყვეტა დინების კანონზომიერებათა ფიზიკური არსის სრულ შესწავლასა და მათემატიკური მოდელების სწორად შერჩევასთანაა დაკავშირებული. ღვარცოფსადინარში მოძრავი ნაკადის დინამიკური თავისებურებების სრულად წარმოჩენა განსაკუთრებით საინტერესოა იმ შემთხვევაში, როცა საქმე გვაქვს ფორმირებულ ნაკადთან. ასეთ შემთხვევაში მოძრაობის პროგნოზირება და პროცესთან მოდელის ადაპტაცია ხშირად ვერ იძლევა მოვლენის სრულად აღწერის შესაძლებლობას რეოლოგიური მახასიათებლების დიდ დიაპაზონში ცვლილების გამო. ნაკადის ენერგეტიკულ მახასიათებლებსა და სადინარის მორფომეტრიას შორის კავშირის დამყარება ერთ–ერთ ინოვაციად ჩაითვლება მაშინ, თუ შესაძლებელია ნაგებობის ნაკადთან ტრანსფორმაცია, ნაგებობათა ექსპლუატაციის პერიოდში მრავალჯერადი გამოყენება და საიმედოობის გაზრდა, ეკოლოგიური სტაბილურობა, ნაკადის არასრული ენერგიით ნაგებობაზე დარტყმის შესაძლებლობა და სხვ. ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე, აუცილებელია, მხედველობაში იქნეს მიღებული სხვადასხვა გეომორფოლოგიურ რეგიონში ფორმულირებულ ღვარცოფთა ერთმანეთისგან განსხვავებულობა, კერძოდ, ღვარცოფწარმოქმნელი მასის წყლით შევსების შესაძლებლობა, შინაგანი ხახუნის კუთხის და ბმულობის შესაძლო ცვლილების დიაპაზონები, საწყისი წინააღმდეგობა ძვრაზე, სიბლანტის კოეფიციენტი, დრეკადობის მოდული, რაც კიდევ ართულებს წარმოდგენილ ფაქტორთა კომპლექსურად ასახვას საანგარიშო მოდელების შერჩევის დროს.

ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე, ჰიპერკონცენტრირებულ ნაკადთა შორის ბმული ღვარცოფები, რომლებიც განსხვავდება სხვა ნაკადებისაგან, მნიშვნელოვანი ტრანსპორტუნარიანობით გამოირჩევა. მათი მოქმედებისას შემხვედრ წინააღმდეგობებზე განსაკუთრებულ ინტერესს იწვევს ის, თუ როგორ ფორმას იღებს ღვარცოფის თავისუფალი ზედაპირი

გაჩერების ან ნაგებობაზე გადადინების შემთხვევაში. აღნიშნული შემთხვევები განმსაზღვრელ ფაქტორს წარმოადგენს სარეგულაციო ნაგებობათა გეგმაზე განლაგებისას.

მყარი და დენადი ტანების მოძრაობის აღწერა მათემატიკური მოდელების ან კონკრეტული საანგარიშო დამოკიდებულების პროცესთან ადაპტირებით ხდება. აქედან გამომდინარე, ღვარცოფული პროცესების ამოცანების განხილვის დროს ყურადღებას იქცევს სხეულთა დეფორმაციის შესაძლებლობები. არსებული კონცეფციის შესაბამისად, დეფორმაცია მყარ ტანებში მოქმედი ძალის პროპორციულია, ხოლო დენად ტანებში ეს მოვლენა სიჩქარის გრადიენტთანაა დაკავშირებული. ამ უკანასკნელის შეფასების დროს ყურადღება გადატანილია ძირითად საგრადიენტო შრეზე, რომელიც ნაკადის კალაპოტთან შეხების დეფორმაციით არის წარმოდგენილი. გარდა ზემოთ მოყვანილი შემთხვევებისა, ნაკადის მოძრაობა სადინარში კალაპოტის საკონტაქტო ზედაპირზე შესაძლებელია ცურვით განხორციელდეს. არანიუტონური სითხეების ღვარცოფთა სადინარში დინება მაშინ არის შესაძლებელი, როცა მხები ძაბვის სიდიდე საკონტაქტო ზედაპირთან დენადობის ზღვარზე ნაკლებია.

ზოგადად, როგორც ნიუტონური, ისე არანიუტონური სითხეების შემთხვევაში ნაკადის ენერგეტიკულ მახასიათებელ სიდიდედ მიჩნეულია ხარჯი [14].

ღვარცოფის შემთხვევაში, როცა ხარჯი Q –ს და მხები ძაბვა τ – ს ტოლია, ხარჯის საანგარიშო მოდელი შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს შემდეგი სახით:

$$Q = f(\tau) \quad (1.2.1.)$$

ასეთი სახით წარმოდგენილ მოდელში მხები ძაბვის ფუნქციის სიჩქარესთან კავშირია $f(\tau) = \frac{du}{dy}$. წარმოდგენილი მოდელით მხები ძაბვის ფუნქციისა და გრადიენტს შორის დამოკიდებულება შეიძლება მოცემული იყოს სხვადასხვა ფორმით: მხები ძაბვა მხოლოდ სიჩქარის გრადიენტის

ფუნქციითაა წარმოდგენილი ან მას სიჩქარის გრადიენტსა და დროსთან აქვს ფუნქციონალური კავშირი. უდაწნეო სითხეების შემთხვევაში, როცა ცნობილია სიჩქარის ვერტიკალზე განაწილების სახე, მხები ძაბვის τ_c სიდიდე კალაპოტის ფსკერთან და ნაკადის სიღრმე H , მხები τ ძაბვის სიღრმეზე განაწილების მოდელი გამოსახულია ფორმით $\tau = \tau_c \frac{y}{H}$.

წარმოდგენილ მოდელში (1.2.1.) მხები ძაბვის ფუნქციას სიჩქარის გრადიენტთან კავშირის საფუძველზე, როცა ცნობილია ღვარცოფის მოცულობითი წონა და ღვარცოფსადინარის ქანობი $\sin\alpha=i$, სადინარის სიგანე B -ს ტოლია და მხები ძაბვის მნიშვნელობა ნაკადისა და კალაპოტის საკონტაქტო ზედაპირზე τ_c -ს, ხარჯის საანგარიშო მოდელი შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს შემდეგი ფორმით:

$$Q = \frac{BH^2}{\tau_c} \int_{\tau_c}^0 f(\tau) d\tau \quad (1.2.2.)$$

შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ღვარცოფთა ზემოქმედების დროს მდგრადობა იკარგება, ნაკადის მოძრაობა ტალღის ფორმით ყალიბდება და განვითარებული პროცესისთვის დამახასიათებელი ხდება ენერგეტიკული პარამეტრების როგორც უწყვეტი, ისე საფეხურისებრი ფორმით შეცვლა.

შემხვედრი წინააღმდეგობებით ნაკადის რეჟიმის შეცვლა, ნაკადის ტალღის სახით ჩამოყალიბება რთული დინამიკური პროცესია. ოპერატიული შესაძლებლობებითა და მიღებული დამოკიდებულებებით ღვარცოფსარეგულაციო ამოცანების პროცესის აღწერა და საანგარიშო მოდელებით მისი შეფასება სპეციალურ სამეცნიერო ლიტერატურაშია მოცემული [7, 14, 18, 28, 29, 30].

რეალობაში ტალღების არსებობა მრავალი სახითაა წარმოდგენილი. ღვარცოფთა ჰიდრაულიკაში ნაკადის მოძრაობას ვხვდებით გრძივი, დინამიკური (დარტყმით) და მონოკლინარული ტალღების ფორმით. აქედან გამომდინარე, მათი შეფასებისა და ენერგეტიკული მახასიათებლების საანგარიშო დამოკიდებულებების გამოყვანის მიზნით

ჰიდროლოგიური და ჰიდრავლიკური პარამეტრების ცვლილების განსხვავებულობის გამო ენერგეტიკული მახასიათებლების საანგარიშო დამოკიდებულებების გამოყვანის მოდელები ერთმანეთისაგან განსხვავებულია.

ღვარცოფებში დამყარებული მოძრაობის დროს, როცა ნაკადის პარამეტრები თანდათანობით იცვლება და ერთი მდგომარეობიდან გადადის მეორეში, ასეთი ფორმით მოძრავი ნაკადი უწყვეტი გრძივი ტალღის ფორმით არის ცნობილი [7, 9, 10, 30, 31, 32].

ტალღის ფორმით ჩამოყალიბებული ღვარცოფის მოძრაობის მიმართულებით ენერგიის ცვლილება როგორც ნაკადის, ისე რეოლოგიური მახასიათებლების ფუნქციას წარმოადგენს. მისი დინების შეფასების მიზნით, როცა ღვარცოფსადინარის ფუძის დაცილება საფარდი სიბრტყიდან Z -ის ტოლია, პიეზომეტრიული დაწნევა P/γ -სა და სიჩქარითი დაწნევა $\frac{\alpha V^2}{2g}$ უდრის, ენერგიის ცვლილება შეიძლება აღიწეროს განტოლებით:

$$E = Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (1.2.3.)$$

წარმოდგენილ მოდელში დაწნევასა და ნაკადის სიდიდეს შორის არსებული დამოკიდებულების საფუძველზე მიღებულია ნებისმიერი სწორკუთხა კვეთის მქონე კალაპოტისთვის არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლება [16, 17, 26]:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{i - i_f + \frac{Q^2}{g\omega^3} \frac{\partial \omega}{K^2 \partial \ell}}{\varphi \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) - \frac{Q^2 B}{g\omega^3 K^2}} \quad (1.2.4.)$$

მიღებული განტოლებით შესაძლებელია შეფასდეს როგორც თანაბარი მოძრაობის, ისე კრიტიკული მდგომარეობის ენერგეტიკული მახასიათებლები.

ენერგეტიკული მახასიათებლების განსაზღვრის დროს ოპერატიულ საშუალებად დაუმყარებელი მოძრაობის ერთგანზომილებიანი დიფერენციალური განტოლებებია მიჩნეული. როცა ნაკადის მოძრაობის საშუალო სიჩქარე V -თი არის აღნიშნული, შერჩეულ კვეთებში ნაკადის ხარჯის მნიშვნელობები უდრის Q -სა და $Q + \partial Q$ -ს, ხოლო ცოცხალი კვეთები ω -თი და $\omega + \partial\omega$ -თია წარმოდგენილი, დიფერენციალურ განტოლებას აქვს სახე [15]:

$$Q - \omega V = Q + \partial Q - V(\omega + \partial\omega) \quad (1.2.5.)$$

წარმოდგენილი განტოლების საფუძველზე დადგენილია, რომ ტალღის ფორმით მოძრავი ღვარცოფის სიჩქარის მნიშვნელობა და შემხვედრი ნაკადის მუდმივი ხარჯი 3-ჯერ აღემატება ნაკადის მოძრაობის საშუალო სიჩქარეს.

როცა ღვარცოფი ცვლადი ხარჯით მოძრაობს და ტალღის dx მონაკვეთზე გათვალისწინებულია q_n მასის შემოერთების პროცესი, ენერგეტიკული მახასიათებლების განსაზღვრა და ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ფორმით განტოლების გამოყვანა ხდება მოდელით [18]:

$$q_n dx + Q = Q + \partial Q + \frac{\partial \omega}{\partial t} dx \quad (1.2.6.)$$

ღვარცოფული პროცესების საწინააღმდეგო ღონისძიებების საპროექტო გადაწყვეტების განმსაზღვრელ პირობას ისეთი ენერგეტიკული მახასიათებლების საანგარიშო დამოკიდებულებები წარმოადგენს, რომელიც სრულად ითვალისწინებს მათ ანომალურობასა და დინამიკურ თავისებურებას.

1.3. ღვარცოფთა ენერგეტიკული მახასიათებლების საანგარიშო

დამოკიდებულებები

კვლევის არსებული პირობებით ენერგეტიკული მახასიათებლების დადგენა რთულდება მათი ფიზიკურ-მექანიკური და რეოლოგიური თვისებების განმსაზღვრელი პარამეტრების დიდ დიაპაზონში ცვლილების

გამო. რეოლოგიის თვალსაზრისით, ზემოთ აღნიშნულთან ერთად, სწრაფი დეფორმაციის პირობებში წყალი შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს, როგორც მყარი სხეული, ხოლო ბმული ღვარცოფი უმნიშვნელო დეფორმაციის პირობებში — როგორც დენადი ტანი.

ბმულ ღვარცოფთა ენერგეტიკაზე კვლევის მონაცემები ადასტურებს, რომ რეოლოგიური თვისებების განმსაზღვრელი პარამეტრების გათვალისწინება მოძრაობის მოდელების შერჩევის დროს ძალზე რთულია და ხშირად მათი გასაშუალებელი მნიშვნელობებია გამოყენებული. ამასთან ერთად, ღვარცოფთა სიმძლავრის რაოდენობრივი მნიშვნელობა ენერგეტიკული მახასიათებლების, კერძოდ, მოძრაობის საშუალო და ზედაპირულ სიჩქარეთა ცვლილებასთანაა უშუალოდ კავშირში. აქვე აღსანიშნავია ის ფაქტიც, რომ სადინართა კალაპოტებს იშვიათად გააჩნია პრიზმული ფორმა, რაც გარკვეულ გავლენას ახდენს მოძრაობის რეჟიმსა და ნაკადის მდგრადობაზე. ამას ადასტურებს ნიუტონურ სითხეებთან მათი შედარება. იდენტურ პირობებში ღვარცოფთა შეუღლებულ სიღრმეთა თანაფარდობა წყალთან შედარებით გაცილებით დიდია, ხოლო კუთრი ენერჯის დანაკარგი — მცირე. ღვარცოფთა მოძრაობის თავისებურების ერთ–ერთ მაკომპრომეტირებელ რეალობად შეიძლება ჩაითვალოს მათი გვერდითი გაფართოების ან კუმშვის ცვლილების კანონზომიერება, ტალღის გავრცელების სიჩქარის დიაპაზონების განსხვავებულობა, რომლებსაც ნიუტონურთან შედარებით სხვა სახე აქვს. თუ წყალში გვერდითი კუმშვის მოძრაობის რეჟიმის შეცვლის ქვედა ზღვარი 0,33–ის ტოლია, ღვარცოფისათვის ეს კრიტერიუმი 0,33±0,45–ის ზღვრებშია მოქცეული, ხოლო ტალღის გავრცელების სიჩქარე სტრუქტურულ კავშირებთან დამოკიდებულებით 200 მ/წმ–მდე მცირდება. მოძრაობის მიმართულების შეცვლისას წარმოქმნება შეშფოთებული ზონა და მისი სიღრმე საწყისთან შედარებით Δh სიდიდით შეიცვლება [20].

ღვარცოფთა ენერგეტიკული მახასიათებლების ანალიზით დასტურდება მნიშვნელოვანი სხვაობა მათ შორის და იგი ეხება კერებიდან შესაძლო

ხარჯის პროგნოზირებას, რეოლოგიურ მახასიათებლებს, დინამიკის საანგარიშო დამოკიდებულებებს, სატრანზიტო უბნებზე მოძრაობის პირობებს და ღვარცოფსადინარში მიმდინარე პროცესებს. როგორც პრაქტიკამ დაადასტურა, ღვარცოფთა მოძრაობის შესწავლის შედეგად ძირითადად ვხვდებით მათ მოძრაობას გრძივი, დინამიკური ან მონოკლინარული ტალღის ფორმით. აქედან გამომდინარე, ქვემოთ მოგვყავს იმ ძირითადი ენერგეტიკული მახასიათებლების განსაზღვრის მეთოდები, რომელთა მხედველობაში მიღება აუცილებელია როგორც სარეგულაციო პროექტირების შემთხვევაში, ასევე მათი პროგნოზირების დროს.

მოძრაობის სიჩქარე წარმოადგენს გრძივი ტალღის ფორმის მოძრავი ღვარცოფის უმნიშვნელოვანეს პარამეტრს, რომლის გარეშე შეუძლებელია საინჟინრო ამოცანათა უმრავლესობის გადაწყვეტა. რიგი მკვლევართა მიერ მიღებული სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულებები, როგორც წესი, განივი ტალღების ფორმით მოძრავი ნაკადებისათვის არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებებზე დაყრდნობით ან ექსპერიმენტებით მიღებულ შედეგებზეა დამყარებული.

ღვარცოფული ნაკადის სიჩქარის ამსახველი დამოკიდებულება მისი შემადგენელი ტალახოვანი მდგენელის სიბლანტესთანაა უშუალოდ დაკავშირებული [21]:

$$\bar{V} = V_0(1 - a),$$

სადაც

$$a = 0,09\sqrt{\eta - \eta_0} - \text{tg}(3n)(\delta - 1), \quad (1.3.1.)$$

სადაც \bar{V} – ღვარცოფის საშუალო სიჩქარეა (მ/წმ);

V_0 – გეომეტრიულად ღვარცოფის იდენტური წყლის ნაკადის სიჩქარე (მ/წმ);

η – საანგარიშო ეფექტური სიბლანტე $\left(\frac{6 \cdot \nabla \vartheta^2}{\rho^4}\right)$;

δ – ღვარცოფის მოცულობითი წონა (ნ/მ³).

$$\frac{\bar{V}}{V_0} = f(\alpha) \quad \text{ანალიზით} \quad \text{ავტორი} \quad \text{ასაბუთებს} \quad \text{საანგარიშო}$$

დამოკიდებულების გამოყენების ზღვრებს და მიუთითებს მის შეზღუდულად გამოყენების შესაძლებლობაზე მასში შემავალი სიბლანტის რეალურ მნიშვნელობასთან შედარებით ნაკლები სიდიდიდან გამომდინარე.

ღვარცოფის მოძრაობის შეფასება მისი ანომალური თვისებების გამო ყოველთვის არ ხერხდება მექანიკის კანონით. ამასთან ერთად, ცნობილია შრომები, რომლებიც მოძრაობის გზაზე ტურბულენტობის გაქრობას მიუთითებს. ზემოაღნიშნული განსაკუთრებით საყურადღებოა ნაკადის ნატანით დატვირთვის დროს.

აკადემიკოს ო. ნათიშვილის თეორიული კვლევები გვიჩვენებს, რომ თანაბარ პირობებში ნატანდატვირთული ნაკადი წყლის ნაკადთან შედარებით უფრო მდგრადია, ხოლო დინამიკური სტუქტურა ძალზე განსხვავებული [14].

წყალთან შედარებით იდენტური ჰიდრავლიკური მახასიათებლების მქონე ბმულ ღვარცოფს შეიძლება ჰქონდეს წყალზე ნაკლები, მეტი ან ტოლი სიჩქარე.

დეფორმაციასა და დამაბულობას შორის კავშირის ამსახველი რეოლოგიური განტოლების გამოყენების საფუძველზე მ. მოსტკოვის მიერ თეორიულად მიღებულ იქნა ბმული ღვარცოფის საშუალო სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულება. წარმოდგენილ დამოკიდებულებაში რეოლოგიური თვისებების ამსახველი ძირითადი პარამეტრი i^* წინააღმდეგობის ქანობის სახით ფუნქციონირებს, რომლის ჰემმარიტი მნიშვნელობის დადგენა შესაბამისი მეთოდის დამუშავებას საჭიროებს [3]:

$$\bar{V} = \frac{2}{\sqrt{3e}} \sqrt{\frac{(1-e)^3}{1-\frac{e}{2}}} \sqrt{g(i-i^*)} \quad , \quad (1.3.2.)$$

სადაც $e = \frac{d}{H}$ კოეფიციენტი გამოხატავს ნაკადში ქვის ჩანართისა და

ნაკადის სიღრმის ურთიერთთანაფარდობას:

i — კალაპოტის ძირითადი ქანობი;

i^* — მოძრაობის წინააღმდეგობის ქანობი;

g — სიმძიმის ძალის აჩქარება (მ/წმ²).

მიუხედავად იმისა, რომ საანგარიშო დამოკიდებულება (1.3.2.) მიღებულია რეალური მონაცემების საფუძველზე და იგი საკმაოდ შეესაბამება სინამდვილეს, მისი გამოყენების საზღვრები შეზღუდულია ბუნებაში ფიქსირებული ღვარცოფების უამრავი სახეობის გამო.

ძალთა დინამიკური წონასწორობის პირობიდან გამომდინარე და რეალურად აღებული ღვარცოფის მასის ნიმუშებზე ჩატარებული ექსპერიმენტების საფუძველზე შემოთავაზებული საშუალო სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულებას შემდეგი სახე აქვს [13]:

$$\bar{V} = \left(14,6i \cdot H / B^4 - 0,346\sqrt{K/B} \right)^{1,7} \quad (1.3.3.)$$

სადაც \bar{V} — ნაკადის საშუალო სიჩქარეა (მ/წმ);

H — ნაკადის სიღრმე (მ);

i — კალაპოტის ქანობი;

K — ღვარცოფის კოლოიდური ნაწილის წონის შეფარდება მყარი ტანის წონასთან;

B — წყლისა და მყარი ნაწილის წონების თანაფარდობა.

მოძრაობის გამარტივებული მოდელის საფუძველზე, რომელშიც მოქმედი რეოლოგიური თვისებების განმსაზღვრელი პარამეტრები გასაშუალებელი მნიშვნელობებითაა მიღებული, ბმული ღვარცოფის საშუალო სიჩქარის განტოლება წარმოდგენილია შემდეგი სახით [12]:

$$\bar{V} = \frac{2}{3} \frac{H^2}{S} \left(\frac{F^2}{H^4} + \frac{S}{H} \right)^{3/2} - \frac{4}{15} \frac{H^3}{S^2} \left[\left(\frac{F^4}{H^4} + \frac{S}{H} \right)^{5/2} - \frac{F^5}{H^{10}} \right] - \frac{F}{2H},$$

$$\text{სადაც } F = \frac{\mu}{2\alpha\beta}; \quad S = \frac{g \sin \alpha - \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi}{\beta^2}$$

H – ნაკადის სიღრმე (მ);

φ – დინამიკური შინაგანი ხახუნის კუთხე;

g – სიმძიმის ძალის აჩქარება (მ/წმ²);

μ – სიბლანტის კოეფიციენტი $\left(\frac{6 \cdot \bar{V}^2}{g^4}\right)$;

α – ღვარცოფის მასის დახრის კუთხე;

β – სიმქისეზე დამოკიდებული კოეფიციენტი.

შვედოვ-ბინგამის მოდელის გამოყენებით შრომაში მიღებულია ღვარცოფული ნაკადების თანაბარი მოძრაობის სიჩქარის საანგარიშო ფორმულა [26]:

$$\bar{V} = C\sqrt{Hi} \sqrt{\left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \left(1 - \frac{tg\varphi}{tg\alpha}\right) tg^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \left(2,68 + 1,32 \frac{h_0}{H}\right)} \quad (1.3.4.)$$

სადაც C – არის სიჩქარის კოეფიციენტი (მ^{1/2}/წმ);

H – ნაკადის სიღრმე;

h_0 – ბმულობის შესაბამისი ექვივალენტური სიღრმე (მ);

φ, α – ღვარცოფის შინაგანი ხახუნისა და ნაკადის კალაპოტის დახრის კუთხე;

i – ღვარცოფსადინარის ქანობი.

სატრანზიტო უბნებზე ღვარცოფის არათანაბარი მოძრაობის თავისუფალი ზედაპირის შეფასების მიზნით პრიზმატული კალაპოტებისათვის მიღებულია განტოლება [14]:

$$\frac{il}{h_0} = \alpha_1 (\eta_2 - \eta_1) - (1 - I_1 \alpha) [F(\eta_2) - F(\eta_1)] , \quad (1.3.5.)$$

სადაც, i არის სატრანზიტო ქანობი;

l – სატრანზიტო უბნის განსახილველ კვეთებს შორის მანძილი (მ);

h_0 – ნაკადის თანაბარი მოძრაობის შესაბამისი სიღრმე (მ);

α, α_1 – კოეფიციენტები, რომელიც ღვარცოფის რეოლოგიურ მაჩვენებელზეა დამოკიდებული;

η_2, η_1 – განსახილველ კვეთში მოძრავი ნაკადის სიღრმის და მისი შესაბამისი თანაბარი მოძრაობის სიმაღლის თანაფარდობებია.

I_1 — კინემატიკურობის მახასიათებელი კოეფიციენტი.

ბმულ ღვარცოფთა დაუმყარებელი მოძრაობის მოდელის გამოყენებით მოყვანილია დიფერენციალური განტოლებები, რომელიც ღვარცოფის ერთჯერადი გრძივი ტალღის ფორმებს აღწერს რეოლოგიასთან კავშირში [19]:

$$\left. \begin{aligned} dl &= \left(V + \sqrt{\frac{Ag\omega}{\alpha B}} \right) dt \\ dl &= \left(V - \sqrt{\frac{Ag\omega}{\alpha B}} \right) dt \end{aligned} \right\}, \quad (1.3.6)$$

სადაც A არის კოეფიციენტი და რეოლოგიურ მახასიათებელზეა დამოკიდებული;

g — სიმძიმის ძალის აჩქარება ($მ/წმ^2$);

V — მოძრავი ტალღის სიჩქარე ($მ/წმ$);

α — სიჩქარის კოეფიციენტი;

ω — ცოცხალი კვეთის ფართობი ($მ^2$);

B — სითხის თავისუფალი ზედაპირის სიგანე ($მ$).

ტალღს ფორმით მოძრავი ღვარცოფისთვის ნაშრომში მოყვანილია თავისუფალი ზედაპირის განტოლება H სიღრმესთან და t დროსთან კავშირში [18]:

$$H^3 = \left[H^3 - q'_n(t - t_0) \right]^3 + \frac{q'_n(X - X_0)\nu_c}{g\beta} \quad (1.3.7)$$

როცა ღვარცოფის ენერგეტიკული მახასიათებლების შეცვლა ღვარცოფწარმოქმნელი კერების თანმიმდევრულად დაცლის პროცესთანაა დაკავშირებული და ტალღის გავლა ერთჯერადი ფორმით ხდება, ასეთ დროს ტალღას გადაადგილებისას გააჩნია მდგრადი პროფილი, ხასიათდება მუდმივი ხარჯითა და სიჩქარით. ტალღის ფრონტის გადაადგილების სიჩქარე გაცილებით ჭარბობს საშუალო სიჩქარეს და

ტალლა არის მონოკლინარული, მოძრაობს თანაბარი რეჟიმით, შესაბამისად, ω_1 და ω_2 ცოცხალ კვეთებზე საშუალო სიჩქარე და ხარჯებია - V_1 , Q_1 და V_2 , Q_2 , ტალლის გავრცელების სიჩქარე [18]:

$$V = \frac{V_1\omega_1 - V_2\omega_2}{\omega_1 - \omega_2} = \frac{Q_1 - Q_2}{\omega_1 - \omega_2} \quad (1.3.8.)$$

როცა $V_1 = 0$ და $\omega_1 = 0$, მაშინ $V = V_2$ კალაპოტის სწორკუთხა ფორმის შემთხვევაში და კვეთებში ნაკადის h_1 და h_2 სიღრმეების დროს ტალლის გავრცელების სიჩქარე [18]:

$$V = \frac{V_1 h_1 - V_2 h_2}{\Delta h} \quad (1.3.9.)$$

რადგან ტალლის წარმოქმნას სიჩქარეების ზრდა შეესაბამება, ამიტომ ტალლის გავრცელების სიჩქარე [18]:

$$V = \sqrt{\frac{g}{2}(h_1 + h_2) + V_2} \quad (1.3.10.)$$

ტალლის ფორმის მქონე ნაკადის მე-2 კვეთში ტალლის მუდმივი სიჩქარის პირობებში [18]:

$$h_1 = \frac{h_2}{2 \cos \theta_1 - 1}$$

ტალლის კვეთში ნაკადის უეცარი შეჩერებისას, როცა $V_1 = V$ და $V_2 = 0$ [18]:

$$V = \sqrt{\frac{g}{2}(h_1 + h_2) \frac{\Delta h}{h_1}} \quad (1.3.11.)$$

ტალლის სიმაღლე [18]:

$$\Delta h = \frac{V h_1}{C} = \frac{V h_1}{\sqrt{g h_1 \cos \theta}} \quad (1.3.12.)$$

წარმოდგენილი საანგარიშო დამოკიდებულებები ნებისმიერი ფორმის კალაპოტისა და ნაკადის ენერგეტიკული მახასიათებლების შემთხვევაში, ინერციის მომენტის გათვალისწინებით, კალაპოტის კვეთის მახასიათებელ პარამეტრად შეიძლება იყოს მიჩნეული.

მოძრაობის რეჟიმის მდგრადობის პირობიდან გამომდინარე, როცა ღვარცოფის რეგულირება მისი განივი კვეთის შემცირებით ხდება, ნაკადის B სადინარის გვერდითი კუმშვის სიდიდე ΔB -სი, რეოლოგიური მახასიათებლები, კერძოდ, ბმულობის ექვივალენტური სიღრმე h_0 -ის, შინაგანი ხახუნის კუთხის კოეფიციენტი φ -ს, კალაპოტის ქანობი $\sin \alpha$ -ს და ნაკადის სიღრმე h -ის ტოლია, ფარდობით სიდიდეს $\frac{\Delta B}{B}$ აქვს შემდეგი სახე [14]:

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{\left(1 - \frac{h_0}{h}\right) 2\sqrt{1 - h_0(h)} + \left(1 - \frac{h_0}{h}\right)\varphi}{1 + \left(1 - \frac{h_0}{h}\right)\varphi} \quad (1.3.13.)$$

განივი ფარდობითი დეფორმაციის გრძივთან ფარდობის შეფასების კრიტერიალურ მახასიათებლად მიღებულია დამოკიდებულება [24]:

$$\mu = \frac{(1 - h_0/h)\varphi}{1 + (1 - h_0/h)\varphi} \quad (1.3.14.)$$

ღვარცოფული პროცესების შეფასების განსაკუთრებულ კრიტერიალურ მაჩვენებელს წარმოადგენს მისი სიგანის სიღრმესთან ფარდობა. ფარდობის სიდიდე უამრავ ფაქტორთანაა დაკავშირებული და განსაკუთრებული როლი სადინარში მოძრავი ნაკადის ხარჯის, კალაპოტის ქანობის, ტრანსპორტირებული ნატანის ჰიდრავლიკური სიმსხოს და სხვა მახასიათებლების ფუნქციას წარმოადგენს. წარმოდგენილი ფარდობის შემთხვევაში ნაკადის მდგრადობის განმსაზღვრელ კრიტერიუმად შეიძლება სხვადასხვა მაჩვენებელი იყოს მიჩნეული.

ღვარცოფის რეგულირების ქვეშ მოიაზრება ნაგებობათა სახეები, რომელთა ქმედება ნაკადზე მისი მოძრაობის რეჟიმის ცვლილებისა და მოწესრიგებისაკენ არის მიმართული. ასეთი ნაგებობის გამოყენების დროს ხდება ნაკადის განივი კვეთის კუმშვა და მისი სტრუქტურის დარღვევა. მიზანშეწონილი წყლის ნაკადების გატარების შემთხვევაში ნაკადის სიგანის სიღრმესთან ან შევიწროებულ ზონაში გასატარებელი ხარჯის მთლიან ხარჯთან ფარდობის კრიტერიალური მაჩვენებელი უნდა აკმაყოფილებდეს

პირობას $B/h \leq 0,33$ ან $Q_1/Q \leq 0,33$. ღვარცოფების შემთხვევაში ეს სიდიდე იზრდება და რეოლოგიური მახასიათებლების ფუნქციას წარმოადგენს. გარემოზე ბუნებრივი ანომალიების, კერძოდ, ღვარცოფების ზემოქმედებით ბიომეტრიულად იცვლება არსებული სიტუაცია და ეკოლოგიური წონასწორობა. ბუნებრივ ანომალიათა შორის ღვარცოფებს იმის გამო ეთმობათ განსაკუთრებული ყურადღება, რომ თითქმის არ არსებობს მთიან რეგიონში განლაგებული ისეთი ქვეყანა, რომელიც არ განიცდის ასეთი ნაკადების ზემოქმედების შემთხვევებს და ეკოლოგიური წონასწორობის რღვევის ფაქტებს.

ღვარცოფის მოსალოდნელი ზემოქმედების ქვეშ მოქცეული ობიექტები ძირითადად გამოტანის კონუსზეა განლაგებული. აღსანიშნავია ისიც, რომ ასეთი ნაკადების ობიექტებზე ზემოქმედება მხოლოდ დინამიკური ზემოქმედებით არ იფარგლება, მან შეიძლება კატასტროფა სხვა გზითაც გამოიწვიოს. ასეთი შემთხვევის მაგალითს წარმოადგენს ღვარცოფთა მიერ წყალსადინარის გადაკეტვა, შექმნილი ხელოვნური კაშხლის გარღვევა და მიღებული უმძიმესი შედეგები.

ღვარცოფის რეგულირების დროს, როცა კალაპოტის კვეთი ვიწროვდება ან ფართოვდება, ირღვევა ნაკადის სტრუქტურა, იცვლება მოძრაობის რეჟიმი და იკარგება ნაკადის მდგრადობა.

დეფორმაციის შედეგად ნაკადი იკუმშება ან იჭიმება. ფარდობით სიდიდეს Δh ტალღის სიმაღლისა ნაკადის h სიმაღლესთან აქვს სახე [14]:

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{2\sqrt{(1-h_0/h)\varphi} + (1-h_0/h)\varphi}{4} \quad (1.3.15.)$$

ენერგეტიკული მახასიათებლების ფარდობითი ცვლილების საანგარიშოდ მოცემულია დამოკიდებულება:

$$\frac{\Delta h}{H} = \frac{4}{\left[2\sqrt{(1-h_0/H)\varphi} + (1-h_0/H)\varphi\right]^2} \quad (1.3.16.)$$

ღვარცოფთა სპეციფიკური ბუნების გამო მათი სარეგულაციო საინჟინრო გადაწყვეტებს გააჩნია მკაცრად განსხვავებული სახე და დანიშნულება.

ღვარცოფსარეგულაციო ნაგებობათა კონსტრუქციების შერჩევის სირთულე ენერგეტიკული მახასიათებლების საფუძველზე საჭიროებს რეოლოგიური მახასიათებლების გათვალისწინებას დამრტყმელ ზემოქმედებაში. ერთ-ერთ განსაკუთრებულობას ჩამოყალიბებული ღვარცოფის შემხვედრ წინააღმდეგობაზე ზემოქმედებისას წარმოადგენს მისი ფრონტალური ნაწილის სიმკვრივის განსხვავებულობა სხვა ნაკადებთან შედარებით და სიჩქარის განაწილების ვერტიკალზე სულ სხვა სურათია.

ღვარცოფის ზემოქმედება შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ძალური ეფექტით არ არის განსაზღვრული, არამედ მან შეიძლება გამოიწვიოს სადინართა კალაპოტების ჩახერგვა, ხელოვნურად კაშხლების წარმოქმნა, რომლის გარღვევას შეიძლება მოჰყვეს უმძიმესი შედეგები [14].

აქედან გამომდინარე, ღვარცოფის მდგრადობის განმსაზღვრელ კრიტერიუმებს რეოლოგიასთან კავშირით მოძრავი ნაკადის ქანობი

წარმოადგენს, როცა $\alpha = \left(1 - \frac{h_0}{h}\right)\phi$ [24]:

$$i = 0,0027 \sqrt{\frac{d}{h}} \frac{(2\sqrt{\alpha} + \alpha + 4)^2}{\alpha^{333} [(\alpha' - 1)(2\sqrt{\alpha} + \alpha + 2) - 2]^2} \quad (1.3.17.)$$

ზემოთ მოყვანილი ენერგეტიკული მახასიათებლების საანგარიშო დამოკიდებულებებით მიღებული შედეგები, როგორც გაანგარიშებამ გვიჩვენა, ზოგჯერ კარგად ემთხვევა ბუნებაში ფიქსირებულ ღვარცოფთა მახასიათებლებს.

წარმოდგენილი საანგარიშო დამოკიდებულებები სრულად მაინც ვერ პასუხობს მოვლენის არსს. ხშირად საანგარიშო დამოკიდებულებებში გათვალისწინებული არ არის ნაკადის ენერგეტიკის ისეთი განმსაზღვრელი პარამეტრი, როგორცაა სიმქისე და საანგარიშო მოდელები მხოლოდ

წყლის ენერგეტიკის განმსაზღვრელი პარამეტრების გათვალისწინებით ხდება.

მოდრავი ღვარცოფის მიმართ სადინართა წინააღმდეგობის კანონზომიერება დიამეტრულად განსხვავებულია წყალსადინართა ასეთივე პარამეტრებისაგან. ზემოაღნიშნული მიუთითებს სიჩქარის ვერტიკალზე განაწილების კანონზომიერების შესწავლის არასრულყოფილ მოდელებზე, რომლებიც სრულად არ ასახავს მოვლენის არსს და დინების მოდელირების ამოცანა გადაუწყვეტელი რჩება. იმავე შეიძლება ითქვას ხარჯის განსაზღვრის მოდელზე. განზოგადებული ფორმის მოდელით ღვარცოფის მოძრაობის წარმოდგენა საშუალებას მოგვცემს თეორიულად გადაწყდეს მათი დინამიკის რიგი ამოცანები და გათავისუფლდეს იგი ემპირიზმის ტყვეობიდან.

1.4. აქტივაციის და დაზიანების ხარისხის მიხედვით ღვარცოფთა

გავრცელება საქართველოს ტერიტორიაზე

ღვარცოფების ფორმირება შეიძლება განხორციელდეს მისი როგორც თხიერი, ისე მყარი შემადგენლის მიერ. აქედან გამომდინარე, მათი აქტივაციისა და გამოწვეული ზარალის შესაძლებლობის შეფასებას განმსაზღვრელი პირობების მოდელირება და ტიპიზაცია წარმოადგენს. მოვლენის სირთულის გამო ღვარცოფთა ფორმირებაზე მკვლევართა შეხედულება ხშირ შემთხვევაში ერთმანეთისაგან არის განსხვავებული. სადღეისო მდგომარეობით ღვარცოფის წარმოქმნის ძირითადი სამი ტიპია გამოყოფილი. აღსანიშნავია ისიც, რომ ღვარცოფთა წარმოქმნის შემოთავაზებული რანჟირება მოიცავს მათი ფორმირების თითქმის ყველა სახეობას, თუმცა იგი მაინც ვერ იძლევა მოვლენაზე სრული წარმოდგენის შესაძლებლობას.

ღვარცოფთა წარმოქმნის კერებს განსაკუთრებული როლი უჭირავს მათი აქტივიზაციის ხარისხისა და გამოწვეული ზარალის პროგნოზირებაში.

საქართველოში ღვარცოფების ფორმირებაზე ჩატარებული კვლევების მიხედვით ღვარცოფული კერების 4 სახეა ძირითადად გამოყოფილი, რომელთა შორის აღსანიშნავია ეროზიული ღრანტეები, მორენული დანალექები, ციცაბო ფერდობების მოშიშვლებული ზედაპირები და ჩახერგილი სადინარების კალაპოტები და ტბები [2].

ღვარცოფული კერების კლასიფიკაციის ანალოგიური კვლევებია გამოქვეყნებული სამეცნიერო ნაშრომებში [4, 9, 5].

ღვარცოფების გაანგარიშებისა და მოდელირებისაგან მათი წარმოქმნის კერების ტიპოლოგიის საკითხები წარმოდგენილია ნაშრომში [2].

ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე, ღვარცოფწარმოქმნელ კერებს განსაკუთრებული ადგილი უჭირავს ღვარცოფთა კლასიფიკაციასა და სახეობების გამოყოფის საქმეში. შესაბამისად, ღვარცოფთა გამონატანის მყარი მასის, ე.ი. სიმძლავრის მიხედვით მათი დახასიათება შემდეგნაირად შეიძლება იქნეს ჩამოყალიბებული: მძლავრი, რომელთაც აქვთ 100000 მ³–ზე მეტი მყარი მასალა, საშუალო სიმძლავრის, რომელთა მიერ გამოტანილი მყარი მასის მოცულობა 10000 მ³–დან 100000 მ³–მდე მერყეობს და მცირე სიმძლავრის, რომელთა გამონატანი მასა 10 000 მ³ არ აღემატება.

კატასტროფული ღვარცოფების ძლიერ ზეგავლენას განიცდის მრავალი დასახლებული პუნქტი, სასოფლო–სამეურნეო სავარგულები, ჰიდროტექნიკური სამელიორაციო ობიექტები, სამთო–ტურისტული კომპლექსები, ლანდშაფტური ინფრასტრუქტურა და სხვა. ღვარცოფული ნაკადების ზემოქმედებით გამოწვეული უარყოფითი სოციალურ–ეკონომიკური, დემოგრაფიული და ეკოლოგიური შედეგები გარემოს ყველა სფეროს ეხება.

საქართველოს გარემოს და ბუნებრივი რესურსების სამინისტროს, გარემოს ეროვნული სააგენტოს მონაცემებით ღვარცოფთა რაოდენობა მუნიციპალიტეტების მიხედვით მოცემულია სურათზე (სურ. 1.)



სურ. 1. ღვარცოფების რაოდენობა რეგიონების მიხედვით

საქართველო წარმოადგენს ევროპის ერთ-ერთი ექსტრემალური და მაღალი სიხშირის ღვარცოფთა ზემოქმედების ობიექტს.

წლების მანძილზე მთიანი ზონების გარკვეულმა ადგილებმა განიცადა გავლილი ღვარცოფების ზემოქმედების კატასტროფული შედეგები და სახეობების მიხედვით თითქმის ყველა სახის ღვარცოფია დაფიქსირებული. ღვარცოფფორმირებაში განსაკუთრებული როლი გააჩნია წვიმებს, თავსხმა წვიმებს, მდნარ წყლებს, მყინვარებისა და მორენების, ბუნებრივი წყალსაცავების წყლებს. პროცენტული გადანაწილება ღვარცოფსადინარებში ერთმანეთისგან მნიშვნელოვნად განსხვავებულია, მაგრამ უპირატესი ეფექტით გამოირჩევა წვიმები და თავსხმა წვიმები — 79 % -ით.

საქართველოს მთიან ზონებში ღვარცოფები ყველგან არის ფიქსირებული და მოიცავს სამეგრელო-ზემო სვანეთის, გურიის, აჭარის, იმერეთის, რაჭა-ლეჩხუმის, სამცხე-ჯავახეთის, შიდა ქართლის, ქვემო ქართლისა და კახეთის რეგიონებს.

თავი 2. ზმულ ღვარცოფთა მოძრაობა ღია კალაპოტებში

2.1. ჰიპერკონცენტრირებული ღვარცოფის მოძრაობის მათემატიკური

მოდელი

ღვარცოფთა ზემოქმედება გარემოზე ეკოლოგიური წონასწორობის რღვევასთან ერთად იწვევს ლანდშაფტური ინფრასტრუქტურის შეცვლას. მოვლენა ძალზე რთულია და მისი ზემოქმედების ზონებში სარეგულაციო ღონისძიებათა შერჩევა დიდ სირთულეებთანაა დაკავშირებული. აღნიშნულიდან გამომდინარე, მიუხედავად გამოყენებული ბრძოლის მეთოდების მრავალფეროვნებისა, დაბალია გარემოსდაცვითი ღონისძიებების ეფექტურობის დონე და ბრძოლის ადეკვატური ღონისძიებების შერჩევის შესაძლებლობები. აღნიშნული გამოწვეულია იმით, რომ ღვარცოფები ხასიათდება ანომალურობით, მოძრაობის დროს ნაკლებად ემორჩილება დინამიკური ლერძიდან გადახრას, შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ახორციელებს სრული ენერგიით ზემოქმედებას, სადინარში მოძრაობის დროს თვითონ იქმნის კალაპოტს და ხასიათდება მაღალი ტრანსპორტუნარიანობით. გამომდინარე აქედან, მოვლენის შეფასების როგორც ინოვაციური, ისე ადაპტირებული მოდელები დახვეწას და სრულყოფას საჭიროებს.

ნაშრომში გამოკვეთილია მცდელობა იმ ენერგეტიკული საანგარიშო დამოკიდებულებების გამოყენებისა, რომლებიც განმსაზღვრელ ადგილს დაიკავენ მოძრაობის ამსახველ მათემატიკურ მოდელებთან შორის ლანდშაფტური ინფრასტრუქტურის დაცვითი ღონისძიებების გაანგარიშების მეთოდოლოგიის სრულყოფისას.

შემხვედრი წინააღმდეგობების ღვარცოფებზე მნიშვნელოვანი ზემოქმედებისას ნაკადის მდგრადობა ირღვევა და მოძრაობა ყალიბდება ტალღის ფორმით. უმნიშვნელო ზემოქმედების შემთხვევაში ნაკადი ერთი სტაციონალური მდგომარეობიდან მეორეში მდორედ გადადის [15, 16, 18, 33].

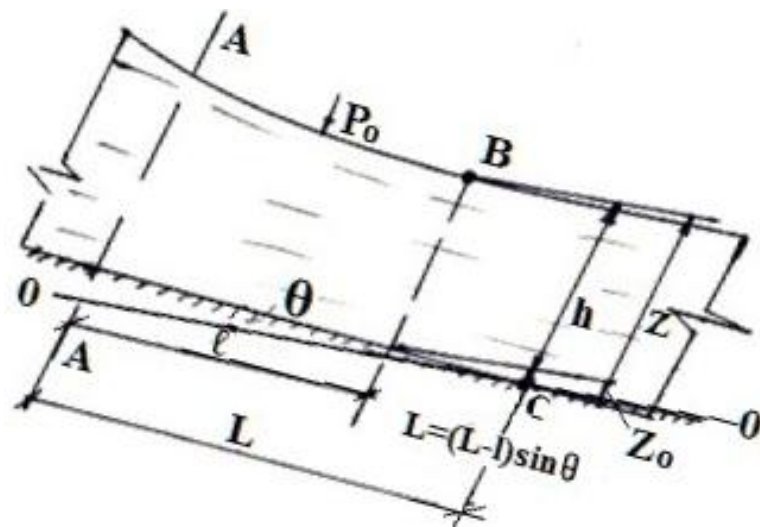
აქედან გამომდინარე, ერთ შემთხვევაში ნაკადის ენერგეტიკული მახასიათებლები იცვლება ნახტომისებურად, ხოლო მეორე შემთხვევაში ეს პროცესი მდორედ მიმდინარეობს, ამიტომ მოვლენის აღწერა განსხვავებული მოდელების ადაპტირებასთანაა დაკავშირებული. აღსანიშნავია ისიც, რომ ენერგეტიკული მახასიათებლების, კერძოდ, სიჩქარის, სიღრმის, ხარჯის უწყვეტ ან ნახტომისებურ ცვლილებას თან ახლავს ტალღის ფორმით მოძრაობის ნაკადის ამპლიტუდის მნიშვნელოვანი ცვლილება და დამრტყმელი ძალის ეფექტურობის გაძლიერება ან

შესუსტება. მოვლენის სირთულიდან გამომდინარე, წარმოდგენილი პროცესის მათემატიკურად აღწერა და ადაპტირებულ მოდელეებზე დაყრდნობით მიღებული შედეგებით ღვარცოფსარეგულაციო ნაგებობების კონსტრუქციული ელემენტების საპროექტო პარამეტრების შერჩევა ძალზე რთულია ბუნებაში ფიქსირებული ღვარცოფების მრავალფეროვნების გამო და შედეგი ხშირად კატასტროფით მთავრდება.

არსებული სტატისტიკური მასალებიდან გამომდინარე და სამეცნიერო შრომებზე დაყრდნობით, ენერგეტიკული მახასიათებლების განსაზღვრის მეთოდიკა და მოვლენებთან მოდელეების ადაპტაცია, პირველ რიგში, ადვილად შესაძლებელი პროცესების ანალიზით, მათ შორის კავშირის დადგენითა და, შემდგომ, თეორიის შექმნით არის გათვალისწინებული [26, 34, 35, 36].

როცა ღვარცოფის რეჟიმი ცვალებადია, მაშინ ნაკადი თავისუფალი ზედაპირის განსხვავებული ფორმით მოძრაობს. აღნიშნული ძირითადად სადინარის კალაპოტის შევიწროება-გაფართოებით, განივი კვეთის ფორმითა და ფუძის ქანობის ცვლილებით არის გამოწვეული. ხშირად ვხვდებით მოძრავ ნაკადს ისეთი თავისუფალი ზედაპირით, როცა მისი სიჩქარე იცვლება ცოცხალ კვეთში. ასეთ შემთხვევაში, აუცილებელია მხედველობაში იქნეს მიღებული ცოცხალი კვეთის გავლენა მოძრაობაზე, რაც ღვარცოფის სიგანისა და სიღრმის ცვალებადობის გათვალისწინებით მიიღება.

წრფივად და არათანაბრად მოძრავი ჰიპერკონცენტრირებული ღვარცოფის მოძრაობის მოდელის სახე და მისი საანგარიშო სქემა წარმოდგენილია ნახ. 1-ზე.



ნახ. 1. ღვარცოფის მოძრაობის საანგარიშო მოდელის სქემა

ნაკადის გრძივი ჭრილის მიხედვით, როცა ღვარცოფის მოძრაობა არათანაბარია, თავისუფალი ზედაპირის მრუდის ფორმის დადგენის მიზნით განვიხილავთ მის ზედაპირზე მდებარე B წერტილს. აღნიშნული წერტილის ათვლის საწყისი $A - A$ კვეთიდან l მანძილით არის დაშორებული. ამასთან ერთად, საფარდი სიბრტყე გატარებულია C წერტილში და იგი $A - A$ კვეთიდან L მანძილით არის დაშორებული, ამიტომ, როცა B წერტილის $O - O$ საფარდი სიბრტყიდან დაშორება Z -ის ტოლია, შესაბამისად, სრული ენერჯის მნიშვნელობა:

$$E = Z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g}. \quad (2.1.1.)$$

ნაკადის ნელგვლადი მოძრაობის ენერჯის განტოლებიდან გამომდინარე, დაწნევის დანაკარგის სიდიდე შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს შემდეგი სახით:

$$\frac{d\left(Z + P_0 / \gamma + \frac{\alpha V^2}{2g}\right)}{d\ell} = -I \quad (2.1.2.)$$

ენერჯის განტოლებიდან გამომდინარე, B წერტილის Z კოორდინატი საფარდი სიბრტყის მიმართ ღვარცოფის შემთხვევაში რეოლოგიური მახასიათებლების, კერძოდ, ბმულობის ექვივალენტური სიღრმის h_0 -ის და შინაგანი ხახუნის კუთხის კოეფიციენტის $\varphi = \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$ ფუნქციას

წარმოადგენს, ე.ი.:

$$Z = h(1 - h_0/h)\varphi + Z_0 \quad (2.1.3.)$$

როცა $Z_0 = (L - \ell)i$, მაშინ ღვარცოფის სიღრმის შემასწორებელი

კოეფიციენტი $K = \left(1 - \frac{h_0}{h}\right)\varphi$,

$$Z = Kh + Z_0 \quad (2.1.4.)$$

შესაბამისად, პიეზომეტრიული ქანობის სიდიდე

$$\frac{dZ}{d\ell} = K \frac{dh}{d\ell} - i, \quad (2.1.5.)$$

რადგან ღვარცოფსადინარეზში ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ყველა წერტილზე მოქმედი წნევა $p = \text{const}$,

$$\frac{d(P/\gamma)}{d\ell} = 0 \quad (2.1.6.)$$

(2.1.1.)-ის მე-(3) წევრისათვის გვექნება:

$$\frac{d\left(\frac{\alpha V^2}{2g}\right)}{d\ell} = \frac{d\left(\frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2}\right)}{d\ell} \quad (2.1.7.)$$

მოძრაობის მიმართულებით რეალობაში ღვარცოფის მოძრაობას შეიძლება ნაკადი ჰქონდეს უცვლელი, მუდმივი ან ცვალებადი ხარჯით.

როცა ნაკადის გადაადგილება მუდმივი ხარჯით ხდება, ბმული ღვარცოფის შემთხვევაში კვეთის ენერგია და ცოცხალი კვეთის ფართობი სიდიდით განსხვავებულია ნიუტონური სითხეების მახასიათებელი ანალოგებისაგან, ე.ი. ცოცხალი კვეთის ფართობი ღვარცოფის შემთხვევაში:

$$\omega_{\text{ფ.}} = K\omega \quad (2.1.8.)$$

ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე, (2.1.7.) მიიღებს სახეს:

$$\frac{d\left(\frac{\alpha V}{2g}\right)}{d\ell} = \frac{d\left(\frac{\alpha Q^2}{2gK^2\omega^2}\right)}{d\ell} \quad (2.1.9.)$$

შესაბამისად, (2.1.7.) დამოკიდებულებას ექნება სახე:

$$\frac{d\left(\frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2 K^2}\right)}{d\ell} = \frac{\alpha Q^2}{2gK^2} \frac{d\left(\frac{1}{\omega^2}\right)}{d\ell} = -\frac{\alpha Q^2}{g\omega^3 K^2} \frac{d\omega}{d\ell} \quad (2.1.10.)$$

მოცემულ შემთხვევაში, როცა კალაპოტი არაპრიზმატულია და მხედველობაში მივიღებთ, რომ მისი განივი კვეთი სიგრძისა და სიღრმის ფუნქციას წარმოადგენს,

$$\frac{d\omega}{d\ell} = \frac{\partial\omega}{\partial\ell} + B \frac{dh}{d\ell} \quad (2.1.11.)$$

(2.1.11.) ფორმულის გათვალისწინებით (2.1.7.)-ში:

$$\frac{d\left(\frac{\alpha V^2}{2g}\right)}{d\ell} = -\frac{\alpha Q^2}{g\omega^3 K^2} \frac{\partial\omega}{\partial\ell} - \frac{\alpha Q^2}{g\omega^3 K^2} B \frac{dh}{d\ell} \quad (2.1.12.)$$

(2.1.5.)-ის, (2.1.6.)-ის, (2.1.12.)-ის გათვალისწინებით (2.1.2)-ში გვექნება:

$$i - I = K \frac{dh}{d\ell} - \frac{\alpha Q^2}{K^2 \omega^3 g} \frac{\partial\omega}{\partial\ell} - \frac{\alpha Q^2}{K^2 \omega^3 g} B \frac{dh}{d\ell} \quad (2.1.13.)$$

(2.1.13.) გარდაქმნებითა და გამრავლების საფუძველზე ბმული ღვარცოფის მოძრაობის დიფერენციალური განტოლება მიიღებს სახეს:

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{1}{K} \frac{i - I - \frac{\alpha Q^2}{K^2 \omega^3 g} \frac{\partial\omega}{\partial\ell}}{1 - \frac{\alpha Q^2}{gK^3 \omega^3} B} \quad (2.1.14.)$$

(2.1.14.) განტოლება აღწერს მოძრაობის მიმართულებით ბმული ღვარცოფის ცვლილების კანონზომიერებას.

როცა ღვარცოფი მოძრაობის მიმართულებით სიგრძეზე ხასიათდება ცვალებადი Q ხარჯით, ე.ი. როცა $Q/\ell = q$ და $dQ/d\ell = q$, ვიყენებთ ჰიდრავლიკის საერთოდ ცნობილ განტოლებას:

$$E = Z + hK + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (2.1.15.)$$

სადაც E - განსახილველ კვეთში სრული ენერგიის მნიშვნელობა;

Z - სადინარის ფუძის დაცილება შერჩეული კვეთისათვის ჰორიზონტალურ საფარდ სიბრტყეში;

h - ენერგია, რომელიც შეესაბამება ნაკადის სრულ სიღრმეს მოცემულ კვეთში და მისი მნიშვნელობა $h = \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) \varphi \cdot h = Kh$;

ω - შესაბამისად ცოცხალი კვეთის ფართობი, რომელიც შეესაბამება ნაკადის სრულ სიღრმეს $\omega = K\omega$;

V, Q - ცოცხალ კვეთში საშუალო სიჩქარე და ხარჯი;

შესაბამისად, მოძრაობის მიმართულებით პრიზმატული კალაპოტის შემთხვევაში:

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{dZ}{d\ell} + K \frac{dh}{d\ell} + \frac{1}{2gK^2} \frac{d(Q^2\omega^{-2})}{d\ell}$$

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{dZ}{d\ell} + K \frac{dh}{d\ell} + \frac{1}{2gK^2} \left(2Q\omega^2 \frac{dQ}{d\ell} - 2Q^2\omega^3 \frac{d\omega}{d\ell} \right) \quad (2.1.16.)$$

თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ

$$\frac{dh}{d\ell} = -I; \quad \frac{dZ}{d\ell} = -i; \quad \frac{dQ}{d\ell} = q; \quad \frac{d\omega}{d\ell} = \frac{d\omega}{dh} \frac{dh}{d\ell} = b \frac{dh}{d\ell};$$

(2.1.16.) განტოლებით გვექნება:

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{1}{K} \frac{i - I - \frac{\alpha Q}{K^2 \omega^2 g} \frac{dQ}{d\ell}}{1 - \frac{\alpha Q^2 b}{K^3 \omega^3 g}} \quad (2.1.17.)$$

ე.ი.:

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{1}{K} \frac{i - I - \frac{\alpha Q}{K^2 \omega^2 g} q}{1 - \frac{\alpha Q^2 b}{K^3 \omega^3 g}} \quad (2.1.18.)$$

h - საანგარიშო კვეთში ღვარცოფის სიღრმე (მ);

ω - ცოცხალი კვეთის ფართობი (მ²);

Q - ღვარცოფის ხარჯი (მ³/წმ);

q - ღვარცოფის ხვედრითი ხარჯი (მ²/წმ);

V - ღვარცოფის საშუალო სიჩქარე;

I – ჰიდრავლიკური ქანობი.

წინააღმდეგობის ქანობს თუ გამოვსახავთ ბმული ღვარცოფისათვის
 $I = \frac{Q^2}{K^2 \omega^2 c^2 h}$ – ით, (2.1.14.) და (2.1.17.) განტოლებები მიიღებს სახეს:

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{1}{K} \frac{i - \frac{Q^2}{K^2 \omega^2 c^2 h} - \frac{Q^2}{K^2 \omega^3 g} \frac{\partial \omega}{\partial \ell}}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g K^3 \omega^3}} \quad (2.1.19.)$$

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{1}{K} \frac{i - \frac{Q^2}{K^2 \omega^2 c^2 h} - \frac{\alpha Q q}{K^2 \omega^3 g}}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g K^3 \omega^3}} \quad (2.1.20.)$$

(2.1.19.) განტოლება წარმოადგენს ბმული ღვარცოფის არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებას არაპრიზმატულ კალაპოტში. როცა ხარჯი ცვლადია, ასეთ შემთხვევას შეესაბამება (2.1.20.) განტოლება.

ზემოთ მოყვანილი შემთხვევები ასახავს ღვარცოფის მოძრაობას მისი სიღრმის ცვლილების მოძრაობის მიხედვით არაპრიზმატულ კალაპოტში.

პრიზმატული კალაპოტის შემთხვევაში, როცა $\frac{\partial \omega}{\partial \ell} = 0$ ან $\frac{dQ}{d\ell} = 0$ გვაქვს თანაბარი მოძრაობა, ე.ი. (2.1.19.) განტოლებას ექნება სახე:

$$\frac{1}{K} \left(i - \frac{Q^2}{K^2 \omega^2 c^2 h} \right) = 0 \quad (2.1.21.)$$

რადგან $\frac{1}{K} \neq 0$ თანაბარი მოძრაობის ხარჯი:

$$Q = \omega^2 K^2 c^2 h i \quad (2.1.22.)$$

შესაბამისად, თანაბარი მოძრაობის საშუალო სიჩქარე

$$V = Kc\sqrt{hi} = \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) \psi c \sqrt{hi} \quad (2.1.23.)$$

მიღებულ (2.1.23.) განტოლებაში h_0 არის ბმულობის ექვივალენტი სიმაღლე და c ბმულობასთან ღვარცოფის γ მოცულობითი წონა, შინაგანი ხახუნის კოეფიციენტთან $\psi = \left(\sqrt{1 + tg^2 \varphi} - tg \varphi \right)^2$ კავშირში შეიძლება გაანგარიშებულ იქნეს ფორმულით:

$$h_0 = \frac{2c}{\alpha \sqrt{\psi}} \quad (2.1.24.)$$

როგორც (2.1.19.) და (2.1.20.) განტოლების ანალიზი გვიჩვენებს, მათი მარჯვენა ნაწილის მრიცხველი და მნიშვნელი წარმოადგენს ნიშანცვლად სიდიდეებს. მრიცხველის 0–თან ტოლობა შეესაბამება თანაბარი ძრაობის რეჟიმს, ხოლო მნიშვნელის 0–თან ტოლობა კვეთის ენერჯის მინიმალური

მნიშვნელობის შემთხვევას, ე.ი. როცა ნაკადის სიღრმე კრიტიკული სიღრმის ტოლი ხდება, ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე, კრიტიკული მდგომარეობის შემთხვევა:

$$1 - \frac{\alpha Q^2}{gK^3 \omega^3} B = 0 \quad (2.1.25.)$$

მიღებული (2.1.14.)-ის საფუძველზე შეიძლება დადგენილი იქნეს კრიტიკული სიღრმე:

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = K \frac{\omega^3}{B} \quad (2.1.26.)$$

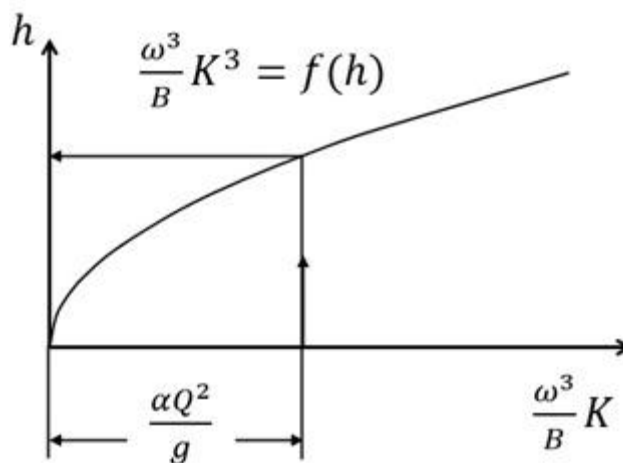
მოცემული კვეთის შემთხვევაში რეოლოგიური მახასიათებლების სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს კრიტიკული სიღრმის განსაზღვრა წარმოებს (2.1.1.) ცხრილის მიხედვით

ცხრილი 1.

კრიტიკული სიღრმის საანგარიშო ცხრილი

ღვარცოფის სიღრმე h (მ)	ღვარცოფსადინარის სიგანე B (მ)	ცოცხალი კვეთის ფართობი ω (მ ²)	ღვარცოფის რეოლოგიური მაჩვენებელი K	$\frac{\omega^3}{B} \left[\left(1 - \frac{h_0}{h} \right) \varphi \right]$
1				
2				

ცხრილის შედგენის შემდეგ კონკრეტული შემთხვევისათვის თვალსაჩინოების მიზნით ხდება გრაფიკის აგება.



ნახ. 2. კრიტიკული სიღრმეების საანგარიშო გრაფიკები.

მიღებულ გრაფიკზე $h = f\left(\frac{\omega}{B}K\right)$ აფცისათა ღერძზე გადაზომვით $\frac{Q^2}{g}$ მნიშვნელობას და მისი შესაბამისი სიღმე იქნება კრიტიკული სიღრმე.

2.2. ღია სადინარში ბმული ღვარცოფის ხარჯის განსაზღვრა

ღვარცოფები ხასიათდება მოძრაობის ანომალურობით, მოძრაობის დროს მისი ზემოქმედება შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ნაკადის სრული ენერგიით ხდება, სადინარში მოძრაობის დროს თვითონ იქმნის კალაპოტს, ხასიათდება მაღალი ტრანსპორტუნარიანობით. მოვლენის შეფასების სირთულიდან გამომდინარე, მისი შეფასების დროს ადაპტირებული მოდელები დახვეწასა და სრულყოფას საჭიროებს.

თეორიული კვლევებით მიმდინარეობს მცდელობა იმ საანგარიშო ენერგეტიკული მახასიათებლების საანგარიშო დამოკიდებულებების მიღებისა, რომლებსაც განსაზღვრულ ფუნქცია ექნება მოძრაობის შერჩეულ მოდელებში.

შემხვედრი წინააღმდეგობების ღვარცოფებზე ზემოქმედება როცა არის მნიშვნელოვანი, მისი დინამიკური სტრუქტურა იცვლება და მოძრავი ტანი ტალღის ფორმით ჩამოყალიბდება, ხოლო უმნიშვნელო ზემოქმედების დროს ნაკადის რეჟიმი ერთი სტაციონალური მდგომარეობიდან მეორეში გადადის.

ღვარცოფთა დინამიკის განმსაზღვრელი ფაქტორების შეფასების არსებული უამრავი დამოკიდებულებიდან უპირატესი გამოყენებით რეკომენდაცია შეიძლება მიეცეს იმ საანგარიშო ფორმულებს, რომლებიც ექსპერიმენტული კვლევის მონაცემებზე დაყრდნობით კარგ დამთხვევას იძლევა რეალურად ბუნებაში ფიქსირებულ მონაცემებთან.

ზოგადად მოძრავი მასის მახასიათებლების ზუსტი შეფასება და ენერგეტიკული მახასიათებლების ინტენსივობის სრულყოფილად წარმოსახვა საშუალებას იძლევა აღწერილი იქნეს როგორც ნაკადის ჰიდრავლიკის და ჰიდროლოგიის მახასიათებლები და ამასთანავე პროგნოზირება გაუკეთდეს მოძრავი ნაკადის შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების შედეგებს.

ბუნებაში ფიქსირებულ ანომალიათა შორის სტიქიურ–დამანგრეველი აქტივიზაციით წყალდიდობებთან, მიწისძვრებსა და მეწყერებთან ერთად ღვარცოფებს გამორჩეული ადგილი უჭირავთ და რისკების უმაღლესი კატეგორიის რანგშია აყვანილი.

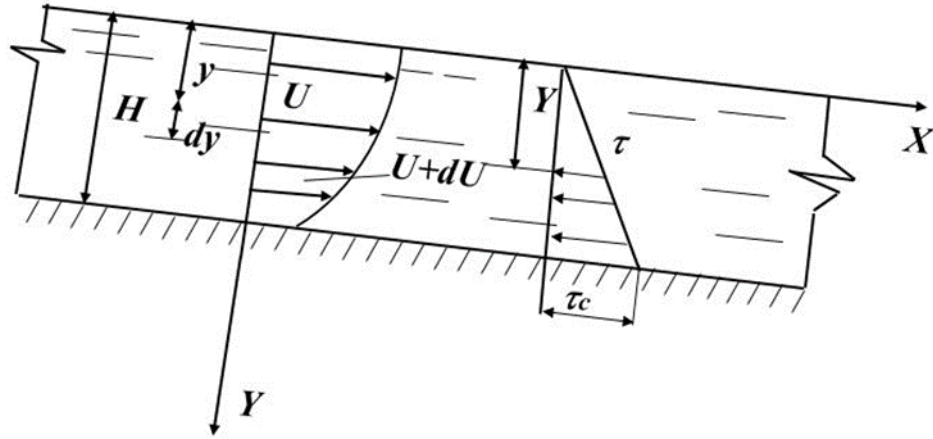
ღვარცოფთა ბუნებაში შემადგენელი კომპონენტების ცვლილების გამო დინამიკური მახასიათებლები დიდ დიაპაზონში ვარირებს.

აღნიშნულს ადასტურებს როგორც მეცნიერთა შეხედულებებით მოვლენაზე განსხვავებული წარმოდგენები, ასევე კვლევებით მიღებული გაანგარიშების შედეგები. აღნიშნულს კიდევ უფრო ამდაფრებს მოვლენის დინამიკაზე მეცნიერთა განსხვავებული შეხედულებები, რომლებიც ძვრის სიჩქარესა და გრადიენტს შორის კავშირს სხვადასხვა სახის მოდელებით აღიქვამს.

კვლევებში მიმდინარეობს მცდელობა დინამიკური მახასიათებლების შეფასების დროს განსაკუთრებული ყურადღება მახვასა და სიჩქარის გრადიენტს შორის კავშირის ამსახველ მოდელს დაეთმოს. კვლევის ობიექტთან მოდელის შერჩევის სტრატეგიის ასეთი ფორმით გამოყენებით შესაძლებელი გახდება სრულყოფილად გათვალისწინებული იქნეს როგორც გენეზისი, ისე მისი წარმოქმნისა და მოძრაობის მექანიზმი, სადინარის კალაპოტის მორფომერტია, დინამიკა და შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ურთიერთმოქმედების შესაძლებლობები.

ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე, ღვარცოფის დინამიკის მახასიათებლების შეფასების მიზნით, კერძოდ, ღვარცოფის წარმადობის განსაზღვრის დროს გამოიყენება მოდელი, რომელშიც ხარჯის სიდიდე მის დაძაბულ–დეფორმირებულ მახასიათებლებთან არის დაკავშირებული [14, 64, 65, 66].

ჩვენს შემთხვევაში უდაწნეო ნაკადის სადინარში მოძრაობის მოდელი და საანგარიშო სქემა მოცემულია ნახ.3.–ზე



ნახ.3. ღვარცოფის თანაბარი უდაწნეო მოძრაობის სქემა

თანაბრად მოძრავი უდაწნეო ნაკადის ხარჯის Q -სა და H სიღრმის შემთხვევაში შეიძლება განსაზღვრული იქნეს დამოკიდებულებით:

$$Q = B \int Y du, \quad (2.2.1.)$$

სადაც B – სწორკუთხოვანი განივი კვეთის მქონე კალაპოტის სიგანეა;

u – ნაკადის ადგილობრივი სიჩქარეა.

ნახ.3.-დან ნაკადში სიჩქარის და მხები ძაბვის ვერტიკალზე განაწილების ეპიურების შესაბამისად თუ მხები ძაბვის მნიშვნელობა სადინარის ფსკერზე:

$$\tau_c = \gamma i H \quad (2.2.2.)$$

სიღრმეში მხები ძაბვის განაწილების კანონი:

$$\tau = \gamma i Y \quad (2.2.3.)$$

სადაც γ – ერთგვაროვანი სითხის მოცულობითი წონაა;

$i = \sin \alpha$ – სადინარის ქანობია.

წნევის ჰიდროსტატიკური განაწილების კანონიდან გამომდინარე, მხები ძაბვის სიმაღლეზე გავრცელების კანონზომიერება:

$$\tau = \tau_c \frac{Y}{H} \quad (2.2.4.)$$

ერთგვაროვანი ნიუტონური სითხეების შემთხვევაში მხები ძაბვის სიჩქარესთან დამოკიდებულება, როცა სიბლანტის დინამიკური კოეფიციენტი μ –ს ტოლია,

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}, \quad (2.2.5.)$$

ე.ი.

$$\frac{\tau}{\mu} = f(\tau) = \frac{du}{dy} \quad (2.2.6.)$$

შესაბამისად, სიჩქარის ვერტიკალზე ცვლილება

$$du = f(\tau) dy \quad (2.2.7.)$$

მხევი ძაბვის ვერტიკალზე განაწილების კანონიდან გამომდინარე, Y კოორდინატის ცვლილება (2.2.4.) დამოკიდებულებიდან:

$$Y = \frac{\tau}{\tau_c} H, \quad (2.2.8.)$$

ე.ი.

$$dY = \frac{H}{\tau_c} d\tau. \quad (2.2.9.)$$

(2.2.7.)-ის, (2.2.8.)-ის და(2.2.9.)-ის გათვალისწინებით (2.2.1.) –ში გვექნება:

$$Q = B \frac{H^2}{\tau_c} \int_{\tau_c}^0 \tau f(\tau) d\tau. \quad (2.2.10.)$$

(2.2.10.) დამოკიდებულება საშუალებას იძლევა განისაზღვროს სითხის ხარჯი სითხის თანაბარი უდაწნეო მოძრობის პირობებში სხვადასხვა რეოლოგიური თვისებების მქონე ნაკადებისათვის. თუ ცნობილია $f(\tau)$ -ს კონკრეტული მნიშვნელობები არანიუტონური სითხეების ადაპტირებული მოდელების და საანგარიშო სქემების ანალოგიის საფუძველზე, მხევი ძაბვის სიჩქარის გრადიენტთან დამოკიდებულების კანონზომიერება განზოგადებული სახით შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს დე ვალე-ოსვალდის მოდელით:

$$\tau = -K \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (2.2.11.)$$

(2.2.11.) დამოკიდებულებაში K ნაკადის კონსისტენციის ზონაა (რაც უფრო მნიშვნელოვანია სიბლანტე, მით უფრო დიდია K);

n – არანიუტონურობის მაჩვენებელია (როცა $n=1$ -ს, მაშინ $K = \mu$, როცა $n > 1$ -ზე, სიჩქარის ზრდასთან ერთად მცირდება ე.წ. ეფექტური სიბლანტე).

ეფექტური სიბლანტის განმარტება იმის წარმოდგენის საშუალებას იძლევა, რომ თითქმის ისეთ პლასტიკური გარემოს მქონე სხეულებთან გვაქვს საქმე, რომელიც ფსევდოპლასტიკური სხეულების სახელწოდებითაა ცნობილი.

სიჩქარის გრადიენტის შემთხვევაში, როდესაც $n > 1$ -ზე, იზრდება ეფექტური სიბლანტე და ასეთ სიტუაციებს დილატანტურს უწოდებენ. განვიხილოთ სიჩქარის გრადიენტის ცვლილება (2.2.11.) დამოკიდებულების საფუძველზე:

$$f(\tau) = \frac{du}{dy} = -\left(\frac{K}{\mu}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.2.12.)$$

თუ (2.2.12.)-ს გავითვალისწინებთ (2.2.10)-ში, გვექნება:

$$Q = \frac{BH^2}{\tau_c} \int_{\tau_c}^0 \tau f(\tau) d\tau = \frac{BH^2}{\tau_c} \int_{\tau_c}^0 \frac{\tau^{1+\frac{1}{n}}}{K^{\frac{1}{n}}} d\tau, \quad (2.2.13.)$$

ე.ი.

$$Q = \frac{B\rho^n g^{\frac{1}{n}} \gamma^{\frac{1}{n}} H^{2+\frac{1}{n}}}{\left(2 + \frac{1}{n}\right) K^{\frac{1}{n}}} \quad (2.2.14.)$$

როცა $n = 1$, $\rho g = \alpha$, $K = \mu$, ნიუტონური სითხისთვის ხარჯის სიდიდეს ექნება სახე:

$$Q = \frac{B\gamma i H^3}{3\mu} \quad (2.2.15.)$$

ანალოგიურ გარდაქმნები შეიძლება გამოყენებული იქნეს განსხვავებული რეოლოგიური მნიშვნელობის მქონე სითხეებისათვის. (2.2.15.)-ს თუ გავყოფთ BH -ზე, თანაბარი მოძრაობის სიჩქარე:

$$V = \frac{\gamma i H^2}{3\mu} \quad (2.2.16.)$$

(2.2.14.) დამოკიდებულებით სრული ხარჯის სიდიდე არანიუტონური სითხეების შემთხვევაში შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს შემდეგი სახით:

$$Q = \frac{n}{2n+1} \left(\frac{\gamma i}{K} \right)^{\frac{1}{n}} H^{\frac{2n+1}{n}} B \quad (2.2.17.)$$

ბმული ღვარცოფები რეოლოგიური თვისებებით განსხვავებულია წყლის ნაკადებისაგან. განსხვავებულობის მაჩვენებელს საწყისი წინააღმდეგობა ძვრაზე, სიბლანტე და შინაგანი ხახუნის კუთხე წარმოადგენს. განსაკუთრებით ეს მაჩვენებლები მნიშვნელოვანი ხდება იმ შემთხვევაში, როცა ღვარცოფის ტანში მყარი შემადგენლის კონცენტრაცია იზრდება უმნიშვნელო სიჩქარით მოძრაობის დროს.

შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ასეთი ნაკადების ძალური ზემოქმედების ერთ-ერთ ინტეგრალურ პარამეტრად, რომელიც რეოლოგიური თვისებების ფუნქციას წარმოადგენს, ენერგეტიკული მახასიათებლები ითვლება, რომელთა შორის მნიშვნელოვანია საშუალო სიჩქარე, ზედაპირული სიჩქარე და სხვ.

როგორც ექსპერიმენტული კვლევის შედეგებით იკვეთება, ღვარცოფის ჩამოყალიბება მხები და ნორმალური ძაბვის ფარდობის გარკვეულ ზღვრებთანაა დაკავშირებული. დამაბულ-დეფორმაციული პირობებიდან გამომდინარე, ღვარცოფები შეიძლება ჩაითვალოს როგორც დრეკად-პლასტიკური, ისე დრეკად-ბლანტი და პლასტიკურ სხეულებად. ასეთი ტანების რეოლოგიური მოდელის ანალოგად შეიძლება მიღებული იქნეს მაქსველის სხეული.

ნიუტონურ სითხეებში ძაბვასა და სიჩქარის გრადიენტს შორის პროპორციული დამოკიდებულების გამო სიჩქარეთა ველი ნაკადის მთელ სიღრმეს მოიცავს. უწყვეტი სახით სიჩქარის განაწილების ასეთი სურათი ბმულ ღვარცოფებში მოკლებულია რეალურ სინამდვილეს. ასეთ ჰიპერკონცენტრირებულ ნაკადებში სიჩქარეთა ველი, როგორც ამას კვლევები ადასტურებს, გაყოფილია სამ ნაწილად. ნაკადის სიღრმე, სადაც სიჩქარეთა ველი ხასიათდება უცვლელი სიდიდით; დინების გული –

საგრადიენტო შრე, სადაც ვერტიკალზე სიჩქარეთა ველის განაწილება ნიუტონური სითხეების ანალოგიურია; საგრადიენტო შრე, რომელიც შემზეთავი ფენის როლს ასრულებს. სიჩქარის ვერტიკალზე ასეთი სურათის გამო საგრადიენტი შრეში გამოყოფილია ორი ერთმანეთისგან განსხვავებული სიბლანტის ზონა.

ჩატარებული ექსპერიმენტული კვლევებით დაზუსტებულია, ბმული ღვარცოვის მოძრაობის დროს სადინარის ფსკერსა და კედლებზე წარმოიქმნება კედლისწინა სასაზღვრო შრე სიღრმით h_1 , რომელიც მოძრავი ტანის შემადგენლის კოლოიდურ ნაწილს და წყლის ნარევეს წარმოადგენს. აქედან გამომდინარე, საგრადიენტო შრის ზონა გაყოფილია ორ ნაწილად. პირველი სიღრმით h_1 , რომელიც ასრულებს შემზეთავი ფენის, სრიალის ზონის ფუნქციას და მცირე საგრადიენტო შრე სიღრმით h , რომელიც h_0 ნაკადის გულთანაა შეუღლებული (1, 10, 19, 32, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52).

სასაზღვრო შრის წარმოქმნის მექანიზმი კომპოზიციურ სისტემებში შემდეგნაირად შეიძლება იყოს წარმოდგენილი. სასაზღვრო შრეში დამპვრელი დეფორმაციას ნაკადის ძვრის ზედაპირის მიმართ ნორმალური ძაბვის წარმოქმნის ფუნქცია გააჩნია. იგი მოძრაობის დროს იწვევს ტანის მოცულობის შემცირებას და წყლით გაჟღენთილი ნარევის გამოყოფას მართობულად ძვრის ზედაპირის მიმართ, ე.ი. ნაკადისა და სადინარის ზედაპირის შემხებ ზედაპირზე წყლით გაჟღენთილი კოლოიდური ნაწილის ნარევი წარმოიქმნება. მისი სიღრმის ნაკადის სიღრმესთან შედარებით უმნიშვნელო სიდიდის გამო (2.2.16.) დამოკიდებულებაში ნაკადის სიღრმე, შრეების მხედველობაში მიღებით, შეიძლება წარმოდგენილი იყოს ფორმულით:

$$H_{\text{ღ}} = H_{\text{გრ.}} + h_0. \quad (2.2.18.)$$

(2.2.16.) დამოკიდებულება შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს შემდეგი სახით:

$$Q = \frac{n}{2n+1} \left(\frac{\gamma i}{K} \right)^{\frac{1}{n}} H^{\frac{n+1}{n}} HB . \quad (2.2.19.)$$

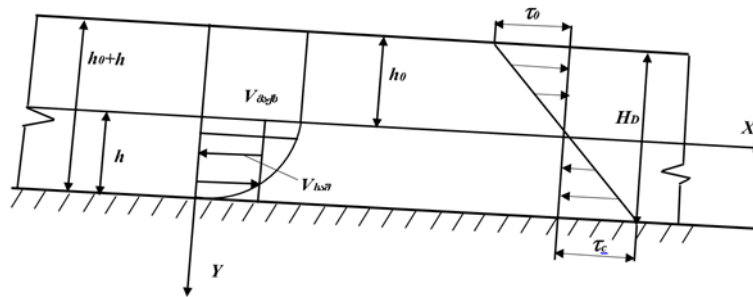
(2.2.17.)-ის გათვალისწინებით (2.2.18.)-ში საშუალო სიჩქარე გვექნება:

$$\bar{V} = \frac{n}{2n+1} \left(\frac{\gamma i}{K} \right)^{\frac{1}{n}} H^{\frac{n+1}{n}} . \quad (2.2.20.)$$

ღია ნაკადებში სიჩქარეთა ვერტიკალზე განაწილებას მიეძღვნა უამრავი თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევა, რომელიც მოცემულია შრომებში (20, 31, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 60).

აღნიშნულმა პრობლემამ ღვარცოფთა დინამიკის გამო ჯერ-ჯერობით ვერ მიიღო დასრულებული სახე. შრომაში თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევებით მიღებული შედეგების განზოგადების საფუძველზე საგრადიენტო შრეში სიჩქარეთა ვერტიკალზე განაწილების კანონის აღწერის მიზნით გამოიყენება სხვადასხვა მოდელი (25, 61).

რადგან ბმული ღვარცოფის მოძრაობა საგრადიენტო შრითა და გულით ხდება, შესაბამისად, მოძრაობის საანგარიშო სქემას (ნახ. 4.) შემდეგი სახე აქვს.



ნახ. 4. ღვარცოფის მოძრაობის სქემა

შესაბამისად, საგრადიენტო შრის სიმაღლე სქემიდან გამომდინარე,

$$H = H_c \left(1 - \frac{h_0}{H_c} \right) \psi \quad (2.2.21.)$$

საგრადიენტო შრის ცოცხალი კვეთის ფართობი, რადგან

$$\omega = BH_c \left(1 - \frac{h_0}{H}\right) \psi \quad (2.2.22.)$$

(2.2.17.)-ის გათვალისწინებით (2.2.16.)-ში ღვარცოფის ხარჯი საგრადიენტო შრითა და გულით მოძრაობის შემთხვევაში

$$Q = \frac{n}{2n+1} \left(\frac{\gamma i}{K}\right)^{\frac{1}{n}} [(H_c - h_0)]^{\frac{2n+1}{n}} B \quad (2.2.23.)$$

რადგან $\omega = H_c (1 - h_0 / H) \psi B$,

$$Q_{\text{გრ.}} = \frac{n}{2n+1} \left(\frac{\gamma i}{K}\right)^{\frac{1}{n}} H_c^{\frac{n+1}{n}} \left(1 - \frac{h_0}{H_c}\right)^{\frac{n+1}{n}} \omega . \quad (2.2.24.)$$

ღვარცოფის მოძრაობის საშუალო სიჩქარე:

$$\bar{V}_c = \frac{n}{2n+1} \left(\frac{\gamma i}{K}\right)^{\frac{1}{n}} H_c^{\frac{n+1}{n}} \left(1 - \frac{h_0}{H_c}\right)^{\frac{n+1}{n}} \quad (2.2.25.)$$

ღია ნაკადების კვლევის ანალოგიურ ფარდობას საშუალო და მაქსიმალურ სიჩქარესთან თუ აღვნიშნავთ a -თი:

$$a = \frac{\bar{V}_c}{V_{\text{მაქ.}}} . \quad (2.2.26.)$$

$$V_{\text{მაქ.}} = \frac{1}{q} \frac{n}{2n+1} \left(\frac{\gamma i}{K}\right)^{\frac{1}{n}} H_c^{\frac{n+1}{n}} \left(1 - \frac{h_0}{H_c}\right)^{\frac{n+1}{n}} . \quad (2.2.27.)$$

ღვარცოფის გულის ხარჯი

$$Q_{\text{გულ.}} = \frac{1}{a} \frac{n}{2n+1} \left(\frac{\gamma i}{K}\right)^{\frac{1}{n}} H_c^{\frac{n+1}{n}} \left(1 - \frac{h_0}{H_c}\right)^{\frac{n+1}{n}} h_0 B . \quad (2.2.28.)$$

ღვარცოფის სრული ხარჯი

$$Q_{\text{ღვ.}} = Q_{\text{გრ.}} + Q_{\text{გულ.}} , \quad (2.2.29.)$$

ე.ი.

$$Q = \frac{n}{2n+1} \left(\frac{\gamma i}{K}\right)^{\frac{1}{n}} H_{\text{გ}}^{\frac{2n+1}{n}} \psi^{\frac{2n+1}{n}} \left(1 - \frac{h_0}{H_{\text{გ}}}\right)^{\frac{n+1}{n}} \left[1 - \frac{h_0}{H_{\text{გ}}} \frac{a-1}{a}\right] \quad (2.2.30.)$$

ღვარცოფის მოძრაობის საშუალო სიჩქარე, როცა ცოცხალი კვეთის

ფართობი $\omega = H_c B$:

$$\bar{V}_c = \frac{n}{2n+1} \left(\frac{\gamma i}{K} \right)^{\frac{1}{n}} H_c^{\frac{2n+1}{n}} \left[\psi \left(1 - \frac{h_0}{H_c} \right) \right]^{\frac{n+1}{n}} \left(1 + \frac{h_0}{H_c} \frac{1-a}{a} \right) \quad (2.2.31.)$$

როცა $n = 1$, $K = \mu$; $a = \frac{\bar{V}}{V_{\text{მავ.}}}$ = 0,67,

ღვარცოფის ხარჯი:

$$Q_c = \frac{\gamma H_c^3}{3\mu} B \left(1 - \frac{h_0}{H_c} \right)^2 \psi^2 \left(1 + 0,492 \frac{h_0}{H_c} \right), \quad (2.2.32.)$$

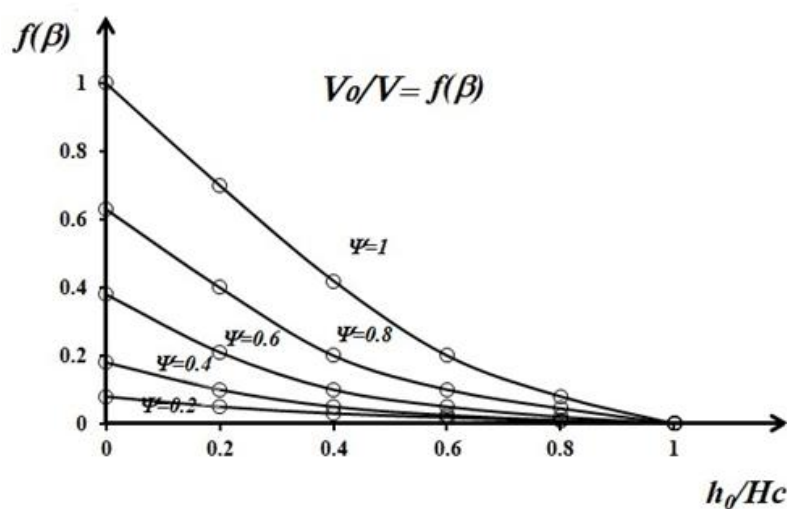
ბოლო საშუალო სიჩქარე:

$$V_{\text{ვფ}} = \frac{\gamma H_{\text{ვ}}^2}{3\mu} \left(1 - \frac{h_0}{H_{\text{ვ}}} \right)^2 \psi^3 \left(1 + 0,49 \frac{h_0}{H_{\text{ვ}}} \right). \quad (2.2.33.)$$

$$\frac{\bar{V}_c}{V_H} = f(\beta), \quad (2.2.34.)$$

სადაც:

$$f(\beta) = \left(1 - \frac{h_0}{H} \right)^2 \left(1 + 0,49 \frac{h_0}{H} \right) \quad (2.2.35.)$$



ნახ.5. გრაფიკი დამოკიდებულება $f(\beta) = f(h_0 / H)$

$$\begin{aligned}
h_0 / H = 0, \quad f(\beta) = 1, \quad \frac{V_c}{V_H} = 1; \\
h_0 / H = 0,2, \quad f(\beta) = 0,702, \quad \frac{V_c}{V} = 0,702; \\
h_0 / H = 0,4, \quad f(\beta) = 0,43, \quad \frac{V_c}{V} = 0,43; \\
h_0 / H = 0,6, \quad f(\beta) = 0,20, \quad \frac{\bar{V}}{V} = 0,20; \\
h_0 / H = 0,8, \quad f(\beta) = 0,056, \quad \frac{\bar{V}}{V_0} = 0,056; \\
h_0 / H = 1, \quad f(\beta) = 0, \quad \frac{\bar{V}}{V_0} = 0.
\end{aligned}$$

ღვარცოფის საშუალო სიჩქარის მაქსიმალურთან ფარდობით მიღებულია

$$\frac{\bar{V}}{V_{\text{მძ.}}} = \frac{\gamma i H^2 c}{3\mu V_{\text{მძ.}}} \left(1 - \frac{h_0}{H_c}\right)^2 \left(1 + 0,49 \frac{h_0}{H}\right). \quad (2.2.36.)$$

ნიუტონური დენადი ტანის შემთხვევაში $\frac{\gamma i H_c^2}{3\mu}$, როცა $\frac{\gamma i H_c^2 \left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^2}{3\mu V_{\text{მძ.}}} = a$,

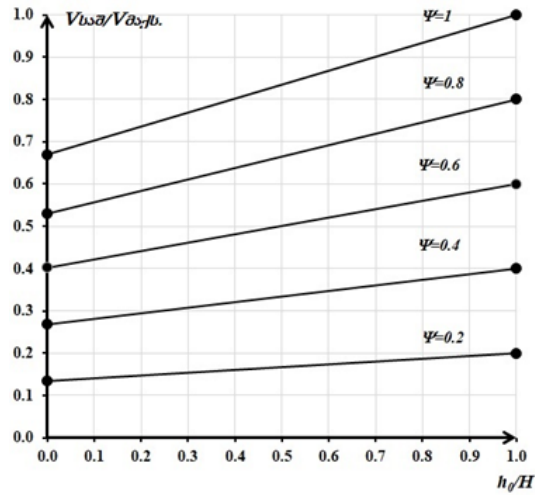
$$\frac{\bar{V}}{V_{\text{მძ.}}} = \left(\alpha - 0,49\alpha \frac{h_0}{H}\right) \quad (2.2.37.)$$

შესაბამისად,

$$\frac{\bar{V}}{V_{\text{მძ.}}} = 0,67 + 0,33 \frac{h_0}{H} \quad (2.2.38.)$$

თვალსაჩინოების მიზნით გრაფიკულ დამოკიდებულება $\frac{\bar{V}}{V_{\text{მძ.}}} = f\left(\frac{h_0}{H_0}\right)$

მოცემულია ნახ.6.-ზე



ნახ. 6. გრაფიკული დამოკიდებულება $\frac{\bar{V}}{V_{\text{მ.ქ.}}} = f\left(\frac{h_0}{H_0}\right) \psi$ -ის სხვადასხვა

მნიშვნელობების დროს

საანგარიშო მოდელის შესაბამისად, ღვარცოვის მაქსიმალური სიჩქარე:

$$V_{\text{მ.ქ.}} = \frac{\gamma i H^2}{2\mu} \left(1 - \frac{h_0}{H_c}\right)^2, \quad (2.2.39.)$$

საშუალო სიჩქარის მაქსიმალურთან ფარდობის სიდიდე:

$$\frac{\bar{V}_c}{V_{\text{მ.ქ.}}} = 0,67 + 0,33 \frac{h_0}{H_c}. \quad (2.2.40)$$

(2.2.39.)-ის გათვლით (2.2.40.)-ში გვექნება:

$$\bar{V}_c = \frac{\gamma i H_c^2}{2\mu} \left(1 - \frac{h_0}{H_c}\right)^2 \left(0,67 + 0,33 \frac{h_0}{H_c}\right). \quad (2.2.41.)$$

(2.2.41.)-ე განტოლებიდან მოძრაობის წინააღმდეგობის ქანობი

$$i = \frac{2\bar{V}_c \mu}{\gamma H_c^2} \frac{1}{\left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^2 \left(0,67 + 0,33 \frac{h_0}{H_c}\right)}. \quad (2.2.42.)$$

ბმული ღვარცოვის დინამიკური სიჩქარის განსაზღვრას ვაწარმოებთ ფორმულით

$$V_* = \sqrt{g H_c \left(1 - \frac{h_0}{H}\right) i}, \quad (2.2.43.)$$

შესაბამისად,

$$V_*^2 = 2gH_c \frac{\bar{V}_c \mu}{\gamma H_c^2 \left(1 - \frac{h_0}{H_c}\right) \left(0,67 + 0,33 \frac{h_0}{H_c}\right)}. \quad (2.2.44.)$$

(2.2.44.)-ე განტოლების გამარტივებისა და გარდაქმნის საფუძველზე ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის კოეფიციენტი:

$$\lambda = \frac{16\alpha}{VH_c (1 - h_0 / H_c) \left(0,67 + 0,33 \frac{h_0}{H_c}\right)}. \quad (2.2.45.)$$

ცხადია, რომ დაწნევის დანაკარგის სიდიდე ნაკადის სიჩქარის და სადინარის გეომეტრიული მაჩვენებლების ფუნქციას წარმოადგენს, ე.ი.:

$$h_{\text{წ.}} = \frac{16\nu}{VH_c} \frac{1}{(1 - h_0 / H_c) \left(0,67 + 0,33 \frac{h_0}{H_0}\right)} \frac{\ell V^2}{H 2g}. \quad (2.2.46.)$$

აღსანიშნავია, რომ (2.2.46.)-ე საანგარიშო დამოკიდებულებაში შემავალი პარამეტრები მთლიანად გამოხატავს ღვარცოფის არანიუტონურ რეოლოგიურ ბუნებას. ეს ნათლად გამოხატულია რეინოლდის რიცხვის განზოგადებულ სახეში და ტრადიციული ფორმისგან განსხვავებით წარმოდგენილია შესაბამისი შესწორებით.

თუ გავითვალისწინებთ, რომ ენერგიის დანაკარგი მოძრაობის მიმართულებით სადინარის გეომეტრიული და ნაკადის ჰიდრავლიკური მაჩვენებლების ფუნქციაა, საშუალო სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულება საბოლოო სახით შემდეგნაირად იქნება წარმოდგენილი:

$$\bar{V}_c = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \sqrt{\left(1 - \frac{h_0}{H_c}\right) (2,68 + 1,32h_0 / H_c)} \sqrt{H_c i}. \quad (2.2.47.)$$

(2.2.47.) დამოკიდებულებაში თუ შემოვიღებთ აღნიშვნებს:

$$c_1 = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}; \quad c_2 = \sqrt{\left(1 - \frac{h_0}{H_c}\right) (2,68 + 1,32h_0 / H_c)},$$

ღვარცოფის საშუალო სიჩქარის საანგარიშო დამოკიდებულებას ექნება სახე:

$$\bar{V}_c = c_1 c_2 \sqrt{Hi} \quad (2.2.48.)$$

სხვადასხვა მკვლევართა მონაცემებისა და ჩატარებული ექსპერიმენტების საფუძველზე, c კოეფიციენტის საანგარიშო ნაკადის სიღრმესა და ნაწილაკების დიამეტრს შორის კავშირის გათვალისწინებით

$$c_1 = 60,4 \left(\frac{h}{d} \right)^{\frac{1}{6}} . \quad (2.2.49.)$$

(2.2.49.)-ე საანგარიშო დამოკიდებულების გათვალისწინებით (2.2.47.)-ში გვექნება:

$$\bar{V}_c = 60,4 \left(\frac{H_c}{d} \right)^{\frac{1}{6}} \sqrt{(1-h_0/H_c)(2,68+1,32h_0/H)} \sqrt{H_c i} . \quad (2.2.50.)$$

ცხრილი 2.

ნატურაში ფიქსირებული და ფორმულა (2.2.50.) - ით გაანგარიშებულ სიჩქარეთა მნიშვნელობები

ღვარცოფსადინარის კალაპოტის ქანობი i	ღვარცოფის სიმკვრივი γ , კგ/მ ³	ღვარცოფის ჰიდრაულიკური მახასიათებლები			ღვარცოფის საშუალო სიჩქარე (მ/წმ)	
		ღვარცოფის სიღრმე H_c (მ)	ცოცხალი კვეთის ფართობი ω (მ ²)	ჰიდრაულიკური რადიუსი R (მ)	ნატურაში	ფორმულაში
0,035	2000	1,20	43,0	1,20	190	2,20
-	-	1,70	115,0	1,70	2,50	3,35
-	-	1,50	75,0	1,50	2,0	2,29
-	-	1,0	32,0	1,0	1,60	2,02
-	-	1,80	97,0	1,80	2,70	3,38
-	-	1,30	34,0	1,30	2,30	2,24
-	-	2,20	154	2,20	2,90	2,63
-	-	1,60	98,0	1,60	2,10	2,18
0,077	2000	3,0	13,0	1,20	3,10	2,75

0,077	2000	7,40	71,0	3,20	3,80	4,22
0,077	2000	5,60	42,0	2,50	4,10	3,77
0,077	2000	4,60	30,0	2,10	4,40	3,60
0,077	2000	170	4,50	0,70	2,20	2,22
0,077	2000	9,40	105,0	3,0	6,70	4,60
0,22	2100	6,30	52,0	2,70	5,20	6,16
0,22	2100	12,80	183,0	4,90	6,80	8,40

ბმულ ღვარცოფებთან გამოყენებული საანგარიშო მოდელების სიზუსტის შემოწმების მიზნით ცხრილი 2.-ში მოცემულია ნატურაში ჩატარებული დაკვირვების კონკრეტულ სიჩქარეთა მნიშვნელობების შედარება ფორმულით მიღებულ შედეგებთან.

ფორმულა (2.2.50.)-ით გაანგარიშებული საშუალო სიჩქარის სიდიდეების შედარება ბუნებაში ფიქსირებულ სიდიდეებთან შეესაბამება საინჟინრო პრაქტიკისათვის დასაშვებ ნორმატივებს.

2.3. ღვარცოფსადინარის კალაპოტის პროზმულობა და ენერგეტიკული მახასიათებლები

ჰიპერკონცენტრირებული ნაკადების გარემოზე ზემოქმედების გააქტიურებისა და განმეორადობის სიხშირის მნიშვნელოვნად გაზრდის გამო მოვლენის კვლევის თეორიულმა საკითხებმა განსაკუთრებული ინტერესი და აქტუალობა შეიძინა. ისინი წარმოადგენს კალაპოტური ნაკადების ერთ-ერთ ანომალურ ნაირსახეობას, რომელთათვის დამახასიათებელია მოძრაობის რეჟიმის, კერძოდ, წყნარიდან მძაფრში ან პირიქით და ტალღურ დინებაში გადასვლის შესაძლებლობები. ამასთან ერთად განსხვავებულია მათი შემხვედრ წინააღმდეგობებთან ურთიერთმოქმედება და ენერგეტიკული მახასიათებლების შეცვლის შესაძლებლობები.

ტალღის ფორმით ჩამოყალიბებული ნაკადი ხასიათდება ჰიდროლოგიური და ჰიდრაულიკური მახასიათებლების განსხვავებული

მნიშვნელობებით. შესაბამისად, ნაკადის ენერგეტიკის განმსაზღვრელი პარამეტრები სრულად განსხვავებულია არსებული პროცესისაგან და შედეგები ვერ იძლევა პრაქტიკისათვის დამაკმაყოფილებელ შედეგს.

ენერგეტიკული მახასიათებლების შეფასების განმსაზღვრელ კრიტერიუმად ჰიდროტექნიკაში მიჩნეულია ხარჯი. კვლევებით დადასტურებულია, არათანაბარი მოძრაობის რეჟიმის ცვლილებით ხდება როგორც ნაკადის ტრანსპორტუნარიანობის გაზრდის შესაძლებლობები.

ღვარცოფთა ზემოქმედების ზონაში, ე.ი. სატრანზიტო უბანზე ღვარცოფთა სარეგულაციო ღონისძიებების საპროექტო პარამეტრების განმსაზღვრელ კრიტერიუმს წარმოადგენს ნაკადის ენერგიის მახასიათებლები. ღვარცოფის სადინარში მოძრაობის შემთხვევაში მისი დინამიკის ცვალებადობა ნაკადის ენერგიის განტოლებებზე დაყრდნობით არის შესაძლებელი.

უმეტეს შემთხვევაში, რეალობიდან გამომდინარე, კალაპოტის მორფომეტრიასა და ნაკადის ენერგეტიკულ მახასიათებლებს შორის კავშირი შეუსაბამოა და სადინარის დეფორმაციას, მისი მწყობრიდან გამოსვლას, გეომეტრიის ცვლილებასა ან ნაკადის ენერგეტიკასთანაა დაკავშირებული. ასეთ შეუსაბამობას იწვევს ისეთი შემთხვევები, როცა ღვარცოფის რეგულირების მიზნით სადინარში განივი აქტიური ნაგებობებია გამოყენებული.

ენერგეტიკული მახასიათებლების ცვლილების განმსაზღვრელ ფაქტორად როცა ნაკადის გაჭიმვა-კუმშვით გამოწვეული დეფორმაციების სიდიდეებია მიღებული, მაშინ ამ უკანასკნელის შეფასება ფარდობითი დეფორმაციის კოეფიციენტის განსაზღვრით ხდება. ღვარცოფის, როგორც ფორმის, ისე სტრუქტურის ცვლილების შეფასების განმსაზღვრელ ფაქტორად დახარჯული ენერგიის სიდიდეა მიჩნეული. მისი გარდაქმნა პოტენციურ ენერგიად ნაკადს ტალღის ფორმას აძლევს, ზოგიერთ შემთხვევაში წარმოიქმნება შემფოთებული ზონა, ხოლო ტალღით

წარმოქმნილი სიცარიელის შევსება, უწყვეტობიდან გამომდინარე, ნაკადის მომდევნო პორციით მიმდინარეობს.

სადინარის კალაპოტისა და ნაკადის ურთიერთქმედების შესწავლის შემთხვევაში, აუცილებელია გათვალისწინებულ იქნეს როგორც სადინარის მორფომეტრიის, ისე ნაკადის ჰიდრავლიკური მახასიათებლების ცვლილების შესაძლებლობები. ტალღის ფორმით მოძრავი ღვარცოფის ენერგეტიკული მახასიათებლების ცვლილება დიამეტრულად განსხვავდება ანალოგიური წყლის ნაკადების შემთხვევისაგან [2, 15, 48, 63].

აღსანიშნავია ის ფაქტიც, რომ ნიუტონური სითხეების ენერგეტიკული მახასიათებლების კავშირის დადგენა ღვარცოფის მახასიათებლებთან ფართო კვლევებთანაა დაკავშირებული. ფორმირების სტადიაში მყოფი კალაპოტის მდგრადი ფორმა ენერგეტიკული მახასიათებლების ფუნქციას წარმოადგენს. როცა კალაპოტი მდგრადია და მისი გეომეტრია მოძრაობის მიმართულებით ცვალებადია, აუცილებელია ნაკადის ენერგეტიკული მახასიათებლების ცვლილების სურათის პროგნოზირება სადინარის გეომეტრიის ცვლილებასთან კავშირში იქნეს შესწავლილი.

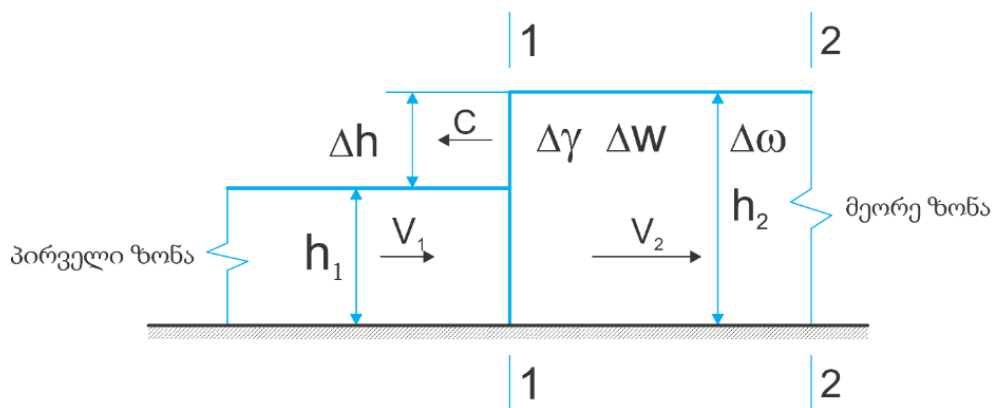
ნებისმიერი სახის ნაკადის შემთხვევაში შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების დროს მის ტანში წნევასთან ერთად შეიცვლება მოძრაობის რეჟიმი და შემფოთებული ზონა წარმოიქმნება. მოვლენის შეფასება მრავალ ურთიერთმართვად ფაქტორთანაა დაკავშირებული. ღვარცოფის ტანში წნევის განმსაზღვრელ კრიტერიუმად შეიძლება ნაკადის სიჩქარე იქნეს მიღებული. რაც შეეხება შემფოთებული ზონის წარმოქმნის მასშტაბურობას, იგი მოძრავი ნაკადის ტანის ფორმის ცვლილებით შეიძლება იყოს განსაზღვრული. პროცესის სირთულიდან გამომდინარე, წარმოდგენილი მოვლენის შესწავლა აუცილებელია განხორციელდეს დრეკადობის განმსაზღვრელ მახასიათებლებთან კავშირში [9, 16, 62, 63].

ღვარცოფში, ისე, როგორც კოჭის რხევის შემთხვევაში, შემფოთებული ზონის დადგენის ოპერატიულ საშუალებად კერძოწარმოებულიანი დიფერენციალური განტოლებები შეიძლება იქნეს გამოყენებული, ხოლო

მათი ამოხსნა შესაძლებელია წნევის, მოცულობის, სიმკვრივის ან სხვა მახასიათებელი ფაქტორების ცვლილების კანონზომიერების ამსახველი დამოკიდებულებების გათვალისწინებით.

საერთოდ, როგორც ცნობილია, შემფოთებული ზონის წარმოქმნის ნათელ მაგალითს წარმოადგენს შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების შემთხვევა, რომლის შედეგად წარმოქმნილი სიცარიელის შევსება, ნაკადის უწყვეტობიდან გამომდინარე, როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, მომდევნო პორციით მიმდინარეობს [57,62].

მოდელი, რომელიც ღვარცოფის შემხვედრ წინააღმდეგობაზე ზემოქმედებას აღწერს, სქემის სახით წარმოდგენილია 2.3.1. ნახაზზე.



ნახ.7. შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ღვარცოფის ზემოქმედების სქემა

წყლის ნაკადში სტაციონალურობის დაურღვევლად შემფოთების წარმოქმნის ქვედა ზღვარის მნიშვნელობა 0.33-ის ტოლია, ხოლო ღვარცოფისათვის ეს კრიტერიუმი ჯერჯერობით სრულად არ არის შესწავლილი.

კალაპოტური პროცესების სირთულიდან გამომდინარე, კავშირის კანონზომიერების შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების შესწავლის თეორიულმა კვლევამ და შეფასებამ პირველად ჟუკოვსკის მიერ მოცემულ შრომაში ჰპოვა ასახვა და არაერთგზის მიიპყრო მეცნიერთა ყურადღება. უკანასკნელი პერიოდის მონაცემებით საკითხის ასეთ ჭრილში შესწავლას მიეძღვნა უამრავი სამეცნიერო ნაშრომი. რეოლოგიიდან გამომდინარე,

ნაკადის ნაგებობაზე ზემოქმედების დროს წნევის ცვლილების სურათი შეიძლება შემდეგნაირად იქნეს წარმოდგენილი: როცა ღვარცოფის მასას გააჩნია დრეკადობა, მაშინ შემხვედრ წინააღმდეგობაზე ზემოქმედების დროს მისი ტანი ფართოვდება და სიმკვრივე იცვლება, ანუ შემფოთებული ზონა წარმოიქმნება და მასში ნაკადის მომდევნო პორცია განთავსდება. გაზრდილი წნევის არე, რომელიც სქემაზე ძირითადი ნაკადიდან 1-1 კვეთით არის გამოყოფილი, მას ორ ნაწილად ჰყოფს. პირველი ზონა, სადაც უცვლელია ნაკადის სიჩქარე და მეორე, სადაც წნევის ცვლილების გამო დამყარებულია ახალი სიჩქარე. გაზრდილი წნევის ზონაში მოძრაობის საწინააღმდეგოდ ხდება ნაკადის C სიჩქარით გადაადგილება და იგი შემფოთების (ტალღის) გადაადგილების სიჩქარედ არის მიჩნეული [16, 61, 62].

ნებისმიერი სახის ნაკადის შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების დროს ხდება მის ტანში როგორც წნევის გაზრდა, ასევე მოძრაობის რეჟიმის შეცვლა და შემფოთებული ზონის წარმოქმნა. მოვლენის მოყვანილი შემთხვევა ნაკადის დინებით არის განპირობებული, რომლის აღწერამ, სირთულიდან გამომდინარე, მრავალი მეცნიერის ყურადღება მიიპყრო. მიჩნეულია, რომ შემფოთებული ზონის წარმოქმნა და მისი მასშტაბები განსახილველი სხეულის დრეკად შესაძლებლობებსა და სტრუქტურაზეა დამოკიდებული.

ნაკადის შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების სურათი, რომელიც წნევის სიდიდის ცვლილებასთანაა დაკავშირებული, შემდეგნაირად შეიძლება იყოს წარმოდგენილი. როცა განსახილველი სხეულის მასას გააჩნია დრეკადობა, მისი ტანის გაფართოება და სიმკვრივის შეცვლა ძალის იმპულსითაა შესაძლებელი. ასეთ შემთხვევაში ახალი მოცულობა წარმოიქმნება და მოძრავი ნაკადით წარმოქმნილი სიცარიელე შეივსება.

როცა წნევის, ცოცხალი კვეთისა და მოცულობითი წონის სიდიდეების - ΔP , $\Delta \omega$ და $\Delta \gamma$ გაზრდა t დროის მცირე მონაკვეთში ხდება, მაშინ ΔW

მოცულობისა და Δm მასის ნაზრდის საანგარიშო დამოკიდებულებები შემდეგნაირად შეიძლება იქნას წარმოდგენილი:

$$\Delta W = \varepsilon W_0 (1 - 2\mu) \quad (2.3.1)$$

$$\Delta m = m_0 \left(\frac{\Delta y}{y} + \frac{\Delta \omega}{\omega} \right) \quad (2.3.2)$$

სადაც, ΔW და Δm შემხვედრი წინააღმდეგების შედეგად მიღებული მოცულობისა და მასის ნაზრდია;

μ - გრძივი ფარდობითი დეფორმაციის განივთან ფარდობის კოეფიციენტი;

W_0, m_0 - შემხვედრ წინააღმდეგობაზე მოქმედი ნაკადის საწყისი მოცულობა და მასა;

$\Delta y, \Delta \omega$ - მოქმედი ნაკადის მოცულობითი წონისა და ცოცხალი კვეთის ნაზრდის მნიშვნელობები;

ε - გრძივი ფარდობითი დეფორმაციის სიდიდე.

ღვარცოფული მასის შემთხვევაში, როცა დეფორმაცია წინააღმდეგობით არის გამოწვეული, მიღებული ახალი მოცულობა შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს დამოკიდებულებით:

$$W_1 = W_0 [1 + \varepsilon (1 - \mu)] \quad (2.3.3)$$

რადგან დეფორმაცია ε მოძრავი ნაკადის სიღრმის ცვლილებითაა გამოწვეული, მაშინ

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h} = \frac{a + 4\sqrt{a}}{4} \quad (2.3.4)$$

(2.3.3.) დამოკიდებულებაში μ დეფორმაციული მასის მოცულობა გაფართოების კოეფიციენტია და მისი მნიშვნელობა:

$$\mu = \frac{(1 - h_0/h)\psi}{1 + (1 - h_0/h)\psi} = \frac{a}{1 + a}, \quad (2.3.5)$$

სადაც μ - ფარდობითი დეფორმაციის ჰუასინის კოეფიციენტი;

h_0 - ბმულობის ექვივალენტური სიღრმე;

ψ – შინაგანი ხახუნის კოეფიციენტის მნიშვნელობა და შინაგანი ხახუნის φ კუთხესთან კავშირში $\psi = \left(\sqrt{1+tg^2\varphi} - tg\varphi\right)^2$.

ზემოთ მოყვანილი მახასიათებლების გათვალისწინებით დეფორმაციის შედეგად მიღებული ღვარცოფული მასის ახალი მოცულობა:

$$W_1 = W_0 \frac{4(1+a) + (a^3 + 4a\sqrt{a})(1-a)}{4(1+a)} \quad (2.3.6)$$

ანალოგიურად ღვარცოფის მასის ცვლილების სიდიდე:

$$m_1 = \rho_1 W_1 = \rho_1 W_0 \frac{4(1+a) + (a^3 + 4a\sqrt{a})(1-a)}{4(1+a)} \quad (2.3.7)$$

ღვარცოფული მასის ცვლილების კანონზომიერებიდან გამომდინარე, ფარდობა მასის Δm ნაზრდის გეომეტრიულ და სიმკვრივის მახასიათებლებთან კავშირში:

$$\frac{\Delta m}{m_0} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} + \frac{\Delta \omega}{\omega} \quad (2.3.8)$$

რადგან გეომეტრიული მახასიათებლების, კერძოდ, ცოცხალი კვეთის ცვლილების კანონზომიერება დიფერენციალურ ფორმაში შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს შემდეგი სახით:

$$d\omega = \frac{\pi d(\Delta d)}{4}$$

შესაბამისად,

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} = \frac{\pi d(\Delta d)}{4 \omega} = \frac{\pi d(\Delta d)}{4} : \frac{\pi d^2}{4} = 2 \frac{\Delta d}{d} = 2 \frac{\Delta h}{h} \quad (2.3.9)$$

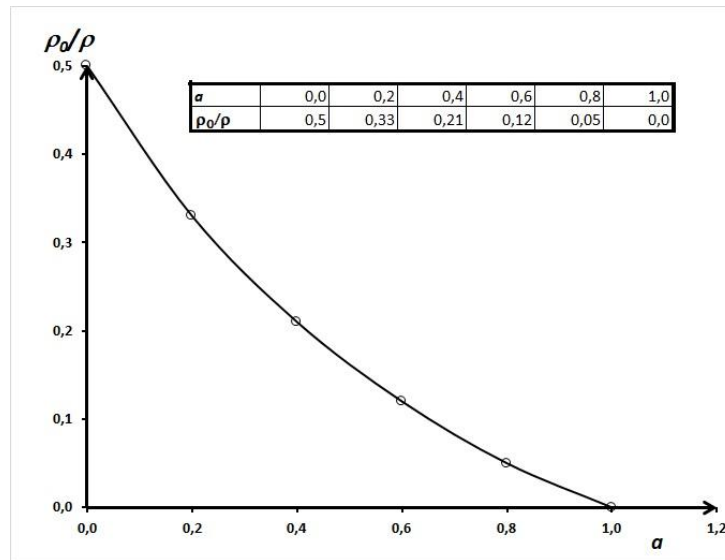
(2.3.8.) განტოლების გამარტივებისა და გარდაქმნის საფუძველზე მივიღებთ

$$m_1 = m_0 \left(1 + \frac{\Delta \rho}{\rho_0} + 2 \frac{\Delta h}{h} \right) \quad (2.3.10)$$

(2.3.10.) –ის გატოლებით (2.3.7.)–დან მივიღებთ:

$$\frac{\rho_0}{\rho_1} = \frac{1-q}{2(1+q)} \quad (2.3.11)$$

თვალსაჩინოების მიზნით მოგვყავს გრაფიკული დამოკიდებულება $\rho_0 / \rho_1 = f(a)$ ნახ. 8.- ზე



ნახ.8. გრაფიკული დამოკიდებულება $\rho_0 / \rho_1 = f(a)$

ღვარცოფის ტალღურ დინებაში გადასვლით რეჟიმშიცვლილი ნაკადი შემხვედრი წინააღმდეგობებით ზემოქმედების განსაკუთრებულობითაა გამორჩეული. მოვლენა კრიტიკულობით გამოირჩევა სადინართა იმ მონაკვეთებზე, სადაც მათი სატრანზიტო უბნის გადაკვეთა რკინიგზებით, საავტომობილო მაგისტრალებით, საირიგაციო, წყალმომარაგების მაგისტრალებით და გაზსადენებით ხდება. ზემოთ მოყვანილ შემთხვევაში ღვარცოფის ჰიდროლოგიური რეჟიმის ცვლილებით თანაბარი რეჟიმი იცვლება და ნაკადის მდგრადობა იკარგება.

ტალღის ფორმით მოძრავი ნაკადი, ხასიათდება ჰიდროლოგიური და ჰიდრავლიკური, კერძოდ, ენერგეტიკული მახასიათებლების გაზრდილი მნიშვნელობებით. აქედან გამომდინარე, სარეგულაციო ნაგებობების განსაზღვრული საპროექტო პარამეტრები სრულად ვერ იძლევა პრაქტიკისათვის დამაკმაყოფილებელ შედეგებს.

შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ბუნებრივი ნაკადების ზემოქმედების განმსაზღვრელ კრიტერიუმად საშუალო სიჩქარეა მიღებული. უკანასკნელი დროის კვლევებმა დაადასტურა, რომ თანაბარი მოძრაობის რეჟიმის

დარღვევის შედეგად იცვლება როგორც ნაკადის ტრანსპორტუნარიანობა, ისე ენერგეტიკული პარამეტრები. ტალღური ფორმით მოძრავი ნაკადი შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ძალური მოქმედებით მნიშვნელოვნად განსხვავდება თანაბარი რეჟიმით მოძრავი ნაკადებისაგან.

ღვარცოფის თანაბარი მოძრაობის რეჟიმის შეცვლა თავისუფალ ზედაპირზე იწვევს ტალღის წარმოქმნას, ჰიდრავლიკური პარამეტრების როგორც უწყვეტი, ისე საფეხურისებად ცვლილებას. მოვლენის ეს სახე მრავალი ფაქტორის ზემოქმედებით შეიძლება იყოს გამოწვეული. აქედან გამომდინარე, ნაკადის მოძრაობა სხვადასხვა სახის ფორმით შეიძლება განხორციელდეს. ტალღის პირველი სახე, რომელიც სატრანზიტო უბნის მთელ სიგრძეზე ვრცელდება – უწყვეტის, ხოლო მეორე – დინამიკური ტალღის სახელწოდებითაა ცნობილი.

ღვარცოფის ზედაპირზე ჩამოყალიბებული ტალღა ხშირად მნიშვნელოვანი ამპლიტუდით ხასიათდება, რომლის გათვალისწინება სარეგულაციო ღონისძიებების საპროექტო გადაწყვეტებში აუცილებლობას წარმოადგენს.

ღვარცოფის მოძრაობა, სქემიდან გამომდინარე, როცა საკონტროლო კვეთებში ნაკადის სიღრმეები არის h_1 და h_2 ტალღის ფორმით მოძრავი V_c სიჩქარის შემთხვევაში, მოძრაობის რაოდენობის ცვლილება

$$\frac{\alpha' \gamma}{g} Q(V_1 - V_2) = P_2 - P_1, \quad (2.3.12)$$

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

γ – ღვარცოფის მოცულობითი წონა (ნ/მ^3);

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

P_1, P_2 – შერჩეულ კვეთებში მოქმედი წნევები (ნ/მ^2);

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

შერჩეული კვეთის სიჩქარეებს თუ წარმოვადგენთ ცოცხალი კვეთის ω_1 და ω_2 ფართობებით მივიღებთ:

$$\frac{\alpha' \gamma q}{g} \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_1 \omega_2} = \Delta P. \quad (2.3.13)$$

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

$$\frac{\alpha' \gamma Q^2}{g} \frac{h_2 - h_1}{h_1 h_2} = \Delta P \quad (2.3.14)$$

$$\frac{\alpha' \gamma Q^2}{Bg \Delta p h_1} = \frac{h_1 h_2}{h_2 - h_1} \quad (2.3.15)$$

რადგან შეუღლებულ სიღმეთა სხვაობა:

$$\Delta h = h_2 - h_1 \quad (2.3.16)$$

(2.3.16.)-ის გათვალისწინებით (2.3.15.)-ში გვექნება:

$$\frac{\alpha' \gamma}{g \Delta p h_1} \left(1 + \frac{h_1}{\Delta h} \right). \quad (2.3.17)$$

ფარდობა $\frac{\Delta h}{h}$ რადგან წარმოადგენს მოძრავი ნაკადის შემფოთებით

გამოწვეულ ფარდობით დეფორმაციას,

$$\frac{\Delta h}{h_1} = \frac{(1 - h_0 / h_1) \psi^3 + 4 \sqrt{(1 - h_0 h) \psi}}{4}, \quad (2.3.18)$$

ე.ი.

$$\frac{\Delta h}{h_1} = \frac{a + 4 \sqrt{a}}{4} \quad (2.3.19)$$

(2.3.19.)-ის გათვალისწინებით (2.3.17.)-ში, შესაბამისი გარდაქმნებისა

და გამარტივების საფუძველზე გვექნება:

$$\frac{\alpha' \gamma Q X}{g \Delta P} = Bh_1 \frac{4 + 4 \sqrt{a} + a}{a^3 + 4 \sqrt{a}}. \quad (2.3.20)$$

შემფოთებულ ზონაში წნევის ნაზარდის მნიშვნელობას ექნება სახე:

$$\Delta P = \frac{\alpha' \gamma V^2}{g} \frac{a + 4 \sqrt{a}}{4 + 4 \sqrt{a} + a^3}. \quad (2.3.21)$$

როცა რეოლოგიურ მახასიათებლების მნიშვნელობები 0-ის ტოლია,

$$\Delta P = \frac{5}{9} \alpha' \rho V^2 \quad (2.3.22)$$

შემფოთებული ზონის მიმართ თუ გამოვიყენებთ გარე ძალის იმპულსის საანგარიშო მნიშვნელობას, როცა მისი მოძრაობის სიჩქარე საშუალო სიჩქარის ტოლია:

$$\Delta P = \rho c V + \rho V^2 \quad (2.3.23)$$

რადგან ღვარცოვის მოცულობითი მასა $\gamma = \rho g$,

(2.3.23.)-ე განტოლება მიიღებს სახეს:

$$\Delta P = \alpha' \rho V^2 \frac{a + 4a\sqrt{a}}{4 + 4a\sqrt{a} + a^3} \quad (2.3.24)$$

(2.3.24.)-ის გატოლებით (2.3.23.)-თან გვექნება:

$$\frac{c}{V} = 1 + \alpha' \frac{a + 4\sqrt{a}}{4 + 4\sqrt{a} + a} \quad (2.3.25)$$

ტალღის გავრცელების სიჩქარე:

$$c = v + \alpha' V \frac{a + 4\sqrt{a}}{4 + 4\sqrt{a} + a} = V \frac{(\alpha' + 1)(4\sqrt{a} + a) + 4}{4\sqrt{a} + a + 4} \quad (2.3.26)$$

როცა უწყვეტი ტალღა უსწრებს დინამიკურს, მაშინ პირველსაწყისი თანაბარი მოძრაობის პირობა ირღვევა. ΔP ძალის იმპულსით გამოწვეული ტალღის სიჩქარე შემფოთებულ ტალღის ზონაში ნაკადის თავისუფალ ზედაპირზე შეიძლება ხასიათდებოდეს სიჩქარით $V \geq C$, რომელიც წყნარი მდგომარეობის დროს გამოისახება უტოლობით $V < C$, ე.ი. დინების ზემოთ ტალღის ცენტრი V სიჩქარის მიმართულებით გადაადგილდება, ხოლო ტალღის გავრცელების სიჩქარე შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს V_{δ} სიდიდით.

რადგან ტალღის გავრცელების სიდიდე,

$$V_{\delta} \gg C + V, \quad (2.3.27)$$

შესაბამისად,

$$V_{\delta} \gg V \frac{(\alpha' + 2)(a + 4a\sqrt{a}) + 8}{4 + 4\sqrt{a} + a} \quad (2.3.28)$$

როგორ კვლევები ადასტურებს, ტალღის გავრცელების სიჩქარე ღვარცოვში მის საშუალო სიჩქარეზე 3-ჯერ მეტია, რასაც ადასტურებს მოდელი. აქედან გამომდინარე, განტოლება (2.3.28.)-ის ანალიზის საფუძველზე სიჩქარის განტოლების კოეფიციენტი $\alpha' = 1,8$ ღვარცოვის

ხარჯი სტაციონალური თანაბარი მოძრაობის შემთხვევაში დამოკიდებულია მის სიღრმეზე.

უწყვეტი ტალღის სიჩქარე V_{δ} -ს მნიშვნელობა ტალღის უწყვეტობის შემთხვევაში შეიძლება განსაზღვრული იქნეს უწყვეტობის პირობიდან გამომდინარე. როცა ღვარცოფის ხარჯი Q -ს, ხოლო ცოცხალი კვეთის ფართობ ω -ს ტოლია, ასეთ შემთხვევაში შეიძლება ადგილი ჰქონდეს ასეთ ტოლობას:

$$Q - \omega V_{\delta} = Q + \delta Q - V_{\delta} (\omega + \delta \omega) \quad (2.3.29)$$

სადაც Q ღვარცოფის ხარჯია პირველ კვეთში;

$Q + \delta Q$ - ღვარცოფის ხარჯია მეორე კვეთში;

ω - ცოცხალი კვეთის ფართობი პირველ კვეთში;

$\omega + \delta \omega$ - ცოცხალი კვეთის ფართობი მეორე კვეთში;

V_{δ} - უწყვეტი ტალღის გავრცელების სიჩქარე.

(2.3.29.) განტოლებიდან

$$V_{\delta} = \frac{\partial Q}{\partial \omega} \quad (2.3.30)$$

თუ მხედველობში მივიღებთ, რომ:

$$Q = \omega V_{\delta} \quad , \quad (2.3.31)$$

$$V_{\delta} = \frac{\partial Q}{\partial \omega} \frac{\partial (\omega V_{\delta})}{\partial \omega} = V_{\delta} \frac{\partial \omega}{\partial \omega} + \omega \frac{\partial V_{\delta}}{\partial \omega} \quad (2.3.32)$$

V_{δ} - კვეთში ნაკადის მოძრაობის საშუალო სიჩქარე,

ე.ი.

$$V_{\delta} = V + \omega \frac{\partial V}{\partial \omega} \quad (2.3.33)$$

(2.3.33.)-ე დამოკიდებულებიდან უწყვეტი ტალღის სიჩქარე აღემატება საშუალო სიჩქარეს $\omega \frac{\partial V}{\partial \omega}$ სიდიდით, თანაბარი მოძრაობის შემთხვევაში ღვარცოფის ხარჯი:

$$Q = \frac{BgiH^3}{\alpha} f(\beta) \quad (2.3.34)$$

ნაკადის სიჩქარე, როცა ხვედრითი ხარჯი $q = Vh$

$$V_{\delta} = \frac{\partial Q}{\partial \omega} = \frac{\partial q}{\partial H} = \frac{3giH^2}{\alpha} f(\beta) \quad (2.3.35)$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ $V = q / H$

$$V = \frac{Q}{\omega} = \frac{q}{H} = \frac{giH^2}{\alpha} f(\beta) . \quad (2.3.36)$$

(2.3.35.) -ისა და (2.3.36.) -ის გატოლებით მივიღებთ:

$$V_{\delta} = 3V . \quad (2.3.37)$$

(2.3.26.)-ე დამოკიდებულებიდან საშუალო სიჩქარის ტალღის სიჩქარესთან ფარდობა:

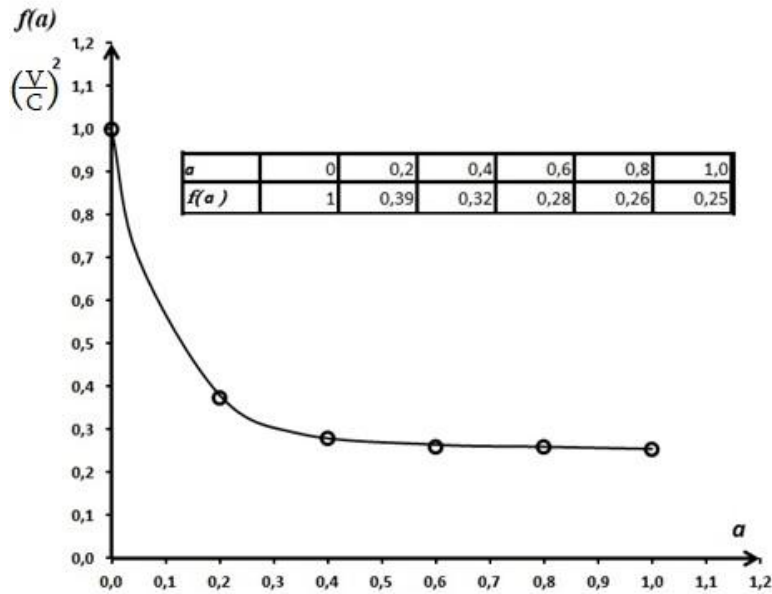
$$\left(\frac{V}{c}\right)^2 = \left(\frac{4\sqrt{a+a+4}}{(\alpha'+1)(4\sqrt{a+a})+4}\right)^2 . \quad (2.3.38)$$

(2.3.32.)-ე დამოკიდებულებიდან ფუნქციური დამოკიდებულება $\left(\frac{V}{c}\right)^2$

შეიძლება გაანგარიშებული იქნეს გრაფიკული დამოკიდებულებით, თუ შემოვიღებთ მნიშვნელობას

$$\left(\frac{4\sqrt{a+a+4}}{(\alpha'+1)(4\sqrt{a+a})+4}\right)^2 = f(a) = \left(\frac{V}{c}\right)^2 . \quad (2.3.39)$$

გრაფიკული დამოკიდებულება $f(a) = a$ -ს მოცემულია ნახ. 9-ზე, როცა $\alpha' = 1,8$ -ს



ნახ. 9. გრაფიკული დამოკიდებულება $f(a) = a ; \left(\frac{V}{c}\right)^2 = a$

როგორც გრაფიკული დამოკიდებულების 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 1,8-ის ტოლია, ე.ი. ჰიპერკონცენტრირებულ ნაკადებში ტალღის წარმოქმნის შესაძლებლობა წყალთან შედარებით მცირდება რეოლოგიური მახასიათებლების გავლენის გამო და ჰიდრავლიკური თვალსაზრისით ნაკადი უფრო მდგრადია.

ძრაობის რეჟიმის შეცვლა ღვარცოფში ხშირად იწვევს ხარჯის სიღრმის სიჩქარის უწყვეტად ან საფეხურისებურად ცვლილებას, სადინართა კალაპოტი ხასიათდება მდგრადობის რღვევითა და გაზრდილი ტრანსპორტუნარიანობით. აქედან გამომდინარე, ტალღის ნაკადის მახასიათებელ პარამეტრებთან კავშირის დამყარებით შესაძლებელია რაოდენობრივად შეფასდეს ტალღური მოძრაობის გავლენა შემხვედრ წინააღმდეგობებზე.

იმ შემთხვევაში, როცა ვიხილავთ სადინარს, რომლის განივი კვეთი ნაკადის მოძრაობის მიმართულებით განიცდის შევიწროებას ან

გაფართოებას, ასეთ სადინარში ნაკადის არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლების სახე და, შესაბამისად, ამოხსნაც რთულდება. ამასთან ერთად, უცნობია ტალღის ფორმის სახით ჩამოყალიბების შესაძლებლობები სადინარში შექმნილი სხვადასხვა პირობების გამო.

არაპრიზმატული კალაპოტში მოძრავი ღვარცოფის სიღრმისა და სიჩქარის ცვლილების შესწავლის მიზნით შეიძლება გამოყენებული იქნეს ნაკადის არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლება [16, 57, 63]:

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{ic - Ifc + \frac{\alpha Q^2}{g} \frac{1}{q^3} \frac{\partial \omega}{\partial \ell}}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g} \frac{B}{\omega^3 a^3}} \quad (2.3.40)$$

არაპრიზმატულ კალაპოტში, როცა სადინარის ქანობის მნიშვნელობა მისი წინააღმდეგობის ქანობის ტოლია,

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{\frac{\alpha Q^2}{g \omega^3 a^3} \frac{\partial \omega}{\partial \ell}}{1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g \omega^3 q}} \quad (2.3.41)$$

(2.3.41.)-ე განტოლებაში, როცა $\alpha = 1, a = (1 - h_0 / h) \varphi$

მაშინ ღვარცოფის ხარჯი:

$$Q = \omega_c V_c = a \omega \cdot a V = a^2 \omega^2 V, \quad (2.3.42)$$

შესაბამისად,

$$Q^2 = a^4 V^2 \omega^2. \quad (2.3.43)$$

მიღებული ხარჯის მნიშვნელობას თუ გავითვალისწინებთ (2.3.41.)-ე განტოლებაში, გვექნება:

$$\frac{Q^2}{g \omega^3 q^3} = \frac{a V^2}{g} = \frac{a V^2}{\frac{g B h}{c^2}} = \frac{a \left(\frac{V}{c} \right)^2}{B} \quad (2.3.44)$$

(2.3.44.)-ის მნიშვნელობას თუ შევიტანთ (2.3.41.)-ში, გვექნება:

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{\frac{a \left(\frac{V}{c}\right)^2 \frac{\partial \omega}{\partial \ell}}{B \left(\frac{c}{V}\right)^2}}{1 - a \left(\frac{V}{c}\right)^2} \quad (2.3.45)$$

არაპრიზმატულ კალაპოტში სიგანე B ცოცხალი კვეთის ზედაპირზე უცვლელი h სიღრმის შემთხვევაში იცვლება ℓ სიგრძესთან კავშირში $B = f(\ell)$, ხოლო $\omega = f(h; B)$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \ell} = h \frac{dB}{d\ell} . \quad (2.3.46)$$

(2.3.46.)-ის გათვალისწინებით (2.3.45.)-ში, გვექნება:

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{\left(\frac{V}{c}\right)^2 \left(\frac{h}{B}\right) a \frac{dB}{d\ell}}{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2 a} . \quad (2.3.47)$$

ნაკადის ცოცხალი კვეთი იცვლება ნაკადის სიღრმესთან და სიგრძესთან კავშირში:

$$\frac{d\omega}{d\ell} = \frac{\partial \omega}{\partial h} \frac{dh}{d\ell} + \frac{\partial \omega}{\partial \delta} = B \frac{dh}{d\ell} + h \frac{dB}{d\ell} . \quad (2.3.48)$$

თუ ცოცხალი კვეთის ცვლილებას წარმოავადგენთ ხარჯითა და სიჩქარით,

$$\frac{d\omega}{d\ell} = \frac{d(Q/V)}{d\ell} = -\frac{Q}{V^2} \frac{dV}{d\ell} . \quad (2.3.49)$$

შესაბამისად, გვექნება:

$$-\frac{Q}{V^2} \frac{dV}{d\ell} = h \frac{dB}{d\ell} + B \frac{dh}{d\ell} . \quad (2.3.50)$$

(2.3.50.)-ე განტოლებისა და (2.3.47.)-ის ერთობლივად ამოხსნის საფუძველზე გვექნება:

$$\frac{dV}{d\ell} = -\frac{V}{B \left[1 - a \left(\frac{V}{c}\right)^2\right]} \frac{dB}{d\ell} . \quad (2.3.51)$$

ნაკადის მიღებული სიღრმისა და სიჩქარის სადინარის სიგრძეზე ცვლილების საფუძველზე შეიძლება დადგენილი იქნეს მოძრაობის

რეჟიმების ცვლილების ხასიათი გაფართოებული და შევიწროებული სადინარის კალაპოტის სიგრძეზე. აღნიშნულიდან გამომდინარე ნაკადის რეჟიმების მდგომარეობა სქემის სახით ცხრილი 3.-ში შემდეგნაირად არის წარმოდგენილი.

ცხრილი 3.

**ღვარცოფის სიღრმისა და სიჩქარის ცვლილება რეჟიმთან კავშირში სადინარებში
ნაკადის სიგანის გაფართოებისა და კუმშვის დროს, როცა $i_e = i_f$**

კალაპოტის სიგანის ცვლილება	ნაკადის მდგრად ობა	ცვლილება		კალაპოტის სიგანის ცვლილება	ნაკადის მდგრადო ბა	ცვლილება	
		სიღრმ ე	სიჩქარე			სიღრმ ე	სიჩქარე
$\frac{dB}{d\ell} > 0$	$V/c < 1$ წყნარი	$\frac{dh}{d\ell} > 0$	$\frac{dV}{d\ell} < 0$	$\frac{dB}{d\ell} < 0$	$V/c < 0$	$\frac{dh}{d\ell} < 0$	$\frac{dV}{d\ell} > 0$
	$V/c > 1$ მძაფრი	$\frac{dh}{d\ell} < 0$	$\frac{dV}{d\ell} > 0$		$V/c > 0$	$\frac{dh}{d\ell} > 0$	$\frac{dV}{d\ell} < 0$

ქანობის მხედველობაში მიღებით ღვარცოფის მოძრაობის ანალიზი არაპრიზმატულ კალაპოტში გვიჩვენებს, რომ შევიწროებად კალაპოტში ნებისმიერი და გაფართოებად კალაპოტში დადებითი ქანობის დროს შესაძლებელია იმავე თავისუფალი ზედაპირის ფორმები, როგორც პრიზმატულ კალაპოტში.

წარმოდგენილ შემთხვევაში რადგან მოძრაობა განხილულია, როგორც ერთგანზომილებიანი ამოცანის შედეგებით, მისი შეფასება შესაძლებელია სადინარის კალაპოტის კვეთში სიჩქარისა და სიღრმის გასაშუალებული მნიშვნელობებით.

თავი 3. ბმული ღვარცოფის ჰიდრაულიკა

3.1. ღვარცოფწარმომქმნელი კერებიდან დაძრული მასის ხარჯის განსაზღვრა

ღვარცოფწარმომქმნელი კერებიდან ფორმირებული მასის დაძვრის პროცესი და მოსალოდნელი ხარჯის პროგნოზი რთულ ამოცანათა კატეგორიას განეკუთვნება. როცა ცნობილია მოსალოდნელი ხარჯი და ნაკადის ენერგეტიკული მახასიათებლები, ასეთ შემთხვევაში ღვარცოფსარეგულაციო ღონისძიებათა შერჩევა სირთულეს არ წარმოადგენს. კერის ერთეული სიგანისა და სიგრძის ფართობიდან მიღებული ხარჯის საფუძველზე შესაძლებელია ტალღათა ოჯახისათვის რეოლოგიასთან კავშირში გამოყვანილი იქნეს ტალღის სიგრძისა და თავისუფალი ზედაპირის განტოლებები და, ამასთან ერთად, აღიწეროს ფორმირებული ღვარცოფის დაძვრულ მდგომარეობაზე აქტიური განივი ძალის ზემოქმედების შესაძლებლობა.

კერიდან ღვარცოფის დაძვრა მრავალი ურთიერთმართვადი ფაქტორის ფუნქციაა და ხარჯის წარმოქმნის პროცესის მექანიზმის სრულად წარმოდგენა გარკვეული კატეგორიის შუალედური ამოცანების გადაწყვეტას მოითხოვს.

შუალედურ ამოცანათა შორის ძალზედ მნიშვნელოვანია წონასწორობის რღვევის და მათი მათემატიკური მოდელების პროცესთან ადაპტაციის საკითხის დაზუსტება. პირველი შეხებით შეიძლება გამოყენებული იქნეს ხარისხობრივი ფუნქციები.

დაძრული ღვარცოფის მოცულობის, სიჩქარის, სიმაღლისა და ხარჯის დროსთან კავშირების დაზუსტებას განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს ღვარცოფსარეგულაციო ღონისძიებათა შერჩევის დროს [64, 65, 66, 67, 68, 69].

ბუნებაში ჩატარებული კვლევის მასალების ანალიზით დადასტურებულია, რომ ზღვრული წონასწორობის დარღვევის დროს ჩამომეწყრილ და ნარჩენ მასას შორის გამავალი ზედაპირის წირი არ არის

სწორხაზოვანი და მისი სიმრუდის ხარისხი ფიზიკურ–მექანიკურ და რეოლოგიურ მახასიათებლებთანაა დაკავშირებული [69].

ზემოთ აღნიშნული და კვლევის არსებული მასალები, სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით, ადასტურებს, რომ ღვარცოფის მასის დაძვრა, მისი მახასიათებლების ცვლილების პროგნოზირების შესწავლის დონე, მიუხედავად პრობლემისადმი მიძღვნილი უამრავი სამეცნიერო შრომებისა, იმდენად დაბალია, რომ საპროექტო დაწესებულებები და სამშენებლო ორგანიზაციები დღესაც განიცდიან საიმედო რეკომენდაციების დეფიციტს ღვარცოფსაწინააღმდეგო პროექტების გადაწყვეტის დროს.

ღვარცოფულ კერებში, ეროზიულ ღრანტებში, გამოტანის კონუსზე განთავსებული ბმული ღვარცოფული მასის მდგრადობის შესწავლის სურათიდან გამოვლინდა, ზღვრულ წონასწორობაში მყოფი ღვარცოფის ზედაპირზე გამავალ წირს მრუდის ფორმა აქვს და მასის სიღრმესა და გავრცელების ზონის სიგრძეს შორის კავშირი მრუდწირულია [70, 71, 72, 73, 74].

მისი ფორმის წარმოჩენის მიზნით ეს კავშირი შეიძლება აღწერილი იქნეს ხარისხობრივი დამოკიდებულებებით, რომელსაც შემდეგი სახე აქვს:

$$Y = aX^b, \quad (3.1.1)$$

სადაც a კოეფიციენტია, ხოლო b ხარისხის მაჩვენებელია, მათი სიდიდე კი ღვარცოფთა რეოლოგიურ და ფიზიკურ–მექანიკურ მახასიათებლებთანაა უშუალოდ დაკავშირებული;

Y – ჩამომეწყვრის სიღრმის ცვლილების კოორდინატი (მ);

X – წონასწორული ზედაპირის გავრცელების ზონის სიგრძე (მ).

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

$$S = LaL^b - \int_0^L ax^b dx = aL^{1+b} - \frac{aL^{1+b}}{1+b} \quad (3.1.2)$$

რადგან (3.1.1.) დამოკიდებულებაში, როცა $Y=H$, $x=L$ და $H=aL^b$, ამიტომ (3.1.2.)–ში L –ის სიდიდეს თუ გამოვსახავთ ღვარცოფწარმოქმნელი მასის სიღრმე H –ით, გვექნება:

$$S = \frac{1}{a^{\frac{1}{b}}} \frac{b}{1+b} H^{\frac{1+b}{b}} \quad (3.1.3)$$

როცა კერის სიგანე 1 მ-ის ტოლია, ჩამომეწყვრის მოცულობა შეიძლება გაანგარიშებული იქნეს ფორმულით:

$$W = \frac{b}{1+b} \frac{1}{a^{\frac{1}{b}}} H^{\frac{1+b}{b}} \quad (3.1.4)$$

კერაში ფორმირებული ღვარცოფის დაძაბული მდგომარეობის დარღვევა მისი ტანის წონასწორული მდგომარეობის გარკვეულ ფაზაზე შესაძლებელი და შემადგენელი კომპონენტების ურთიერთთანაფარდობის გარკვეულ ზღვრებთანაა დაკავშირებული. შესაბამისად, წონასწორობის რღვევას აქტიური განივი რიგის სიდიდე შეესაბამება, ხოლო მოძრაობის დინამიკა ღვარცოფის მასის ფორების წყლით შევსების ხარისხთან, კაპილარულ ტენთან, ეფექტური ბმულობის ძალებსა და ხარჯთანაა დაკავშირებული.

კერაში ფორმირებული ღვარცოფიდან გარკვეული სიდიდის ხარჯის მიღების შესაძლებლობა შეიძლება შეფასდეს გრუნტების მექანიკაში გამოყენებული მოწყვეტის მოცულობის შეფასების მეთოდოლოგიის ანალოგიურად.

როცა ცნობილია ღვარცოფწარმომქმნელი მასის სიმკვრივე ρ , სიმძიმის ძალის აჩქარება g , შინაგანი ხახუნის კუთხე φ , შეჭიდულობის წნევა Pe , შეჭიდულობის წნევის ექვივალენტური სიღრმე h' , ღვარცოფწარმომქმნელი მასის სიმაღლე H , აქტიური განივი წნევის სიდიდე

$$P = \rho g (H + h') \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - Pe . \quad (3.1.5)$$

შეჭიდულობის წნევის მნიშვნელობა Pe როცა $\rho h' g$ -ს ტოლია, აქტიური ექვივალენტური სიღრმის სიდიდე

$$P = \gamma H \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2C \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (3.1.6)$$

აქტიური წნევის მეშვეობით ღვარცოფული მასის დაძვრის პროცესი ზედაპირიდან გარკვეულ სიღრმეზე ხდება და როცა $P=0$, ბმულობის ექვივალენტური სიღრმე:

$$h_0 = \frac{2C}{\gamma \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} . \quad (3.1.7)$$

როცა $\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) = \psi$ და $\left(1 - \frac{h_0}{h}\right)\psi \frac{\varphi}{2} a - 1$,

აქტიური წნევის სიდიდე:

$$P = \gamma HK \quad (3.1.8)$$

აქტიური წნევით გამოწვეული დაწნევა:

$$\frac{P}{\gamma} = HK . \quad (3.1.9)$$

აქტიური წნევის სიღრმეზე განაწილება, როცა ჰიდროსტატიკურის ანალოგიურია, განივი ძალის სიდიდე:

$$P = \frac{\gamma H^2}{2} K^2 \quad (3.1.10)$$

აქტიური P წნევის ძალა წონასწორული მდგომარეობის რღვევის ძალას წარმოადგენს, რომლის შედეგად ღვარცოფის დაძვრული მოცულობა, როცა კერის სიგანე B -ს ტოლია:

$$W = \frac{P}{\gamma} = \frac{BH^2}{2} \left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^2 \varphi^2 = \frac{BH^2}{2} K^2 \quad (3.1.11)$$

როცა კერის სიგრძე L -ის ტოლია, შესაბამისად, დაძვრული მოცულობის საანგარიშოდ შეიძლება გამოვიყენოთ

$$BHL = \frac{BH^2}{2} K^2 , \quad (3.1.12)$$

ხოლო ჩამომეწყრის ფართობი:

$$S_1 = \frac{H^2}{2} K^2 . \quad (3.1.13)$$

აქტიური ძალის გავლენის სიგრძე:

$$L = \frac{K}{2} H . \quad (3.1.14)$$

კერის აქტიური სიმაღლე:

$$H_s = KH , \quad (3.1.15)$$

ხოლო ხარჯის სიდიდე

$$Q = \frac{W}{t} . \quad (3.1.16)$$

როგორც განტოლება (3.1.13.)-დან ჩანს, ჩამომეწყვრის ფართობის მნიშვნელობას თუ გავუტოლებთ (3.1.3.)-ს, მივიღებთ:

$$\frac{K^2 H^2}{2} = \left(\frac{1}{a^{\frac{1}{b}}} + \frac{b}{1+b} \right) H^{\frac{1+b}{b}} . \quad (3.1.17)$$

a და b კოეფიციენტების განსაზღვრის მიზნით გვექნება:

$$\begin{cases} \frac{K^2}{2} = \frac{1}{a^{\frac{1}{b}}} + \frac{b}{1+b} , \\ 2 = \frac{1+b}{b} \end{cases} , \quad (3.1.18)$$

თუ ამოვხსნით განტოლებას:

$$2 = \frac{1+b}{b} \quad (3.1.19)$$

$$2b = 1+b$$

განტოლებათა სისტემიდან b-ს მნიშვნელობა $b=1,0$;

b-ს მნიშვნელობას თუ შევცვლით (3.1.18.) განტოლებათა სისტემაში:

$$a = -\frac{2}{1-K^2} . \quad (3.1.20)$$

შესაბამისად, ჩამომეწყვრის ფართობის მნიშვნელობა:

$$S = -\frac{1-K^2}{2} \frac{1}{2} H^2 , \quad (3.1.21)$$

ე.ი.

$$S = -\frac{1-K^2}{4} H^2 = -\frac{1-\left(1-\frac{b}{H}\right)^2 \varphi^2}{4} H^2 . \quad (3.1.22)$$

ჩამომეწყვრის მოცულობა, როცა კერის სიგანე B-ს ტოლია:

$$W = -\frac{1 - \left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^2 \varphi^2}{4} B \cdot H^2, \quad (3.1.23)$$

ხოლო ჩამომეწყერის მასის ხარჯი:

$$Q = -\frac{a - \left(1 - \frac{b}{H}\right)^2 \varphi^2 B H^2}{4t}. \quad (3.1.24)$$

ღვარცოფული კერის უცრად გარღვევის შემთხვევაში:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dH} \frac{dH}{dt} = \Omega \frac{dH}{dt} \quad (3.1.25)$$

სადაც Ω ღვარცოფწარმომქმნელი კერის სარკის ზედაპირის ფართობია;

W – ღვარცოფწარმომქმნელი კერის მოცულობა;

t – ღვარცოფწარმომქმნელი კერის დაცლის დრო.

როცა კერის ზედაპირის ფართობი მუდმივი სიდიდეა $\Omega = const$,

შეიძლება დაწეროთ შემდეგი სახის განტოლება:

$$W(H) = \Omega H \quad (3.1.26)$$

შესაბამისად (3.1.23.)-ის და (3.1.25.)-ის ერთმანეთთან გატოლებით გვექნება:

$$\Omega \frac{dH}{dt} = -\left[1 - \left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^2 \varphi^2\right] B H^2. \quad (3.1.27)$$

(3.1.27.)-ში ცვლადთა განცალგებით გვექნება:

$$\frac{dH}{H^2} = -\left[1 - \left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^2 \varphi^2\right] B dt \quad (3.1.28)$$

$$-\frac{1}{H} = -\frac{\left[1 - \left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^2 \varphi^2\right] B t + c}{4\Omega}. \quad (3.1.29)$$

როცა $t=0$; $-\frac{1}{H} = -\frac{1}{H_0}$; $c = -\frac{1}{H_0}$:

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{H_0} + \frac{\left[1 - \left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^2 \phi^2\right] B t}{4\Omega} . \quad (3.1.30)$$

ღვარცოფწარმომქმნელ კერაში დაძრული ღვარცოფის სიღრმის ცვლილების კანონზომიერება:

$$H(t) = \frac{1}{\frac{1}{H_0} + \frac{\left[1 - \left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^2 \phi^2\right] B t}{4\Omega}} . \quad (3.1.31)$$

შესაბამისად, ღვარცოფის ხარჯი:

$$q(t) = \frac{\left[\left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^2 \phi^2\right]}{4t\Omega} \left[\frac{1}{\frac{1}{H_0} + \left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^2 \phi^2 t} \right]^2 ,$$

ე.ი.

$$q(t) = \frac{\left[\left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^2 \phi^2 - 1\right]}{4t\Omega \left(\frac{1}{H_0} + \left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^2 \phi^2 t\right)^2} . \quad (3.1.32)$$

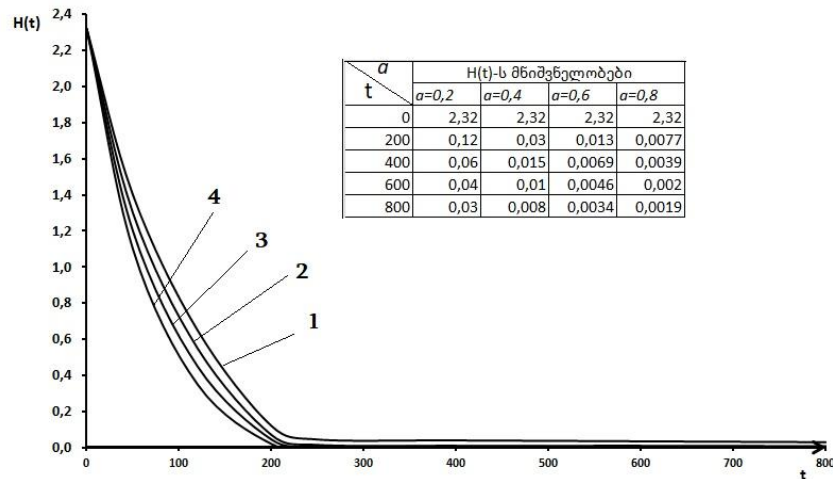
შესაბამისად, საშუალო სიჩქარის ცვლილება დროსთან კავშირში

$$V(t) = \frac{q(t)}{H(t)} = \frac{\left[\left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^2 \phi^2 - 1\right]}{4t\Omega \left(\frac{1}{H_0} + \frac{\left(1 - \frac{h_0}{H}\right)^2 \phi^2 t}{4\Omega}\right)^2} \quad (3.1.33)$$

მიღებული დამოკიდებულებების ანალიზით იქმნება შესაძლებლობა განისაზღვროს პარამეტრების კანონზომიერება, რომელიც ახასიათებს ღვარცოფწარმომქმნელ კერებს შესაძლო გარღვევის შემთხვევაში.

ამ შემთხვევაში თვალსაჩინოების მიზნით მოცემულია (გრაფიკული სურ. 10.) პარამეტრების ცვლილების ისეთი კანონზომიერება, რომელიც ახასიათებს ღვარცოფწარმომქმნელ კერას, რომლის დროს მისი სიმაღლე –

$H_0 = 3,4$ მ-ს, კერის სარკის ზედაპირის ფართობი $\Omega = 60000$ მ²-ს, ღვარცოფწარმოქმნელი კერის მოცულობა $W_0 = 138000$ მ³-ს. სასაზღვრო პირობებით მიღებულია მაქსიმალური სიღრმის ცვლილების კანონზომიერება $H(t) = (t)$, ნახ.10.-ზე



ნახ.10. გრაფიკული დამოკიდებულება $H(t) = (t)$ a კოეფიციენტის სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს
 1. $a=0,2$; 2. $a=0,4$; 3. $a=0,6$; 4. $a=0,8$.

მიღებული (3.1.31.), (3.1.32.) და (3.1.33.) დამოკიდებულებებით შეიძლება განხორციელდეს ღვარცოფის ტალღის გავრცელების პროგნოზი, რომლის საფუძველზე მიიღება შესაბამისი ღონისძიებები კატასტროფის გაუვნებელყოფის თვალსაზრისით.

3.2. სიმპლავრის დანაკარგები ბმულ ღვარცოფში

ღვარცოფთა ჰიდრაულიკის განხილვისას აუცილებელია გათვალისწინებული იქნეს რეოლოგიური პარამეტრები, რადგან მის შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების შემთხვევაში ნაკადის სტრუქტურა ირღვევა და ხშირად მოვლენა ნახტომის სახით ფორმირდება. ნახტომის ზონაში ან გაჩერებული ტალღის კუთრი ენერჯის შესაფასებლად შერჩეული კვეთებისათვის ვსარგებლობთ ბერნულის განტოლებით:

$$h_1 + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = h_2 + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + h_{\text{ღან.}} \quad (3.2.1)$$

შერჩეულ კვეთებში სიჩქარეთა მნიშვნელობების კუთრი ხარჯებით შეცვლის შემთხვევაში

$$\frac{\alpha V_1^2}{2g} = \frac{\alpha q^2}{2gh_1^2}, \quad (3.2.2)$$

$$\frac{\alpha V_2^2}{2g} = \frac{\alpha q^2}{2gh_2^2}. \quad (3.2.3)$$

შესაბამისად,

$$h_1 - h_2 = \varphi h_1 - \varphi h_0 + \varphi h_2 - \varphi h_0 = \varphi (h_1 - h_2). \quad (3.2.5)$$

მიღებულ მნიშვნელობებს თუ შევიტანთ ბერნულის განტოლებაში, მივიღებთ დანაკარგების სიდიდეს ნახტომის ზომაში:

$$h_{\text{ღან.}} = \varphi \frac{(h_1 h_2 + h_2 h_1 - 2h_0 h_1 h_2)(h_2^2 - h_1^2) - \varphi h_1^2 h_2^2 (h_2 - h_1)}{4h_1^2 h_2^2}. \quad (3.2.5)$$

(3.2.5.)-ის გარდაქმნებითა და გამარტივებით, როცა ნაკადის სადინარში $h_1 = h$, $h_0 = 0$ და $\varphi = 1$, ენერჯის დანაკარგს ექნება სახე:

$$h_{\text{ღან.}} = \varphi \frac{(\Delta h/h)^2}{4(1 + \Delta h/h)} \Delta h \left(1 - \frac{2h_2 \left(2 + \frac{\Delta h}{h} \right)^2}{\Delta h/h} \right) \quad (3.2.6)$$

$$h_{\text{ღან.}} = \varphi \frac{(\Delta h/h)^2}{4(1 + \Delta h/h)} \Delta h. \quad (3.2.7)$$

მიღებულიდან ჩანს, რომ დანაკარგის საანგარიშო დამოკიდებულება ემთხვევა წყლის ნაკადის მიერ ნახტომში ენერჯის დანაკარგის საანგარიშო დამოკიდებულებას.

შესაბამისად, კერიდან დაძვრის შემთხვევაში ღვარცოფული მასის Q ($\text{მ}^3/\text{წმ}$) ხარჯის დროს სიმძლავრე N დაკარგული წყლის მიერ ტოლი იქნება:

$$N = \gamma Q \Delta. \quad (3.2.8)$$

თუ (3.2.8.)-ში გათვალისწინებით (3.2.7.)-ს, გვექნება:

$$N = \varphi \gamma Q h \left(\frac{a^3 + 4\sqrt{a}}{4} \right)^3 \frac{h}{(4 + a^3 + 4\sqrt{a})} \left(1 - \frac{2h_0(8 + a^3 + 4\sqrt{a})}{4 + a^3 + 4\sqrt{a}} \right) \quad (3.2.9)$$

სადაც Q ბმული ღვარცოფის ხარჯია ($\text{მ}^3/\text{წმ}$);

γ – მოცულობითი წონა ($\text{კგ}/\text{მ}^3$);

h_1 და h_2 – შეუღლებული სიღრმეები (მ);

φ და h_0 – ბმული ღვარცოფის რეოლოგიური მახასიათებლები;

α – ღვარცოფის რეოლოგიური მახასიათებელი.

ენერჯის დინამიკის საანგარიშო დამოკიდებულებაში h_0 ბმულობის ექვივალენტური სიღრმეა და მისი სიდიდე რეოლოგიური მახასიათებლების ფუნქციას წარმოადგენს, ხოლო $a = \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) \psi$.

3.3. ბმული ღვარცოფის კრიტიკული მდგომარეობა და განმსაზღვრელი მახასიათებლები

როგორც საინჟინრო ამოცანათა გადაწყვეტის პრაქტიკა ადასტურებს, საანგარიშო დამოკიდებულებებში პარამეტრთა შორის განსაკუთრებულ ადგილს კრიტიკული სიღრმე იკავებს, ამიტომ მისი გაანგარიშებისათვის, როცა ღვარცოფული ნაკადის რეალური სიღრმე h -ის ტოლია, ვსარგებლობთ კვეთის ენერჯის საანგარიშო დამოკიდებულებით:

$$\varepsilon = h \left(1 - \frac{h_0}{h} \right) \varphi + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (3.3.1)$$

ან

$$\varepsilon = h + \frac{\alpha V^2}{2g} - h(1 - \varphi) - h_0 \varphi. \quad (3.3.2)$$

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

$$P = \frac{\gamma h^2}{2} \left(1 - \frac{h_0}{h}\right)^2 \varphi . \quad (3.3.3)$$

რადგან წნევის ძალის სიდიდე $P = \gamma h_{b.c.} \omega$ და შესაბამისად, $h_{b.c.} = H/2$, ამ შემთხვევაში, როცა $B = 1$, $\omega = h$, შეგვიძლია დავწეროთ,

$$\frac{\gamma h^2}{2} = \frac{\gamma h^2}{2} \left(1 - \frac{h_0}{h}\right)^2 \varphi . \quad (3.3.4)$$

(3.3.4.) განტოლების გამრავლებითა და h_0 -ის მიმართ კვადრატული განტოლების ამოხსნით გვექნება:

$$h_0 = h \frac{\sqrt{\varphi - 1}}{\sqrt{\varphi}} . \quad (3.3.5)$$

h_0 -ის მნიშვნელობას თუ გავითვალისწინებთ (3.3.2.)-ში, მივიღებთ:

$$\varepsilon = h - h(1 - \varphi) - h\varphi \frac{\sqrt{\varphi - 1}}{\sqrt{\varphi}} + \frac{\alpha V^2}{\varphi} . \quad (3.3.6)$$

(3.3.6.) დამოკიდებულების დიფერენცირებით გვექნება:

$$\frac{d\varepsilon}{dh} = d \left(h + \frac{\alpha V^2}{2g} \right) - \frac{1 - \varphi}{\varphi} \frac{dh}{dh} - \frac{\sqrt{\varphi - 1}}{\sqrt{\varphi}} \frac{dh}{dh} , \quad (3.3.7)$$

და ბოლოს მივიღებთ:

$$\frac{d\varepsilon}{dh} = -\frac{\alpha Q^2}{g\omega^3} B + \varphi \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) . \quad (3.3.8)$$

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

$$\frac{\alpha Q^2}{g\omega^3} B = \varphi \left(1 - \frac{h_0}{h}\right) . \quad (3.3.9)$$

(3.3.9.) საანგარიშო დამოკიდებულება ემთხვევა წყლის ნაკადის საანგარიშო დამოკიდებულებას.

(3.3.9.) დამოკიდებულების გარდაქმნითა და გამარტივებით მივიღებთ კრიტიკული სიღრმის საანგარიშო განტოლებას:

$$h_{კრ.}^3 - h_0 h_{კრ.}^2 - \frac{\alpha q^2}{g\varphi} = 0 . \quad (3.3.10)$$

კრიტიკული სიღრმის საანგარიშო (3.3.10.) განტოლება წარმოდგენილი სახით შეიძლება მივიღოთ მოძრაობის რაოდენობის განტოლებით, რაც მოდელის გამოყენების სიზუსტეზე მიუთითებს.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, როცა ტალღის სიჩქარე ნაკადის გადაადგილების სიჩქარის ტოლია, პროცესი შეიძლება განიხილოს როგორც ნახტომის მოვლენა. მძაფრი მოძრაობის გადასვლა წყნარ რეჟიმში ან პირიქით მიმდინარეობს ჰიდრავლიკური ნახტომით. ღვარცოფთა ღია სადინარებში მოძრაობის დროს, როგორც სუფთა ჰიდრავლიკაში, ისე აქაც ვხვდებით ნაკადის სხვადასხვა მდგომარეობას: მძაფრს, წყნარსა და კრიტიკულს.

ანალოგიური მოვლენა შეიძლება მოხდეს ბმულ ღვარცოფულ პროცესებში. ეს დაყოფა არ ატარებს ფორმალურ ხასიათს და გარკვეული სიზუსტით განსაზღვრავს სასაზღვრო პირობების დანიშვნის შესაძლებლობას. ასეთი ამოცანების გადაწყვეტის დროს, აუცილებელია ნაკადის მოძრაობის თავისუფალი ზედაპირის აგება და ანალიზი, ენერჯის ჩამქრობი ნაგებობის გაანგარიშება, ნაკადის მოძრაობის რეჟიმების შეფასება, ღვარცოფსაცავის ან მეწყრით შექმნილი კაშხლების გარღვევის შედეგად წარმოქმნილი ნაკადის მახასიათებლების დადგენა, კრიტიკული სიმაღლის, სიჩქარის, ხარჯისა და სხვა პარამეტრების განსაზღვრა.

ბმული ღვარცოფის მოძრაობის შემთხვევაში ნაკადის მდგომარეობა შეიძლება განიხილოს უტოლობით:

$$\frac{\alpha Q^2}{g\omega^3} B \begin{matrix} \geq T \\ < \end{matrix} \quad (3.3.11)$$

სადაც T – არის უგანზომილებო პარამეტრი და წლის განმავლობაში იგი 1–ის ტოლია.

ჩვენს შემთხვევაში T –ს აქვს ქვემოთ მოყვანილი სახე:

$$T = \varphi \left(1 - \frac{h_0}{h} \right)^3 \quad (3.3.12)$$

სადაც φ არის კოეფიციენტი და ღვარცოფის შინაგანი ხახუნის კუთხეზეა დამოკიდებული.

ქვემოთ მოყვანილია ბმული ღვარცოფის კრიტიკული მახასიათებლების განსაზღვრა.

ბმული ღვარცოფის ერთგანზომილებიანი დაუმყარებელი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლება განიცდის წყვეტას იმ შემთხვევაში, როცა წარმოებული და მნიშვნელი 0-ის ტოლია, ასეთ შემთხვევას შეესაბამება პირობა:

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{\omega_{კრ.}^3}{B} \varphi \left(1 - \frac{h_0}{h_{კრ.}} \right) \quad (3.3.13)$$

სადაც h_0 – ბმულობის ეკვივალენტური სიღრმე;

α – კორიოლისის კოეფიციენტი;

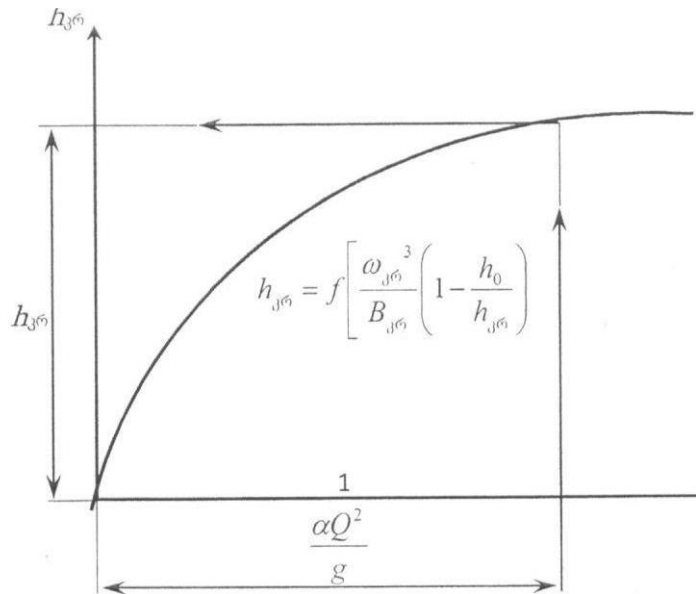
Q – ბმული ღვარცოფის ხარჯი;

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

g – სიმძიმის ძალის აჩქარება.

ნიუტონური სითხეების ჰიდრავლიკის ანალოგიურად, კრიტიკული მდგომარეობის შემთხვევაში კრიტიკული სიღრმის განსაზღვრის პირობა წარმოდგენილია (3.3.13.) განტოლებით, რომელიც ასევე შეიძლება

წარმოვადგინოთ გრაფიკულად (ნახ.11. $h_{კრ.} = f \left[\frac{\omega_{კრ.}^3}{B_{კრ.}} \left(1 - \frac{h_0}{h_{კრ.}} \right)^3 \varphi^3 \right]$)



ნახ. 11. $h_{კრ.} = f \left[\frac{\omega_{კრ.}^3}{B_{კრ.}} \left(1 - \frac{h_0}{h_{კრ.}} \right) \right] \varphi^3$ დამოკიდებულების გრაფიკი

(3.3.13.) განტოლებაში, როცა $h=h_{კრ.}$ და მარჯვენა ნაწილი 1-ის ტოლია,

ე.ი.:

$$\varphi = \left(1 - \frac{h_0}{h_{კრ.}} \right) = 1, \quad (3.3.14)$$

ხოლო ამონახსნს h_0 სიღრმის მიმართ ექნება შემდეგი სახე:

$$h_0 = -h_{კრ.} \frac{1-\varphi}{\varphi}. \quad (3.3.15)$$

(3.3.15.) განტოლებიდან 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 სიღრმის საანგარიშო ფორმულას ექნება სახე:

$$h_{კრ.} = -\frac{2c}{\gamma} \frac{\sqrt{\varphi}}{1-\varphi}. \quad (3.3.16)$$

ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე, (3.3.13.) განტოლებაში, როცა მარცხენა ნაწილი 1-ის ტოლია, კრიტიკული სიღრმის საანგარიშო დამოკიდებულება მიიღებს სახეს:

$$h_{კრ.} = \sqrt{\frac{\alpha q^2}{g}} . \quad (3.3.17)$$

(3.3.17.) განტოლების გათვალისწინებით (3.3.15.)-ში, ნაკადის გავლის სიმაღლის საანგარიშო დამოკიდებულებას ექნება სახე:

$$h_0 = -\sqrt{\frac{\alpha q^2}{g}} \frac{1-\varphi}{\varphi} . \quad (3.3.18)$$

სატრანზიტო უბნებზე ღვარცოფის მოძრაობის პირობების შეფასების დროს მისი კრიტიკული მახასიათებლები იძენენ განსაკუთრებულ მნიშვნელობას. კრიტიკული მახასიათებლების შეფასების მიზნით, კერძოდ, კრიტიკული სიღრმის განსაზღვრისას შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ნაკადის კვეთის ენერჯის განტოლება.

3.4. ნახტომის მოვლენა ბმულ ღვარცოფში

ნახტომის მოვლენა რთული დინამიკური პროცესია. მძაფრი და წყნარი რეჟიმების შეუღლების მახასიათებელი პარამეტრების შეფასებას განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება შემაუღლებელ ნაგებობათა საპროექტო პარამეტრების დაზუსტების დროს [75, 77, 78].

ბმული ღვარცოფის ჰიდრავლიკური ნახტომის ამოცანების გადაწყვეტის დროს პროცესის აღწერის საბაზისო ოპერატიულ საშუალებად მოძრაობის რაოდენობის განტოლება შეიძლება იქნეს მიჩნეული, რომელსაც აქვს სახე:

$$\alpha \rho Q (V_2 - V_1) = P_1 - P_2 \quad (3.4.1.)$$

სადაც ρ არის ბმული ღვარცოფის სიმკვრივე;

α – მოძრაობის რაოდენობის კოეფიციენტი;

Q – ბმული ღვარცოფის ხარჯი;

V_1, V_2 – ნაკადის სიჩქარეები ნახტომის საწყისსა და ბოლო კვეთებში;

P_1, P_2 – წნევის ძალები ნახტომის წინ და ბოლოს.

ნახტომის წინ და ბოლოს წნევის ძალების მნიშვნელობებისთვის, რეოლოგიური პარამეტრების გათვალისწინებით, შეიძლება დავწეროთ:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{\gamma h_1^2}{2} \left(1 - \frac{h_0}{h_1}\right)^2 \varphi \\ P_2 &= \frac{\gamma h_2^2}{2} \left(1 - \frac{h_0}{h_2}\right)^2 \varphi \end{aligned} \right\}, \quad (3.4.2)$$

შესაბამისად, (3.4.1.) განტოლება მიიღებს სახეს:

$$\frac{\alpha Q^2}{g \omega_1} + \frac{h_1^2}{2} \left(1 - \frac{h_0}{h_1}\right)^2 \varphi = \frac{\alpha Q^2}{g \omega_2} + \frac{h_2^2}{2} \left(1 - \frac{h_0}{h_2}\right)^2 \varphi. \quad (3.4.3)$$

თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ $Q = qB$, (3.4.3.) განტოლების ზოგიერთი გამარტივებითა და გარდაქმნით მივიღებთ:

$$\frac{\alpha q^2}{g \varphi} = h_1^2 h_2 + h_2^2 h_1 - 2 h_0 h_1 h_2. \quad (3.4.4)$$

(3.4.4.) განტოლებას თუ ამოვხსნით შეუღლებული სიღრმეების მიმართ, გვექნება:

$$h_1 = 0,5 h_2 \left(1 - \frac{2h_0}{h_2}\right) \left(\sqrt{1 + \frac{8\alpha q^2}{g h_2^2 \left(1 - \frac{2h_0}{h_2}\right)^2 \varphi}} - 1 \right); \quad (3.4.5)$$

$$h_2 = 0,5 h_1 \left(1 - \frac{2h_0}{h_1}\right) \left(\sqrt{1 + \frac{8\alpha q^2}{g h_1^2 \left(1 - \frac{2h_0}{h_1}\right)^2 \varphi}} - 1 \right). \quad (3.4.6)$$

იმ შემთხვევაში, როცა $\varphi = 1$ და $h_0 = 0$, (3.4.5.) და (3.4.6.) განტოლებები ემთხვევა წყლის შეუღლებული სიღრმეების საანგარიშო დამოკიდებულებებს. რაც შეეხება შეუღლებულ სიღრმეთა თანაფარდობის ცვლილებას, ამისათვის გამოიყენება კინეტიკურობის მახასიათებელი პარამეტრი Πk , რომლის მნიშვნელობა ღვარცოფის q კუთრი ხარჯისა და h საშუალო სიღრმის შემთხვევაში ტოლი იქნება:

$$\Pi k = \frac{\alpha q^2}{gh^3 \left(1 - \frac{h_0}{h}\right)^3 \psi^3} . \quad (3.4.7)$$

კინეტიკურობის მახასიათებელი ღვარცოფებში, როცა ნიუტონური სითხეების კუთრი ხარჯი ღვარცოფის ხარჯის ტოლია, წყალთან შედარებით მნიშვნელოვნად იზრდება. ნახტომის ფუნქციის გრაფიკის ანალოგიიდან გამომდინარე, რაც უფრო იზრდება h_0/h თანაფარდობის მნიშვნელობა და ბმულობის ψ კოეფიციენტის სიდიდე, მისი მაქსიმალური მნიშვნელობა წყალთან შედარებით 2-ჯერ უფრო მეტია. მოვლენის შეფასების ეს კრიტერიუმი საგრძნობლად ცვლის სარეგულაციო ღონისძიებათა საპროექტო პარამეტრების შერჩევის სტრატეგიას.

თავი 4. ღვარცოფთა პოტენციალის შეფასება და გარემოს დაცვა

4.1 ღვარცოფთა ჰიდროლოგიური მახასიათებლები და მისი როლი

წყლის რესურსების ინტეგრირებულ მართვაში

საქართველოს ბუნება, მისი ბიოლოგიური მრავალფეროვნება ერთ–ერთი უმთავრესი სიმდიდრეა და ქვეყნის მდგრადი განვითარება შეუძლებელია ამ სიმდიდრის რაციონალური გამოყენებისა და შენარჩუნების გარეშე. აღნიშნულიდან გამომდინარე, უაღრესად მნიშვნელოვანია მთიანი რეგიონების ბუნებრივი გარემოს სწორი, მეცნიერულ საფუძველზე დამყარებული დიაგნოსტიკა და შემდგომ ამ რესურსების ოპტიმალური გამოყენების სტრატეგიის შემუშავება.

საქართველოს მთიან რეგიონში ხშირად ფიქსირდება ბუნებრივი სტიქიური მოვლენები, როგორებიცაა: მიწისძვრა, წყალდიდობა, მეწყერი, ღვარცოფი, ზვავი, გვალვა. ამას ემატება კატასტროფების გაზრდილი ინტენსივობის გამომწვევი ისეთი მიზეზები, როგორებიცაა: დემოგრაფიული ცვლილება, დაუგეგმავი ურბანიზაცია, უსაფრთხოების ნორმების დაცვაზე არასაკმარისი კონტროლი, სოციალურ–ეკონომიკური უთანასწორობა, კლიმატის ცვლილება და, აღნიშნულ ფონზე, პრევენციული ღონისძიებების დაგეგმვისა და რეალიზაციის სისტემის სისუსტეები სახელმწიფო მართვის ყველა დონეზე. ჩამოთვლილი პრობლემები საჭიროებს საფუძვლიან შესწავლას, სადაც გათვალისწინებული იქნება ყველა შესაძლო ბუნებრივი საფრთხე.

გენეზისის, წარმოშობის, გავლის ინტენსივობის, გამოტანის კონუსების აკვატორიაზე მყარი ნატანის მოცულობის გამონატანის მიხედვით ღვარცოფები ერთ–ერთი ანომალური სტიქიაა. მნიშვნელოვნად საყურადღებოა ასეთი ნაკადების ზემოქმედების შეფასება წყალსატევებზე, რომლის გაუთვალისწინებლობას შესაძლებელია მოჰყვეს წყალსატევების მწყობრიდან სრულიად გამოსვლა [79,80, 81, 82,83].

სტატისტიკიდან გამომდინარე, ფიქსირებული ღვარცოფები სიხშირის მიხედვით გამოწვეულია 75,4 % თავსხმა წვიმებით, 4,6 % – წვიმებით, 18,9% - თოვლის დნობით, 1,13% – თოვლის ჩამოზვავებით, 1,379 % – მყინვარებით, 0,37% – მიწის ჩამოშვავებით, 0,38 % – ბუნებრივი და ხელოვნური წყალსაცავების გარღვევით.

განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ბუნებრივი სტიქიების ზემოქმედების შესაძლებლობები მთიან ზონებში განლაგებულ წყალსატევებში. აქ არ შეიძლება არ აღინიშნოს ღვარცოფების როლი წყალსატევებით წყლის რესურსების ინტეგრირებული მართვაში.

წყალსატევების ნორმალური ფუნქციონირება კვების წყაროს ჩამონადენის საანგარიშო რეჟიმთანაა უშუალოდ დაკავშირებული და მისი დადგენის დროს ფართოდ იყენებენ სტატისტიკურ მეთოდებს, როგორც ჰიდროლოგიური გაანგარიშების განმსაზღვრელ გენეტიკურ საშუალებას. თავისთავად მისი სიზუსტე ჰიდრომეტრული დაკვირვების სტატისტიკაზეა დამოკიდებული.

წყალსატევებში სასარგებლო მოცულობა ფუნქციას კარგავს იმ შემთხვევაში, როცა მასში ნატანით დატვირთული ან ჰიპერკონცენტრირებული ნაკადების შემოდინება ხდება. აღნიშნულის შედეგად კიდევ უფრო რთულდება წყლის რესურსების მართვის შესაძლებლობები. ამ მიზნით წარმოდგენილია მდინარე მტკვრის აუზში მიმდინარე პროცესების გავლენის შეფასება წყალსატევების სასარგებლო მოცულობაზე [83, 84, 85, 86, 87, 88, 89].

წყალსატევების ექსპლუატაციიდან გამომდინარე, მათი რეგულირება ძალზე რთულდება იმ შემთხვევაში, როცა მასში ნატანის დალექვის სიდიდე პირველადი მოცულობის (40–50) %-ს აღწევს. რაც ნორმალური ფუნქციონირების მიზნით მკვდარი მოცულობის, წყლის მიღების საკომანდო ნიშნულების და საპროექტო ღირებულებების გაზრდის აუცილებლობას საჭიროებს.

წყალსატევების მშენებლობის ეფექტურობის განმსაზღვრელ მნიშვნელოვან ფაქტორთა შორის, რომლებიც სხვადასხვა გეოგრაფიული და ეროზიული პროცესების შერწყმის შედეგადაა განპირობებული, უმნიშვნელოვანესი ადგილი ღვარცოფებს უჭირავს. იგი პერიოდულად ცვლადი მოვლენაა, განსაკუთრებულ როლს ასრულებს წყალშემკრებ აუზში განლაგებული წყალსატევების ეფექტურობასა და მისი სასარგებლო მოცულობის დინამიკის პროგნოზირებაში. ღვარცოფების მოსალოდნელი ზემოქმედება მხედველობაში მისაღები განსაკუთრებული ფაქტორია წყალშემკრები აუზის ადგილებში, სადაც წყალსატევების მოწყობაა გათვალისწინებული, რადგან სასარგებლო წყლის მოცულობის მყარი ჩამონატანით შემცირების პროცესის მოსალოდნელი ეკონომიკური ეფექტურობა და სიტუაციის შეფასების ზუსტი პროგნოზი შეუძლებელია მიზეზ-შედეგობრივი ფაქტორების ფუნდამენტური შესწავლის გარეშე. წყალსატევების ფუნქციონირების ხანგრძლივობა მნიშვნელოვანწილად აუზში მიმდინარე პროცესებსა და იმ მოსალოდნელი ანომალიებით გამოწვეულ შედეგებთანაა დაკავშირებული, რომლებმაც ძალზე მოკლე დროში შეიძლება გამოიწვიოს ობიექტის საერთოდ მწყობრიდან გამოსვლა.

განსაკუთრებით საყურადღებოა მკვებავი წყაროების ღვარცოფულობა, რამაც შეიძლება ძალზე მოკლე დროში გამოიწვიოს ობიექტის ეფექტურობის ნულოვან დონეზე დაყვანა და ფუნქციონირების შეწყვეტა. წყალშემკრებ აუზში არსებული სადინარების წყალსატევებზე ზემოქმედება, თხევადი და მყარი ხარჯების მასში მოხვედრის შესაძლებლობა ერთ-ერთ აქტუალურ საკითხად რჩება.

როცა მთიან ზონებში წყალსაცავები ღვარცოფთა ზემოქმედების ზონაშია განთავსებული, მათი გაანგარიშების დროს მხედველობაში უნდა იქნეს მიღებული ღვარცოფსაშიშროების რისკები.

ზედაპირული ჩამონადენი წყალსაცავებში თვითფორმირებადი სადინარებით ხვდება, რომლის სიდიდე, ერთი მხრივ, წყალშემკრები აუზის ფართობზე, ხოლო, მეორე მხრივ, კლიმატური ფაქტორების ცვლილებაზეა

დამოკიდებული. აქედან გამომდინარე, ნალექების ინტენსივობა, ხანგრძლივობა და მწარმოებლობა ზედაპირული ჩამონადენის ძირითად განმსაზღვრელ ფაქტორად შეიძლება იყოს მიღებული [87].

წყალსატევის საანგარიშო მოცულობის კვების წყაროთი შევსების ცვლილების დინამიკა შემოდინებული ნაკადის როგორც მატრანსპორტირებელ შესაძლებლობებზე, ისე წყალშემკრები აუზის ღვარცოფულობასთანაა უშუალოდ დაკავშირებული.

ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე, იცვლება წყალსატევის სასარგებლო მოცულობა, რაც თავისთავად ინტეგრირებული მართვის შეუფერხებლად განხორციელებისათვის დამატებითი ღონისძიებების გატარებასთანაა დაკავშირებული. ამასთან ერთად, სასარგებლო მოცულობის მოსალოდნელი ცვლილების დროს გასათვალისწინებელია წყალსატევი წარმოქმნილი ტალღის ზემოქმედების შედეგად ნაპირების ნგრევის და მასში მყარი მასის მოხვედრის შესაძლებლობები [80].

წყალსატევი კვების წყაროს თხიერი ხარჯი მრავალ ფაქტორთან არის დაკავშირებული. განსაკუთრებული ადგილი ატმოსფერულ ნალექებს უჭირავს და მას განმსაზღვრელი ფუნქცია გააჩნია ღვარცოფული მოვლენების ფორმირებაში. აღნიშნულით კიდევ უფრო რთულდება წყალსატევის გამოყენების შესაძლებლობა წყლის რესურსების ინტეგრალურ მართვაში.

ზედაპირულ ჩამონადენზე ატმოსფერული ნალექების გავლენა მის საანგარიშო ინტენსივობაზე, მწარმოებლობასა და წვიმის ძალაზეა დაკავშირებული [87].

ჩვენს შემთხვევაში საკვლევ ობიექტად არჩეულია მდინარე მტკვრის აუზი, რომლის ტერიტორიაზე განლაგებულ წყალსატევი განსაკუთრებული როლი გააჩნია წყლის რესურსების ინტეგრირებულ მართვაში. აქედან გამომდინარე, მკვებავი წყაროების წყალსატევიებზე ზემოქმედების შესწავლის თვალსაზრისით აღებულია შენაკადთა

ჩამონადენზე მოქმედი ფაქტორების გავლენა როგორც მყარი, ისე თხევადი ჩამონადენის შემთხვევაში.

აქვე მოცემულია ნალექების უზრუნველყოფის კავშირი ინტენსივობასთან, კერძოდ, მდინარე მტკვრის შენაკადთა აუზისთვის ნალექების უზრუნველყოფის კავშირი ინტენსივობასთან ალაზნის მეტეოსადგურის მონაცემების მიხედვით მოცემულია ცხრილი 4.-ის სახით.

ცხრილი 4.

ნალექების უზრუნველყოფის კავშირი ინტენსივობასთან

უზრუნველყოფა <i>P</i> %	0,5	1,5	5	25	50	75	95
ნალექები <i>H</i> (მმ)	144	131	106	76	60	47	34

ცხრილში მოცემული მონაცემების საფუძველზე მდინარე მტკვრის წყალშემკრები აუზის მთელ ფართობზე თავსხმა წვიმების ინტენსივობის დროში ცვლილების მოდელი ზოგადი სახით წარმოდგენილია დამოკიდებულებით:

$$ti^{3/2} + bi = c \quad , \quad (4.1.1)$$

სადაც *t* – თავსხმა წვიმების ხანგრძლივობა (წთ);

i – თავსხმა წვიმების ინტენსივობა (მმ/წთ).

წარმოდგენილ მოდელში კავკასიის რეგიონისათვის კოეფიციენტების მნიშვნელობები *b*=16.5 და *c*=25.5. ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე, თავსხმა წვიმების ხანგრძლივობის ინტენსივობასთან კავშირის მოდელი შეიძლება წარმოდგენილი იქნეს ფორმულით:

$$t = \frac{25,5 - 16,5i}{i^{3/2}} \quad . \quad (4.1.2)$$

ჩამონადენის ფორმირებაში არანაკლებ მნიშვნელოვან ფაქტორს წარმოადგენს მოსული ნალექების ხანგრძლივობა, რომლის ცვლილების დინამიკა ცხრილი 5.-ის სახითაა მოცემული.

ცხრილი 5.

ნალექების ინტენსივობის, ხანგრძლივობისა და უზრუნველყოფის ცვლილების ხასიათი მდინარე მტკვრის წყალშემკრებ აუზში

უზრუნველყოფა <i>P</i> %	0,5	1,0	25	50	75	95
ნალექების ინტენსივობა <i>H</i> (მმ/წმ)	0,1	0,119	0,211	1,2	1,6	3,5
ხანგრძლივობა ნალექების <i>t</i> (წთ)	1440	1150	500	5,0	30	10

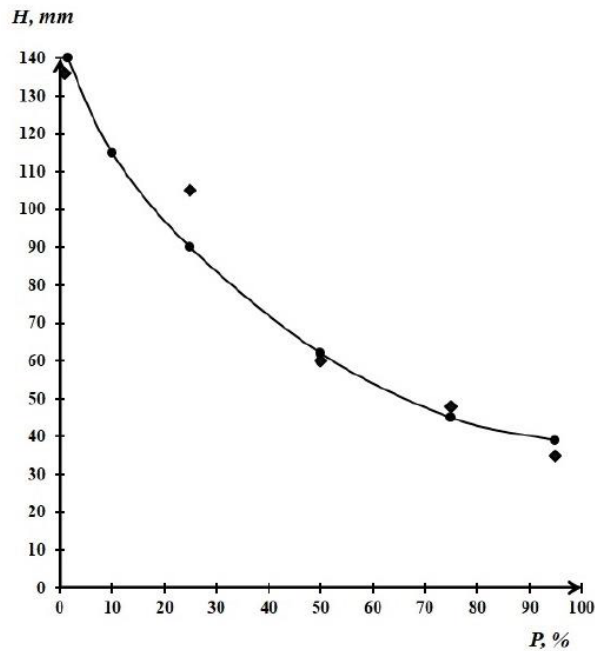
საერთოდ მცირე მდინარეთა ჩამონადენის პოტენციალს წყლის რესურსების ინტეგრირებულ მართვაში მნიშვნელოვანი როლი გააჩნია. მათი ზემოქმედება წყალსატევებზე განსაკუთრებით ისეთ შემთხვევაშია მნიშვნელოვანი, როცა წყალშემკრები აუზის თხევადი ჩამონადენის ფორმირება წვიმის ინტენსივობითაა გამოწვეული. მოსული ნალექი ხშირად ღვარცოფების ჩამოყალიბების ფაქტორს წარმოადგენს და იგი სასრგებლო მოცულობის გაზრდის შესაძლებლობის ერთ-ერთი განმსაზღვრელი მახასიათებელია. თვალსაჩინოების მიზნით მოსული ნალექების რაოდენობის კავშირის დინამიკა უზრუნველყოფასთან მდ. მტკვრის აუზისთვის, კერძოდ, მდ. დურუჯისათვის 6. ცხრილის სახით არის მოცემული.

ცხრილი 6.

მოსული ნალექების სიდიდის კავშირი უზრუნველყოფასთან

უზრუნველყოფა <i>P</i> %	0,5	1,0	25	50	75	95
ნალექები <i>H</i> (მმ)	144	136	105	60	48	35

მდინარე დურუჯის წყალშემკრები აუზისთვის მე-6. ცხრილში მოცემული ნალექებსა და უზრუნველყოფას შორის კავშირის დამოკიდებულება მე-12 ნახაზზეა მოცემული.



ნახ. 12. მდინარე დურუჯის წყალშემკრებ აუზში ნალექების დამოკიდებულების გრაფიკი უზრუნველყოფასთან 1. ⊗ ექსპერიმენტული წერტილები; 2. თეორიული მრუდი.

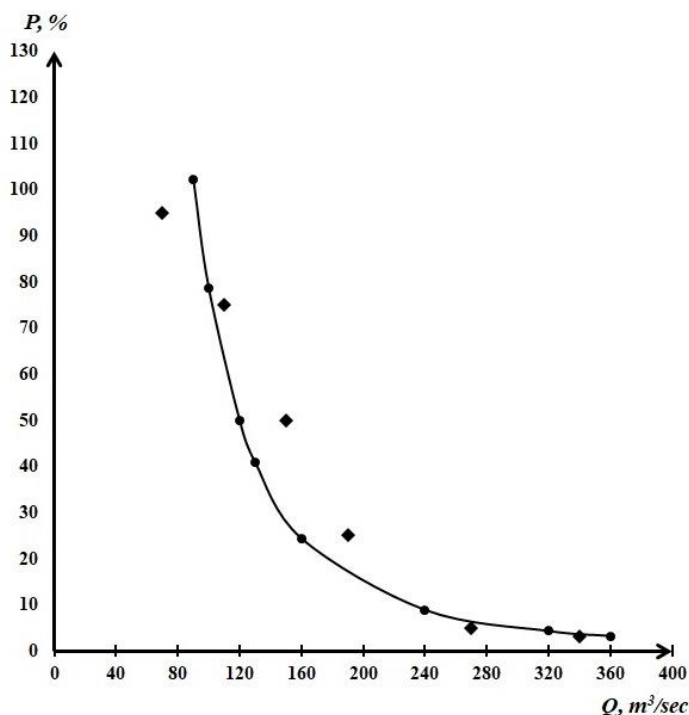
გრაფიკული დამოკიდებულებიდან გამომდინარე, ნალექების ინტენსივობის უზრუნველყოფასთან კავშირის მათემატიკური მოდელი

$$P = \frac{a}{H^b} \quad (4.1.3)$$

(4.1.3.) დამოკიდებულების აპროქსიმაცია 4.1.1 ნახაზზე მოცემულ გრაფიკთან და a და b კოეფიციენტების მნიშვნელობების განსაზღვრით კავშირი უზრუნველყოფასა და მოსულ ნალექებს შორის

$$P = \left(\frac{169,8}{H} \right)^{3,33} . \quad (4.1.4)$$

ყვარლის რაიონის ჰიდროლოგიური სადგურის მონაცემების საფუძველზე მდინარე დურუჯის წყლის ხარჯსა და უზრუნველყოფას შორის კავშირი გრაფიკული სახით მოცემულია ნახ. 13–ზე.



ნახ. 13. $P = f(Q)$ დამოკიდებულების გრაფიკი 1. ⊗ ექსპერიმენტული წერტილები; 2. თეორიული წერტილები

ნახ. 13.-ზე მოცემული გრაფიკული დამოკიდებულების საფუძველზე უზრუნველყოფის თხიერ ხარჯთან დამოკიდებულების კავშირი:

$$P = \frac{751,62 \cdot 10^4}{Q^{2,49}} \quad (4.1.5)$$

(4.1.4.) და (4.1.5.) განტოლებით კავშირი თხიერ ხარჯსა და ნალექების რაოდენობას შორის მოცემულია ფორმულით [88]:

$$Q = 0,602H^{1,34} \quad (4.1.6)$$

მიღებული შედეგების უტყუარობის მიზნით სხვადასხვა უზრუნველყოფისათვის ცხრილ 4.1.4-ში მოყვანილია ფორმულა (4.1.6)-ით გაანგარიშებული ხარჯისა და რეალურად ბუნებაში ფიქსირებული ხარჯის სიდიდეებს შორის შედარება და მათ შორის მაქსიმალური გადახრა არ აღემატება 4 %-ს.

ცხრილი 7.

უზრუნველყოფის სხვადასხვა სიდიდის შემთხვევაში ფორმულა (4.1.6)-ით გაანგარიშებული შედეგების შედარება რეალურად არსებულ სიდიდეებთან

უზრუნველყოფა, %	1	5	25	50	75	95
ფორმულა (4.1.6.)-ით მიღებული ხარჯის მნიშვნელობები, მ ³ /წმ	435,04	311,5	205,0	145,0	104,0	67,88
რეალურად არსებული ხარჯის სიდიდე, მ ³ /წმ	339	270	187	143	107	72

წყალსატევების სასარგებლო მოცულობის ცვლილებაზე განსაკუთრებულ გავლენას ახდენს ჰიპერკონცენტრირებული ნაკადების მასში შემოდინება, რომლის ფორმირებაში ზემოთ მოყვანილ მაჩვენებლებს – საანგარიშო მახასიათებლებს – განსაკუთრებული როლი გააჩნია. მნიშვნელოვანია ნალექების გავლენა ტურბულენტური და ჰიპერკონცენტრირებული ნაკადების ხარჯის განსაზღვრის დროს.

მდ. მტკვრის აუზისათვის მოსული ნალექების და სხვა გეოგრაფიული ფაქტორების ზედაპირულ ჩამონადენზე გავლენის შესწავლისა და მახასიათებელი პარამეტრების განსაზღვრის მიზნით შემოთავაზებულია მეთოდოლოგია. ზედაპირული ჩამონადენის განმსაზღვრელ ფაქტორად გათვალისწინებული იქნა ჩამონადენის კოეფიციენტი, წყალშემკრები აუზის ფართობი, ნალექის წყალშემკრები აუზის ფართობზე გადანაწილების არათანაბრობის კოეფიციენტი, წყალშემკრები აუზის ფორმა, ნალექის ხანგრძლივობა და ნალექის სიუხვე.

სტატისტიკური მასალის დამუშავების საფუძველზე კავკასიის რეგიონისათვის, კერძოდ, მდ. მტკვრის აუზისათვის გამოყვანილია საანგარიშო დამოკიდებულება:

$$Q = 8,52H \left(\frac{\alpha\beta\delta F}{T} \right)^{0,59}, \text{ მ}^3/\text{წმ} \quad (4.1.7)$$

სადაც α ჩამონადენის კოეფიციენტი;

β – წყალშემკრები ფართობის მიხედვით თავსხმა წვიმების უთანაბრობის კოეფიციენტი;

δ – წყალშემკრები აუზის ფორმის კოეფიციენტი;

F – წყალშემკრები აუზის ფართობი (კმ²);

T – თავსხმა წვიმის საანგარიშო ხანგრძლივობის პერიოდი (წთ);

H – ნალექების საანგარიშო რაოდენობა (მმ).

(4.1.7.) ფორმულით გაანგარიშებული შედეგების შედარება განხორციელდა სხვადასხვა მდინარეთა აუზებიდან ჩამოდინებული ხარჯის მნიშვნელობაზე, რომელიც გ. დ. როსტომოვის ფორმულით არის გაანგარიშებული. მიღებული შედეგები მოცემულია მე-8 ცხრილის სახით.

ცხრილი 8.

სხვადასხვა მდინარეთა წყალშემკრებ აუზებში ზედაპირული ჩამონადენის ფორმულით გაანგარიშებული სიდიდეები გ.
დ. როსტომოვის შემოთავაზებულ საანგარიშო ფორმულით მიღებულ შედეგებთან

1	2	3	4	5	6	7	8	9	ნიადაგის კატეგორია						16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	მაქსიმალური საანგარიშო ხარჯი, მ ³ /წმ	
									10	11	12	13	14	15														29	30
1	მდ. გუბაზეული	100	337	40	0,03	41	220	71						7	8	13	0,34	0,34	650	0,56	39	28	140	0,49	0,47	1	825	831	
	მდ. გუბაზეული ს. ხიდისთავი	100	337	40	0,03	41	220	71	-	-	-	-	+	-	7	8	13	0,34	-0,6	650	0,56	00	5	140	0,49	5	13	825	831

3	მდ. ტალაჩაი ზაქათალა	100	136	19	0,09	42	86	87				+			7	7	12		-	650	0,46	26	18	122	0,67	0,40	1	334	354,5
4	მდ. ტალაჩაი ზაქათალა ახალი მონასტერი	100	136	19	0,09	42	86	87				+			7	7	12		-	65	0,46	24	15	117	0,74	0,38	1	346	263,4
5	მდ. ნალჩაკი სოფ. თეთრი მდინარე	100	140	25	0,05	33	60	55				+			6	5	8		-	823	0,46	30	22	112	0,49	0,45	1	266	248

განსაკუთრებულია ღვარცოფთა ხარჯის განსაზღვრის მეთოდოლოგია, იგი ძალზე რთულია და დღემდე ძნელად გადასაწყვეტ ამოცანათა კატეგორიას განეკუთვნება. სტატისტიკიდან გამომდინარე, ასეთი ნაკადების ჩამოყალიბებაში გარე მოქმედი ფაქტორებიდან უპირატესი ადგილი წვიმის ნალექებს ეკუთვნით, რომლებსაც განსაზღვრულ პირობებში შეუძლია გამოიწვიოს ღვარცოფული მასის მოძრაობაში მოყვანა. წარმოდგენილი პროცესით ღვარცოფი მაშინ ფორმირდება, როცა ნალექით ხდება მისი ტანის არასაკმარისი წყლის მოცულობის შევსება. ასეთი გზით ფორმირებული ღვარცოფის მოცულობა 3–4-ჯერ აღემატება მოსული ატმოსფერული ნალექების მოცულობას.

თეორიული გზით მიღებულია, რომ თავსხმა წვიმით გამოწვეული ხარჯის საანგარიშო დამოკიდებულებას ნატანდატვირთული ნაკადის შემთხვევაში აქვს სახე [2]:

$$Q_{\delta} = Q_{\gamma_{\delta}} \left(1 + \frac{\gamma_{\delta} - \gamma_{\gamma_{\delta}}}{\gamma_{\gamma_{\delta}}} \right), \quad (\text{მ}^3/\text{წმ}) \quad (4.1.8)$$

სადაც γ_{δ} – ტურბულენტური ღვარცოფის მოცულობითი წონა ($\gamma_{\delta} = 13000 \text{ ნ/მ}^3$);

$\gamma_{\gamma_{\delta}}$ – წყლის მოცულობითი წონა ($\gamma_{\gamma_{\delta}} = 10000 \text{ ნ/მ}^3$);

$\gamma_{\gamma_{\delta}}$ – შემადგენელი მყარი ნაწილის მოცულობითი წონა ($\gamma_{\gamma_{\delta}} = 26500 \text{ ნ/მ}^3$);

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

Q_{γ} – ატმოსფერული ნალექებით გამოწვეული წყლის ხარჯი ($\text{მ}^3/\text{წმ}$).

(4.1.8.) ფორმულის (4.1.7.)-ში გათვალისწინებით, ტურბულენტური ღვარცოფის ხარჯის საანგარიშო ფორმულას ექნება სახე [88]:

$$Q_{\delta} = 8,52H \left(\frac{\alpha\beta\delta F}{T} \right)^{0,59} \left(1 + \frac{\gamma_{\delta} + \gamma_{\gamma_{\delta}}}{\gamma_{\gamma_{\delta}}} \right). \quad (4.1.9)$$

(4.1.9). ფორმულის გარდაქმნისა და გამარტივების საფუძველზე:

$$Q_{\phi} = 9,48 \left(\frac{\gamma\beta\delta F}{T} \right)^{0,59} H \text{ (მ}^3/\text{წმ)}. \quad (4.1.10)$$

ზემოთ მოყვანილი შემთხვევების გარდა განსაკუთრებით საყურადღებოა მასში ჰიპერკონცენტრირებული ღვარცოფის შედინება, რომლის ხარჯი 3–4 – ჯერ ჭარბობს ტურბულენტური ღვარცოფის ხარჯს. ასეთი ღვარცოფების შემადგენელი კომპონენტების ცვლილების დიაპაზონი მე–9 ცხრილის სახით არის მოცემული.

ცხრილი 9.
ღვარცოფის მასაში წყლისა და შემადგენელი კომპონენტების შეცულობის სიდიდეები

#	ღვარცოფის შემადგენელი კომპონენტები	წონის მიხედვით, %		მოცულობის მიხედვით, %	
		აქედან	აქამდე	აქედან	აქამდე
1	2	3	4	5	6
1	მყარი მასა, %	80	90	60,2	77,4
2	წყლის შეცულობა, %	20	10	39,8	26,6
სულ:		100	100	100	100
მათ შორის					
1	ქვები ზომით $d > 30$ მმ, %	30	40	22,5	34,4
2	ქვიშა ($1 \div 30$) მმ, %	20	30	25	25,8
3	წვრილი ჩანართი ($0,001 \div 1$) მმ, %	26,7	16,5	20,0	14,2
4	კოლოიდური ნაწილი, %	3,3	3,5	2,5	3,0
5	წყალი, %	20	10	38,9	22,6
სულ: %		100	100	100	100

განტოლება (4.1.9)–ის საფუძველზე ბმული ღვარცოფის ხარჯი, როცა წყლის ხარჯი Q_{ϕ} –ის ტოლია:

$$Q_{\phi} = \frac{Q_{\text{ღვ.}}}{B(1 - h_0 / H_{\text{გ.}})(1 + 0,49 h_0 / H_{\text{გ.}})} \quad (4.1.11)$$

(4.1.11.)–ის გატოლებით (4.1.7.)–თან ღვარცოფული ხარჯის საანგარიშოდ გვექნება [88]:

$$Q_{\text{გ.}} = 8,52 HB \left(\frac{\alpha\beta\delta F}{T} \right)^{0,52} \left(1 - \frac{h_0}{H_{\text{გ.}}} \right)^2 \left(1 + 0,49 \frac{h_0}{H_{\text{გ.}}} \right) \quad (4.1.12)$$

(4.1.11) ფორმულით მიღებული შედეგები შედარებულ იქნა ბუნებაში ფიქსირებულ მონაცემებთან და პროცენტული განსხვავება არ აღემატება ნორმატივებით განსხვავებულ სიდიდეებს.

როგორც მიღებული საანგარიშო დამოკიდებულებებით იკვეთება მდ. დურუჯის წყალშემკრები აუზისათვის ღვარცოფთა მოსალოდნელი ხარჯი როგორც ბმული ჰიპერკონცენტრირებული ნაკადებისათვის, ისე ტურბულენტური ღვარცოფის დროს რეოლოგიურ მახასიათებლებთან ერთად მეტეო ფაქტორების ფუნქციას წარმოადგენს.

4.2 ბმული ღვარცოფის ზემოქმედება სარეგულაციო ბარაჟებზე

მოსალოდნელი რისკების დროს გარემოზე ღვარცოფის ზემოქმედებით დადასტურებულია, რომ სადინარში ნაკადის მდგრადობის დაკარგვასთან ერთად იცვლება მისი ჰიდრაულიკური რეჟიმი. დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით წარმოიქმნება შეშფოთებული ზონა და ტალღა.

ბუნებრივად ან ხელოვნურად შექმნილ წინააღმდეგობებზე ბმული ღვარცოფის ზემოქმედებით მოძრაობის რეჟიმის ცვლილება მნიშვნელოვნადაა განსხვავებული ანალოგიური ჰიდრაულიკური პარამეტრების მქონე ნატანით დატვირთული და წყლის ნაკადებისაგან.

დიდი დამანგრეველი ძალის გამო აუცილებელია ასეთი ნაკადების მოძრაობის წყნარ რეჟიმში გადაყვანა, რაც კალაპოტების დეფორმაციების საწინააღმდეგო საკმაოდ მნიშვნელოვანი უბნების გასამაგრებელი ღონისძიებების ჩატარებასთანაა დაკავშირებული. აქედან გამომდინარე, საკმაოდ ხშირად ნაკადის ძრაობის წყნარ რეჟიმში გადაყვანას ხელოვნურად შექმნილი წინააღმდეგობებით, კერძოდ, ბარაჟების მშენებლობით ახერხებენ. აღნიშნული ღონისძიების გატარების შემდეგ წარმოიქმნება ნახტომი ან ტალღა, სადაც დიდი რაოდენობით ენერგია იკარგება. ეს პროცესი ნაკადის ჭარბი ენერგიის ჩაქრობისაკენაა მიმართული. აქედან გამომდინარე, ამოცანა

საინტერესოა იმ თვალსაზრისით, რათა განსაზღვრული იქნეს ის საანგარიშო პარამეტრები, რომელთაც განსაკუთრებული როლი გააჩნიათ ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების გეგმაში სწორად განლაგების დროს [90, 91].

საერთოდ ასეთი ნაკადების ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებზე ზემოქმედების შეფასების დროს განმსაზღვრელ კრიტერიუმს საშუალო სიჩქარე წარმოადგენს და სავსებით უგულებელყოფილია მოძრაობის რეჟიმის ცვლილების შედეგად მდგრადობის დაკარგვის შესაძლო რისკები.

ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე, ღვარცოფთა შორის ბმული ღვარცოფები მნიშვნელოვანი ტრანსპორტუნაირიანობით ხასიათდება. შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების შემთხვევაში განსაკუთრებით საინტერესოა სადინარის ზედა და ქვედა ბიეფში როგორი ფორმა უნდა მიიღოს გამაწონასწორებელმა ქანობმა. როცა გამაწონასწორებელი ქანობი აღმოჩნდება მოძრავი ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ქანობზე, ნაკადი გადადინდება ნაგებობაზე და პირიქით.

ზემოთ აღნიშნული მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების გეგმაში განლაგების ამოცანების გადაწყვეტის დროს.

ღვარცოფთა მოსალოდნელი რისკები და სხვადასხვა სახის ობიექტზე ზემოქმედების თავისებურება მათი ჩამოყალიბების გაჩერების შესაძლებლობების განმსაზღვრელ მახასიათებლებთანაა დაკავშირებული [94, 95, 96].

იმის მიხედვით, თუ რა მიზანს ემსახურება ღვარცოფებისაგან დაცვა, განსაკუთრებულ ადგილს საკითხის გადაწყვეტის დროს წარმოადგენს ამოცანები: დინამიკურ დატვირთვაზე მომუშავე ნაგებობებით ნაკადში წარმოქმნილი შემფოთებული ზონის გავრცელების სიდიდის დადგენა და ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის გამაწონასწორებელი ქანობის განსაზღვრა.

რადგან ყოველი კონკრეტული საკითხი ასეთ შემთხვევაში ღვარცოფთა სახეზეა დამოკიდებული, მათი ენერჯის ჩაქრობის დროს განსაკუთრებული ადგილი ნაგებობათა სახესთანაა დაკავშირებული.

პირდაპირი ან უკუტალღის წარმოქმნის შედეგად ნაკადის თავისუფალი ზედაპირი იღებს მახასიათებელ ფორმას და იგი გამაწონასწორებელი ქანობის სახელწოდებითაა ცნობილი, ე. ი. ნაგებობის ნაკადზე ზემოქმედების შედეგად ნაკადის მდგრადობა იკარგება და ტალღა წარმოქმნება.

სწორკუთხა კვეთის მქონე ღვარცოფსადინარში ნაკადზე შემხვედრი წინააღმდეგობის შედეგად წარმოქმნილი ტალღის ძალის იმპულსი მოძრაობის რაოდენობის განტოლების საფუძველზე შეიძლება გამოვსახოთ შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$\Delta P = \frac{\rho Q V}{g} \cdot \frac{\alpha'(2\sqrt{a} + a)}{a + 2\sqrt{a} + 4} \quad (4.2.1)$$

ტალღის გარე ზონის მიმართ ძალის იმპულსი იქნება:

$$\Delta P = (\rho c V + \rho V^2) \omega \quad (4.2.2)$$

სადაც ΔP - მოქმედი ღვარცოფის ძალის იმპულსი (ნ);

ρ - ღვარცოფის სიმკვრივე $\left(\frac{\text{ნ}\cdot\text{წმ}^2}{\text{მ}^4}\right)$;

c - ტალღის გავრცელების სიჩქარე (მ/წმ);

V - ნაკადის მოძრაობის სიჩქარე (მ/წმ);

ω - ცოცხალი კვეთის ფართობი (მ²);

(4.2.1) და (4.2.2) განტოლების გატოლებით $\Delta\rho$ ძალით გამოწვეული ტალღის სიჩქარე მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$C = \alpha' V \frac{2\sqrt{a} + a}{2\sqrt{a} + a + 4} \quad (4.2.3)$$

ტალლის ფორმით მოძრავ ნაკადში, როცა უწყვეტი ტალღა უსწრებს დინამიკურს და ირღვევა თანაბარი ძრაობის რეჟიმი, ΔP ძალით გამოწვეული ტალლის ფრონტის V_c სიჩქარე იქნება:

$$V_c \geq C + V \quad (4.2.4)$$

თუ ტალლის C სიჩქარის მნიშვნელობას გავითვალისწინებთ (4.2.4)-ში, გვექნება:

$$V_c = \alpha' V \frac{4\sqrt{a} + 2a + 4}{2\sqrt{a} + a + 4} \quad (4.2.5)$$

ძრაობის რეჟიმის ცვლილება ნებისმიერ ნაკადში იწვევს ხარჯის, სიღრმის, სიჩქარის უწყვეტ ან საფეხურისებრ ცვლილებას. უკუტალლის გაჩერების შესაძლებლობებია იმ შემთხვევაში, როცა დაცული იქნება პირობა:

$$\alpha' V \frac{4\sqrt{a} + 2a + 4}{2\sqrt{a} + a + 4} = V + C, \quad (4.2.6)$$

ე.ი.

$$C = V \frac{(2\alpha' - 1)(a + 2\sqrt{a} + 2) - 2}{a + 2\sqrt{a} + 4}. \quad (4.2.7)$$

რადგან ღვარცოფის მოძრაობის სიჩქარე არის:

$$V = KC^* \sqrt{hi}, \quad (4.2.8)$$

ხოლო ბმული ღვარცოფის ტალლის გავრცელების სიჩქარე:

$$C = K\sqrt{gh}, \quad (4.2.9)$$

(4.2.8) და (4.2.9) დამოკიდებულებების გათვალისწინებით (4.2.7)-ში მივიღებთ:

$$C^* \frac{(2\alpha' - 1)(a + 2\sqrt{a} + 2) - 2}{a + 2\sqrt{a} + 4} = \sqrt{\frac{g}{i}}. \quad (4.2.10)$$

თუ (4.2.10)-ში შევიტან α' -ის მნიშვნელობას $\alpha' = 1,1$ -ს და $a = 1$ -ს, ე.ი. წყლის შემთხვევაში იგი ემთხვევა აკადემიკოს ო. ნათიშვილის მიღებულ შედეგს.

$$C^* = 2\sqrt{\frac{g}{i}}. \quad (4.2.11)$$

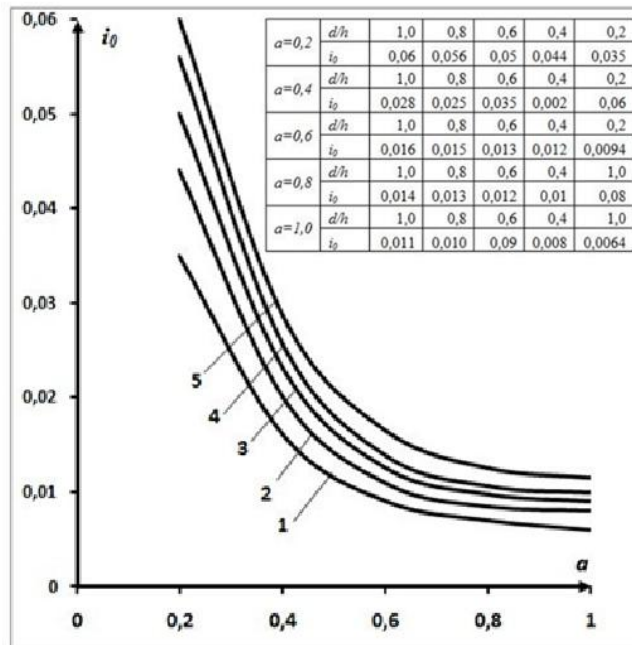
(4.2.11) განტოლებაში ღვარცოფის სიჩქარის კოეფიციენტის მნიშვნელობის გათვალისწინებით გვექნება:

$$i = 0,00286\sqrt[3]{\frac{d}{h}} \frac{(2\sqrt{a} + a + 4)^2}{a^{0,33}[(2\alpha' - 1)(2\sqrt{a} + a + 4)^2 - 2]^2} \quad (4.2.12)$$

თვალსაჩინოების მიზნით მოგვყავს გრაფიკული დამოკიდებულება:

$$i = f\left(a, \frac{d}{h}\right) \text{ ღვარცოფის რეოლოგიურ მახასიათებელთან კავშირში } \left(\frac{d}{h}\right) -$$

ის სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს (ნახ.14.).



1. $d/h=0,2$; 2. $d/h=0,4$; 3. $d/h=0,6$; 4. $d/h=0,8$; 5. $d/h=1,0$

ნახ.14. $i = f\left(a, \frac{d}{h}\right)$ დამოკიდებულების გრაფიკი

სიგრძეს თავდაპირველი მოძრაობის საწინააღმდეგო მიმართულებით აღვნიშნავთ L_1 -ით, მაშინ

$$L_1 = \frac{H}{I_1 \left(1 - \frac{i}{I_1}\right)} \quad (4.2.13)$$

სადაც I_1 საორიენტაციო ნაგებობიდან მოძრაობის საწინააღმდეგოდ გამაწონასწორებელი ქანობია;

H - ნაგებობის სიმაღლე (მ);

i - კალაპოტის ფუძესთან დახრის კუთხე.

თუ (4.2.13.)-ში გავითვალისწინებთ (4.2.12.)-ს, გვექნება:

$$L_1 = \frac{H}{I} \frac{3\sqrt{a}[(2\alpha' - 1)(2\sqrt{a} + a + 2) - 2]^2}{\sqrt[3]{a}I[(2\alpha' - 1)(2\sqrt{a} + a + 2) - 2]^2 - 0,002686\sqrt{\frac{d}{h}}(2\sqrt{a} + a + 2)^2} \quad (4.2.14)$$

როცა ნაკადის ნაგებობის ზღურბლზე გადადინება ხდება, მაშინ დინების მიმართულებით საორიენტაციო ნაგებობიდან სამშენებლო ნაგებობის განლაგების ადგილი იქნება:

$$L_2 = \frac{\sqrt[3]{a}[(2\alpha' - 1)(2\sqrt{a} + a + 2) - 2]^2}{0,002686\sqrt{\frac{d}{h}}(2\sqrt{a} + a + 2)^2 - \sqrt[3]{a}I[(2\alpha' - 1)(2\sqrt{a} + a + 2) - 2]^2} \quad (4.2.15)$$

როგორც მიღებული შედეგები ადასტურებს, ღვარცოფსადინარის ქანობის მუდმივობის დროს ერთი და იმავე რეოლოგიური მახასიათებლების სიდიდის მქონე ღვარცოფებისათვის (ქვის ჩანართის დიამეტრის ნაკადის სიღრმესთან ფარდობის შემცირების შემთხვევაში) გამაწონასწორებელი ქანობის სიდიდე მცირდება. აქედან გამომდინარე, იზრდება ნაგებობებს შორის მანძილი, ხოლო

რეოლოგიური მახასიათებლების სიდიდეთა ზრდის შემთხვევაში, როცა ქვის ჩანართს ღვარცოფის სიმაღლესთან ფარდობა არ იცვლება, ნაგებობებს შორის მანძილის ცვლილებას იგივე სურათი გააჩნია.

4.3 ღვარცოფსარეგულაციო დაცვის ეფექტურობა

ბუნებრივი კლიმატური პირობები, მაღალმთიანი რელიეფი, მთიანი რეგიონებიდან ჩამონადენი წყალი დიდწილად განსაზღვრავს ღვარცოფების წარმოქმნის შესაძლებლობას – ბუნების ერთ–ერთ მრისხანე გამოვლინებას. ღვარცოფის ნაკადი, რომელიც ჩამოყალიბებულია ღვარცოფის ფორმირების ცენტრში, ეფექტური სიჩქარით მდინარის კალაპოტს მოარღვევს, ანადგურებს ხიდებს და გზებს. ხეობიდან როცა გაივსება, ღვარცოფული ნაკადი მნიშვნელოვან ზიანს აყენებს სასოფლო–სამეურნეო სავარგულებს, საცხოვრებელ სახლებს, სხვა სოციალურ ინფრასტრუქტურას და წარმოადგენს სერიოზულ საფრთხეს მოსახლეობის სიცოცხლისა და ჯანმრთელობისთვის.

ამ პრობლემის გადასჭრელად ერთ–ერთი შესაძლო გზაა საინჟინრო კონსტრუქციის მშენებლობა, რომელიც იცავს ტერიტორიაზე მცხოვრებ მოსახლეობას ღვარცოფების რისკისგან, აგრეთვე ადამიანის შრომით შექმნილი ბუნებრივი და მატერიალური ფასეულობების უსაფრთხოებას. ამ თვალსაზრისით, განსაკუთრებულ ინტერესს იწვევს ისეთი ნაკლებად შესწავლილი საკითხი, როგორც არის ფულადი ნაკადის მენეჯმენტი, რომელიც მიმართულია ამ კაპიტალტევად სფეროში, მათ შორის – ეფექტურობის დაგეგმვის და ინვესტიციების უკუგების ჩათვლით [98,99,100].

ღვარცოფსაწინააღმდეგო ობიექტების მშენებლობაში ინვესტიციების ეფექტურობის გაანგარიშებისას მნიშვნელოვანია ღვარცოფის აღმკვეთი ღონისძიებების ეკონომიკური ეფექტიანობა. აღსანიშნავია, დამცავი ნაგებობების მშენებლობაში კაპიტალდაბანდებები მიმდინარე პერიოდში

ხორციელდება, ამასთან ერთად კი, ნაგებობის ექსპლუატაცია და, შესაბამისად, ექსპლუატაციის ხარჯები ხორციელდება ყოველწლიურად, ხოლო ღვარცოფის გავლა კონკრეტულ ადგილზე იმ წელიწადში შეიძლება არ მოხდეს. აქვე უნდა აღინიშნოს რომ, ღვარცოფისგან მიყენებული ზიანი იწვევს შრომითი, მატერიალური და ფინანსური რესურსების კარგვას, მათი ოდენობა კი ჯამდება აუნაზღაურებელი მატერიალური ზარალითა და ღვარცოფების შედეგების აღმოფხვრის ხარჯებით.

ღვარცოფის აღმოფხვრილი ზარალი საორიენტაციოდ შეიძლება განისაზღვროს საანგარიშო ფორმულით:

$$y = \sum_{i=1}^n y_i , \tag{4.3.1}$$

სადაც y_i – არის ზარალი i -ურ დარგში, ხოლო $y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, x_1, x_2, \dots, x_n – ღვარცოფის პარამეტრებია.

ღვარცოფის დამცავი სტრუქტურის მშენებლობისა და ექსპლუატაციის შედეგად წარმოქმნილ ფულად ნაკადებს აქვს შემდეგი სახე (ცხრილი 10.):

ცხრილი 10.

ფულადი ნაკადები, რომლებიც წარმოიქმნება ღვარცოფდამცავი ნაგებობის მშენებლობისა და ექსპლუატაციის შედეგად, ათას ლარობით

#	ფულადი ნაკადის დასახელება	წლები					
		1	2	3	...	t_{n-1}	t_n
1	კაპიტალური მშენებლობის ხარჯი	K					
2	წლიური საექსპლუატაციო ხარჯები	C1	C2	C3	...	C_{n-1}	C_n
3	აცილებული ზარალი						P

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, ღვარცოფდამცავი ნაგებობის წმინდა დაყვანილი ღირებულება შეიძლება გამოვთვალოთ ფორმულით:

$$NPV = \frac{P}{(1+\alpha)^n} - K - \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+\alpha)^i} \quad (4.3.2)$$

სადაც P – აღკვეთილი ზარალი მე- n წელს;

C_i – საექსპლუატაციო ხარჯი i -ურ წელს;

$(1+\alpha)^i$ – ფასდაკლების მამრავლი.

წმინდა დაყვანილი ეფექტის გაანგარიშებასთან ერთად, ჩვეულებრივ, ინგარიშება უკუგების შიდა განაკვეთი (IRR), რომელიც მეტწილად ავსებს ინვესტიციის ეფექტურობის გაანგარიშებას, გვევლინება საკმაოდ საიმედო ორიენტირა განსაზღვრავს და კაპიტალური მშენებლობის მიზანშეწონილობას [1, 3].

ზოგადად, ნებისმიერი საინვესტიციო პროექტისთვის IRR-ის გამოსათვლელ ფორმულას აქვს სახე:

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} \quad (4.3.3)$$

სადაც CF_t არის ფულადი შემოდინება პროექტიდან t დროის მომენტში;

n – დროითი პერიოდების რაოდენობა;

IRR – უკუგების შიდა განაკვეთი.

ღარცოფებს ათეულობით და ასეულობით ათასი, ზოგ შემთხვევაში კი მილიონობით კუბური მეტრი ქვა-ტალახი ჩამოაქვს დაბლობზე. ამასთანავე, ღვარცოფის აუზში დესტრუქციული პროცესების ინტენსივობა ძირითადად დამოკიდებულია მცენარეულობისა და ნიადაგის საფარის, კლიმატის, აუზის გეოლოგიური სტრუქტურისა და მისი ცალკეული მონაკვეთების ტექტონიკურ აქტივობაზე [2].

ბუნებრივი ინფრასტრუქტურის ფიზიკური განადგურება იწვევს მნიშვნელოვან სოციალურ-ეკონომიკურ ზიანს, რომლის ღირებულება ჩვეულებრივ მერყეობს 0,2–დან 2,0 მილიონ აშშ დოლარამდე და მეტი.

ღვარცოფის დესტრუქციული ზემოქმედებისგან თავის დასაცავად, სანიაღვრე აუზების ბუნებრივი ინფრასტრუქტურის სტაბილური მდგომარეობის შესანარჩუნებლად, შემოთავაზებულია საინჟინრო დამცავი ნაგებობების ვარიანტი, რომელიც წარმოადგენს ღვარცოფის საწინააღმდეგო ნახევრად კონუსურ კონსტრუქციას [90].

ნაკადის 10 მ სიგანისას სტრუქტურის სიმაღლე განისაზღვრა 5 მ-ით, ხოლო სიგრძე –26,5 მ. ნაგებობის მშენებლობისათვის მასალების ხარჯი: ჩამოწერილი სარკინიგზო რელსები – 500 მ, რკინაბეტონის სამუშაოების მოცულობა – 17,0 მ³, მიწის სამუშაოების მოცულობა – 14,13 მ³. იმ პირობებში, როდესაც გამჭოლობის კოეფიციენტი 0,56–ია, მიმდებარე ტერიტორიის ეფექტური დაცვისათვის საჭირო ნაგებობის რაოდენობაა 2. ამრიგად, 2019 წლის ფასებით ღვარცოფსაწინააღმდეგო ორი ნაგებობის აგების ხარჯები აღწევს 24,7 ათას აშშ დოლარს. ქმედით მდგომარეობაში ნაგებობების შენარჩუნება–შენახვისათვის საჭირო ექსპლუატაციური ხარჯები საორიენტაციოდ იქნება დაახლოებით 3.0 ათასი აშშ დოლარი წელიწადში.

წმინდა დაყვანილი ღირებულების (NPV), აგრეთვე, უკუგების შიდა განაკვეთის სიდიდე (IRR) ღვარცოფისაგან დამცავი ობიექტების მშენებლობაში ღვარცოფის გავლის სიხშირის მიხედვით მოცემულია ცხრილში 11.

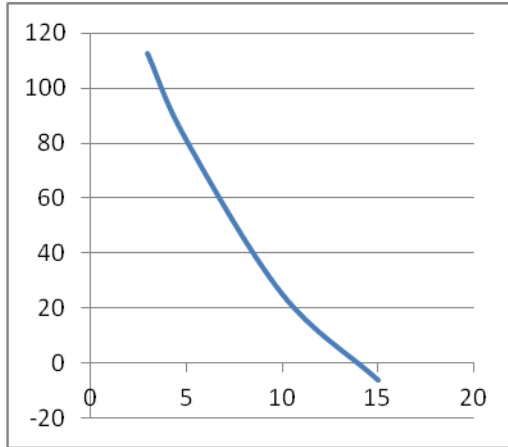
ცხრილი 11.

წმინდა დაყვანილი ღირებულების (NPV), აგრეთვე, უკუგების შიდა განაკვეთის სიდიდე (IRR) ღვარცოფისაგან დამცავი ობიექტების მშენებლობაში

ღვარცოფის გავლის სიხშირე, წლები	ზარალი 200,0 ათას აშშ დოლარამდე		ზარალი 1000,0 ათას აშშ დოლარამდე		ზარალი 2000,0 ათას აშშ დოლარამდე	
	წმინდა დაყვანილი ღირებულება	უკუგების შიდა განაკვეთი	წმინდა დაყვანილი ღირებულება	უკუგების შიდა განაკვეთი	წმინდა დაყვანილი ღირებულება	უკუგების შიდა განაკვეთი

	ბა (NPV), ათასი აშშ დოლარი	სიდიდე (IRR)%	ბა (NPV), ათასი აშშ დოლარი	სიდიდე (IRR)%	ბა (NPV), ათასი აშშ დოლარი	სიდიდე (IRR)%
3	112,8	135	680,85	431	1390	654
5	81,5	41	537,25	115	1107,2	157
10	25,13	7	281,13	30	601,1	41
15	-6,35		137,65	13	317,6	19
20			55,67	5	155,67	9

NPV და IRR-ის გამოთვლების შედეგები, მოცემული ცხრილ 11.-ში, სადაც მოსალოდნელი ზარალი ღვარცოფის დესტრუქციული ზემოქმედებისგან აღწევს 200.0 ათას აშშ დოლარამდე, გვიჩვენებს, რომ ღვარცოფდამცავი ნაგებობის მშენებლობისაგან ყველაზე დიდი ეფექტი აღინიშნება ნაკადის გავლისას სიხშირით სამ წელიწადში ერთხელ. ღვარცოფის გავლისას ეფექტურობა დამაკმაყოფილებელ დონეზეა სიხშირისას ხუთ წელიწადში ერთხელ, მაგრამ უკვე ათ წელიწადში ერთხელ, მიუხედავად იმისა, რომ წმინდა დაყვანილი ღირებულება 25,13 ათას აშშ დოლარია, ინვესტიციების უკუგების შიდა განაკვეთის მნიშვნელობა ხდება ნაკლები ამ საქმიანობაში ავანსირებული კაპიტალის ფასზე. ნახ.16.-ზე მოცემულია გრაფიკი კაპიტალდაბანდების ეკონომიკური ეფექტურობის ცვლილებისა ღვარცოფდამცავი სტრუქტურების მშენებლობაში, კონკრეტული რეგიონის ტერიტორიაზე გამავალი ღვარცოფების სიხშირეზე დამოკიდებულებით, როცა მოსალოდნელი ეკონომიკური ზიანი 200.0 ათას აშშ დოლარამდეა.



ნახ.16. ღვარცოფდამცავი სტრუქტურის მშენებლობაში კაპიტალდაბანდებების ეკონომიკური ცვლილება (y) კონკრეტული რეგიონის ტერიტორიაზე გამავალი ღვარცოფების სიხშირეზე (x) დამოკიდებულებით, როცა მოსალოდნელი ეკონომიკური ზიანი 200.0 ათას აშშ დოლარამდეა

ღვარცოფის ჩავლის სიხშირესა და ღვარცოფდამცავი სტრუქტურის მშენებლობაში კაპიტალდაბანდებების ეფექტურობას შორის ურთიერთკავშირის განტოლებას აქვს სახე:

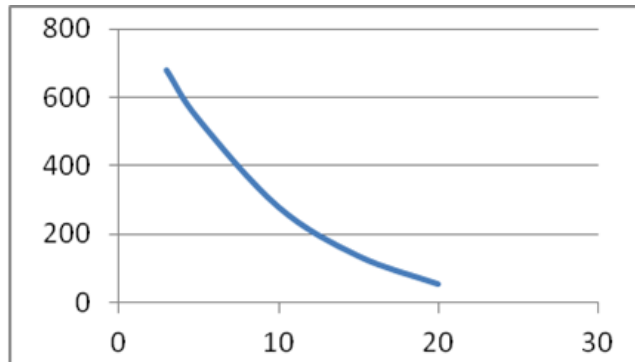
$$y_1 = \frac{436,5}{x^{1,24}} \quad (4.3.4)$$

სადაც y_1 არის წმინდა დაყვანილი ღირებულება (NPV) მოსალოდნელი ეკონომიკური ზარალით 200.0 ათას აშშ დოლარამდე;

x – ღვარცოფის ჩავლის სიხშირე.

ღვარცოფისაგან 1000.0 ათას აშშ დოლარამდე მოსალოდნელი ეკონომიკური ზარალისას უდიდესი ეფექტი ღვარცოფდამცავი ობიექტის მშენებლობისაგან მიიღება მაშინ, როდესაც ღვარცოფის ჩავლა სამ წელიწადში ერთხელ სიხშირით ხდება. ეფექტურობა დამაკმაყოფილებელ დონეზე იქნება ღვარცოფის ჩავლისას თხუთმეტ წელიწადში ერთხელ, მაგრამ ოც წელიწადში ერთხელ სიხშირისას უკუგების შიდა განაკვეთის სიდიდე ნაკლები ხდება ღვარცოფდამცავი სტრუქტურის მშენებლობაში ავანსირებული კაპიტალის

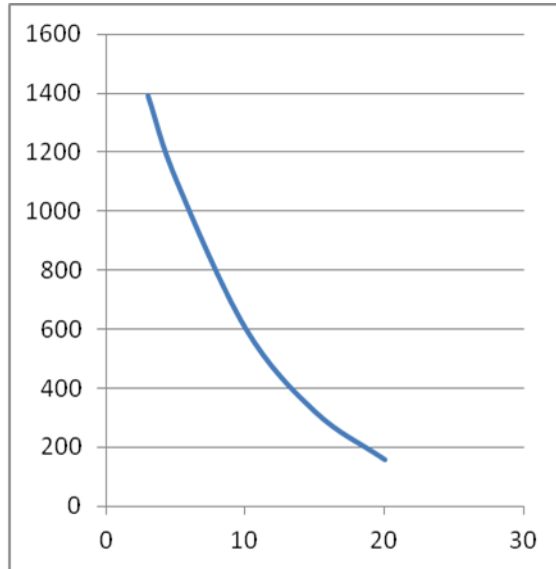
ღირებულებასთან. ნახ.4.3.2.–ზე მოცემულია გრაფიკი კაპიტალდაბანდების ეკონომიკური ეფექტურობის ცვლილებისა ღვარცოფდამცავი სტრუქტურების მშენებლობაში, კონკრეტული რეგიონის ტერიტორიაზე გამავალი ღვარცოფების სიხშირეზე დამოკიდებულებით, როცა მოსალოდნელი ეკონომიკური ზიანი 1000.0 ათას აშშ დოლარამდეა.



ნახ.17. ღვარცოფდამცავი სტრუქტურის მშენებლობაში კაპიტალდაბანდების ეკონომიკური ეფექტურობის ცვლილება (y) კონკრეტული რეგიონის ტერიტორიაზე გამავალი ღვარცოფების სიხშირეზე (x) დამოკიდებულებით, როცა მოსალოდნელი ეკონომიკური ზიანი 1000.0 ათას აშშ დოლარამდეა

მიახლოებით იგივე სურათი, რაც გვქონდა 1000.0 ათასი აშშ დოლარამდე მოსალოდნელი ეკონომიკური ზარალის შემთხვევაში, შეინიშნება 2000.0 ათასი აშშ დოლარის ზარალის დროსაც. ამავდროულად, ყველაზე მეტი ეფექტი ღვარცოფდამცავი ნაგებობის მშენებლობისაგან მიიღება ღვარცოფის ჩავლისას სამ წელიწადში ერთხელ. დამაკმაყოფილებელ დონეზე ეფექტურობა გვაქვს ღვარცოფის ჩავლისას თხუთმეტი წლის განმავლობაში ერთხელ, მაგრამ ოც წელიწადში ერთხელ სიხშირისას დამცავი სტრუქტურის მშენებლობა ხდება არაეფექტური, რადგან ინვესტიციის უკუგების შიდა განაკვეთი დაბალია, ვიდრე კაპიტალის ღირებულება, ავანსირებული დამცავი სტრუქტურების მშენებლობისათვის. ნახ.18–ზე მოცემულია გრაფიკი კაპიტალდაბანდების ეკონომიკური ეფექტურობის ცვლილებისა ღვარცოფდამცავი სტრუქტურების

მშენებლობაში, კონკრეტული რეგიონის ტერიტორიაზე გამავალი ღვარცოფების სიხშირეზე დამოკიდებულებით, როცა მოსალოდნელი ეკონომიკური ზიანი 2000.0 ათას აშშ დოლარამდეა.



ნახ.18. ღვარცოფდამცავი სტრუქტურის მშენებლობაში კაპიტალდაბანდებების ეკონომიკური ეფექტურობის ცვლილება (y) კონკრეტული რეგიონის ტერიტორიაზე გამავალი ღვარცოფების სიხშირეზე (x) დამოკიდებულებით, როცა მოსალოდნელი ეკონომიკური ზიანი 2000.0 ათას აშშ დოლარამდეა

ღვარცოფის ჩავლის სიხშირესა და ღვარცოფდამცავი სტრუქტურის მშენებლობაში კაპიტალდაბანდებების ეფექტურობას შორის ურთიერთკავშირის განტოლებას აქვს სახე:

$$y_3 = \frac{3767,0}{x^{0,92}} , \quad (4.3.6)$$

სადაც y_3 არის წმინდა დაყვანილი ღირებულება (NPV) სავარაუდო ეკონომიკური ზარალით 2000.0 ათას აშშ დოლარამდე;

x – ღვარცოფის ჩავლის სიხშირე.

ამრიგად, წმინდა დაყვანილი ღირებულების (NPV) დამოკიდებულება ღვარცოფის ჩავლის სიხშირეზე ჰიპერბოლური ხასიათისაა. ამასთან, NPV

სიდიდე თავის მაქსიმუმს აღწევს ღვარცოფის ყოველწლიური ჩავლის დროს. ღვარცოფის სიხშირის შემცირებით მკვეთრად მცირდება კაპიტალური ინვესტიციების ეფექტურობა დამცავ სტრუქტურაში. ამასთან დაკავშირებით, კაპიტალური ხარჯების განხორციელება საჭიროა მხოლოდ ღვარცოფწარმომშობი კერის პოტენციალის დეტალური შეფასების საფუძველზე, დამცავი ნაგებობები უნდა აშენდეს მოსალოდნელი ღვარცოფის ჩამოწოლის პროგნოზირებულ დრომდე უახლოეს ხანებში, სისტემატურად ჩატარდეს გამწმენდი სამუშაოები წყალგამტარის კალაპოტში.

დასკვნები

1. ღვარცოფთა სარეგულაციო საინჟინრო ამოცანების გადაწყვეტის მიზნით შერჩეულია ოპერატიული საშუალებები მათემატიკური მოდელების სახით, რომელთა საფუძველზე შედგენილია დიფერენციალური განტოლებები წინაღობის ქანობის სხვადასხვა ვარიანტების გათვალისწინებით. დიფერენციალური განტოლებები მიღებულია ღვარცოფის რეოლოგიაზე დაყრდნობით და უფრო ზუსტად აღწერს მოძრაობის მექანიზმს. იგი შესაძლებლობას იძლევა არაპრიზმატულ კალაპოტებში პროგნოზი გაუკეთდეს ენერგეტიკული მახასიათებლებს, სიჩქარესა და სიღრმეს ღვარცოფის როგორც მუდმივი, ისე ცვლადი ხარჯის დროს. შემოთავაზებული მათემატიკური მოდელით შესაძლებელია ღვარცოფის პროგნოზირება როგორც კრიტიკული, ისე თანაბარი მოძრაობის შემთხვევაში ძირითადი განმსაზღვრელი პარამეტრების დროს;

2. ღვარცოფის ენერგეტიკული მახასიათებლების შეფასება განხორციელებულია მექანიკისა და ჰიდრავლიკაში გამოყენებული მოდელების ჰიპერკონცენტრირებულ ნაკადებთან ადაპტაციის საფუძველზე, თეორიული მოდელით მიღებული შედეგები კარგად პასუხობს ნატურაში ფიქსირებულ შედეგებსა და მათ შორის საშუალო პროცენტული გადახრა ემთხვევა საინჟინრო პრაქტიკისათვის მისაღებ სიზუსტის ნორმებს;

3. ღვარცოფის შემხვედრ წინააღმდეგობებზე ზემოქმედების შედეგად იცვლება მასა, მოცულობის ნაზრდის ფარდობითი დეფორმაცია და სიკვრივე. მაგალითად, სიმკვრივის ცვლილებას რეოლოგიურ მახასიათებლებთან კავშირში გააჩნია ჰიპერბოლური სახე. ნაკადისა და ტალღის სიღრმის ფარდობითი სიდიდე რეოლოგიურ მახასიათებლებთან კავშირში ენერჯის კონკრეტულ მნიშვნელობამდე იზრდება, ხოლო ფარდობითი სიდიდის 1-ის ტოლობის შემთხვევაში ენერჯის სიდიდე 0-ის ტოლი ხდება. დადგენილ იქნა

ღვარცოფის მასის მდგრადობის რღვევის ზღვრული მნიშვნელობა და მოძრავ ნაკადში შეშფოთების სიგანის მთლიან სიგანესთან ფარდობა. წყალთან შედარებით ეს სიდიდე მცირდება და 0,33–ზე ნაკლებია. არაპრიზმატულ სადინარში მოძრავი ნაკადისათვის ღვარცოფის არათანაბარი ერთგანზომილებიანი დიფერენციალური განტოლების გამოყენების საფუძველზე სიჩქარის ცვლილების საანგარიშო დამოკიდებულება ღვარცოფის რეოლოგიასთან კავშირში ადასტურებს, რომ ღვარცოფის სიჩქარე გაცილებით მცირეა წყლის სიჩქარეზე და რეოლოგიური მახასიათებლების ფუნქციას წარმოადგენს.

4. წყალსატევების ნორმალური ფუნქციონირებისათვის განსაკუთრებული როლი გააჩნია მასში შედინებული ნაკადის სახეებს, რომლებიც მნიშვნელოვნად ცვლიან სასრებლო მოცულობის დონეს, აუზის შეცულობის შემადგენლობას. გამოყვანილია საანგარიშო დამოკიდებულებები ახალი მეთოდოლოგიის საფუძველზე, ასევე ტურბულენტური და ბმული ღვარცოფების შემთხვევაში. კერძოდ, მდ. დურუჯისათვის მიღებულია წყლის, ტურბულენტური და ბმული ღვარცოფის ხარჯის საანგარიშო დამოკიდებულებები და განსაზღვრულია მეტეოროლოგიური ფაქტორების როლი წყალსატევებზე ღვარცოფთა ზემოქმედების შესაძლებლობების შედეგებზე წყლის ინტეგრირებული მართვის დროს;

5. ღვარცოფსადინარში მოძრავი ბმული ნაკადისათვის დადგენილია მდგრადობის რღვევის განმსაზღვრელი პარამეტრების კრიტერიალური ზღვრები, გრაფიკული ილუსტრაციები რეოლოგიურ მახასიათებლებთან კავშირში და ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარაჟების გეგმაში განლაგება;

6. ღვარცოფული ნაკადებისგან მიყენებული ზარალის თავიდან აცილების შესაძლო ერთ–ერთ გზას საინჟინრო კონსტრუქციების მშენებლობა წარმოადგენს.

წმინდა დაყვანი ღირებულების (NPV) სიდიდე ღვარცოფის სიხშირეზეა დამოკიდებული და მას ჰიპერბოლური სახე გააჩნია. ღვარცოფის გავლის სიხშირის შემცირებით მკვეთრად მცირდება კაპიტალური ინვესტიციების ეფექტურობა დამცავ სტრუქტურაში და გამომდინარე აქედან, საჭიროა კაპიტალური ხარჯების განხორციელება მხოლოდ ღვარცოფწარმომშობი კერის პოტენციალის დეტალური შეფასების საფუძველზე, ხოლო დამცავი ღონისძიებები უნდა გატარდეს მოსალოდნელი ღვარცოფის გავლის პროგნოზირებულ დრომდე და აუცილებელია ღვარცოფსადინარების პერიოდული გამწმენდი სამუშაოების ჩატარება.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. М., 1955, т. 2, 323 с.;
2. Гагошидзе М.С. Селевые явления и борьба с ними. Издательство «Сабчота Сакартвело», Тбилиси, 1970, 387 с.;
3. Мостков М.А. Очерк теории руслового потока. Изд-во АН СССР, М., 1959, 246 с.;
4. Флейшман С.М. Сели. Гидрометеиздат, Л., 1970, 352 с.;
5. Херхеулидзе И.И. Эмпирические формулы для приближенного определения расчетных параметров структурных селевых потоков. Всесоюзная конференция по изучению селевых потоков и мер борьбы с ними. Баку, 1962, с. 178-185;
6. Хмаладзе Г.Н. Выносы наносов реками Черноморского побережья Кавказа, «Гидрометеиздат», 1978, с. 165-166;
7. 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;
8. Боголюбова И.В. Селевые потоки и их распространение на территориях СССР, Л., Гидрометеиздат, 1957, 162 с.;
9. Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Л. Гидрометеиздат, 1980, 144 с.;
10. Беручашвили Г.М. Метод определения максимальных расходов селевых потоков в момент их возникновения. В книге «Проблемы противоселевых мероприятий», Алма-Ата, 1979, с. 40-45;
11. Мирцхулава Ц. Е. Оценка риска повреждения противоселевых сооружений, Труды ВНИИ ГиМ, вып. 4, М., 1975, с. 48-62;
12. Войнич-Сяноженский Т.Г., Беручашвили Г.Н. К гидравлической теории потоков лавинного характера. Тр. ЗакНИИГиМ., вып. 37(43), 1970, с. 29-69;

13. Кереселидзе Н.Б. К проблеме устойчивости течения потока и его твердых границ в размываемых грунтах. Тбилиси, Мецниереба, Труды ТНИСГЭИ, вып.1, 1968, с. 38-45;
14. ო. ნათიშვილი, ვ. თევზაძე, ზ. დანელია. ღვარცოფისა და ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების ჰიდრავლიკა. თბილისი, 1995, 70 გვ.;
15. ნათიშვილი ო. გ., თევზაძე ვ.ი. Основы динамики селей. Тбилиси, 2007, 214 с.;
16. ნათიშვილი ო. გ., თევზაძე ვ.ი. Волны в селях. ООО Издательство «Научмехиздат», М., 2011, 160 с.;
17. ნათიშვილი ო. გ., კრუაშვილი ი. გ. «Экологические проблемы защиты объектов от вредного воздействия селевых потоков». Ж. Экологические системы и приборы, №7, М., 2015, с. 20-30;
18. ო. ნათიშვილი, ი. ყრუაშვილი, გ. გავარდაშვილი, ი. ინაშვილი. მეთოდური რეკომენდაციები ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობის პროექტირებისათვის (ჰიდრავლიკური გაანგარიშებები), საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული აკადემია, თბილისი, 2016, 48 გვ.;
19. 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, с. 48-54;
20. თევზაძე ვ. ნ., კალაძე ბ. ლ., კუხალაშვილი ე.გ., Критериальные значения сложности селевых смесей высокой плотности. Прогноз и борьба с эрозией почв. Сб. научных трудов НИИГиМ, Тбилиси, 1987, с.,119-125;
21. Херхеулидзе Г.И. К определению нагрузок от воздействия селевого потока на поперечные преграды. Тр. Зак. НИГМИ, вып. 40(46), Гидрометеоиздат, Л., 1972 г., с. 76-113;
22. Пруидзе Д.К. Определение уклона остановки селевых потоков. В кн. №6, М., 1978, с. 118-121;

23. Гавардашвили Г.В. – Разработка схем расположения противоселевых сооружений на горных реках. Труды международной конференции по селевым явлениям и некоторым смежным проблемам, Тбилиси, 2001, с. 33-39;
24. Круашвили И. Г., «Сели и методы борьбы с ними», Тбилиси, ГТУ, 2014, 338 с.;
25. Кухалашвили Е.Г. Об адаптации законов механики неньютоновских систем для описания динамики трехслойной модели структурных (грязекаменных) селевых потоков, Сообщения АН Груз. ССР, т. 112, 31, Тбилиси, 1983, с. 113-116;
26. კუხალაშვილი ე., ინაშვილი ი., ბზიავა კ., ყრუაშვილი ი., ლორთქიფანიძე დ. ღვარცოფსადენში ტალღურად მოძრავი ბმული ღვარცოფის მახასიათებლების დადგენა. სტუ. ჟ. „ჰიდროინჟინერია“ #1-2(19-20) 2015, გვ. 70-75;
27. G. Di Silvio. Flood and sediment dynamics in mountain rivers. Preproceedin of the NATO ASJ and „Coping with floods”, E. Mojoraamana center Erice, November, 3415, 1992, pp. 110;
28. Takahashi. Debris flow, Tailor & Francis Group, London, UK, 2007, 465 p.
29. Гавардашвили Г.В., Чахая Г.Г., Цулукидзе Л.Н. – Оценка эрозионно-селевых явлений в бассейнах р.Терек, Белая Арагви и Дуруджи. Материалы Международной конференции по селям . Пятигорск, 2003 г., с. 22-27;
30. Kukhalashvili E., Gavardashvili G., Kupreishvili Sh., Beraia N. – Expected Rick of Cohesive debris flows and Fighting Against Them. LAP_LAMBERT Academic Publishing, Germany, 2018, 87 p:
31. Алтуний В. Деформации русел канала Колос, М., 1972 г.,120 с.;
32. Натишвили О. Г., Круашвили И. Г., Защита инфраструктурных объектов от селевых потоков (Экологические проблемы) LAP_LAMBERT Academic Publishing, Germany, 2016, 104 p.;
33. Натишвили О.Г., Тевзадзе В.И. Одномерные наносонесущие русловые потоки. Москва, Издательство «Научтехиздат», 2012 г., 192 с.;

34. Gavardashvili G.V. Forecasting of erosion – mudflow processes in the Duruji river basing and new engineering and environmental measures, Metsniereba, 2003, 116 p.;
35. Круашвили И.Г., Кухалашвили Е.Г., Инашвили И.Д., Лорткипанидзе Д.Г., Бзиава К.Г. Установление гидравлических параметров селевых русел. Экологические системы и приборы, №11, 2016 г., ст. 9-14;
36. Круашвили И.Г., Кухалашвили Э.Г., Инашвили И.Д., Бзиава К.Г. Климашаили И.Л. Математическая модель неравномерного движения связаного селя. ГТУ, Ж. «Гидроинженерия», 1-2, (17-18), Тбилиси, 2014, с. 42-45;
37. კუხალაშვილი ე., ყრუაშვილი ი., ხუცურაული ბ. ღვარცოფწარმოქმნელი გრუნტის მდგრადობის რღვევის შესაძლო ფორმები. აგრარული მეცნიერების პრობლემები. სამეცნიერო შრომათა კრებული. თბილისი, 2001 წ., გვ. 80-84;
- 38.Тевзадзе В.И. К вопросу установления предельного напряжения сдвига модели структурной селевой массы. Труды ГрузНИИГиМ, Тбилиси, 1972, вып. 29, с. 136-145;
39. Кухалашвили Э.Г., Гавардашвили Г.В. «Противоселевое устройство», Авт. св. №1108159, зарегистрировано в государственном реестре изобретений СССР, 1984 г.;
40. Кухалашвили Э.Г., Гавардашвили Г.В. «Противоселевое устройство», Авт. св. №1101499, зарегистрировано в государственном реестре изобретений СССР, 1984 г.;
41. Кухалашвили Э.Г., Гавардашвили Г.В. «Противоселевое устройство», Авт. св. №11911515, зарегистрировано в государственном реестре изобретений СССР, 1985г.;
42. Кухалашвили Э.Г., Гавардашвили Г.В. «Противоселевое устройство», Авт. св. №1254103, зарегистрировано в государственном реестре изобретений СССР, 1986 г.;

43. Кухалашвили Э.Г., Гавардашвили Г.В. «Противоселевое устройство», Авт. св. №1335615, зарегистрировано в государственном реестре изобретений СССР, 1987 г.;
44. Кухалашвили Э.Г., Гавардашвили Г.В. «Противоселевое устройство», Авт. св. №1413185, зарегистрировано в государственном реестре изобретений СССР, 1988 г.;
45. Кухалашвили Э.Г., Гавардашвили Г.В. «Противоселевое устройство», Авт. св. №1645357, зарегистрировано в государственном реестре изобретений СССР, 1991 г.;
46. Кухалашвили Э.Г., Гавардашвили Г.В. «Противоселевое устройство», Авт. св. №1687707, зарегистрировано в государственном реестре изобретений СССР, 1991 г.;
47. ყრუაშვილი ი., კუხალაშვილი ე., გავარდაშვილი გ. ღვარცოვის ენერჯის ჩამქრობი ნაგებობა. საქ. მეცნ. და ტექნ. კომიტ. „საქპატენტი“1994, ს.ს #001349;
48. Яно К., Даидо А. Фундаментальные изучения грязекаменных потоков, Труды Института защиты от стихийных бедствий, т. 14, часть 2, Киото, 1985, с. 69-93;
49. G. Chakhaia, E. Kukhalashvili, R. Diakonidze, N. Kvashilava, L. wulukidze, Sh. Kupreishvili, T. Supatashvili, I. Khubulava, The Ebaluation of Debris Flows influence on the pass through tupe Debris Flow against Construction. American Scientific Research Journal for Engineering, Technology and Sciences (ASRJETS), ISSN (Print) 2313-4410, iSSN (Online)2313-4402 GlobalSociety jf Scientiific Research and Researchers, Impact Factor D 296,USA.
50. Сулаквелидзе А. А., Пруидзе Д.К. К вопросу генезиса и прогноза грязекаменных селевых потоков в селевых очагах, сб. «Эрозионные и селевые потоки и борьба с ними», 2, М., 1973, с.122-125;
51. Херхеулидзе И.И. Овражные и селевые выносы, М., Дориздат., 1947, 97 с.;

52. Великанов М.А. Качественный динамический анализ селевого потока. Изд-во АН СССР. Сер. георг. и геофиз., т. 9, №41945, с. 353-363;
53. Иорданишвили З.С. Движение структурных селей на прямолинейных участках русла. В кн.: Защита железных дорог от селевых потоков. М., Трансжелдориздат, 1962, с. 188-196;
54. ყრუაშვილი ი., ქაცარავა თ., კუხალაშვილი ე., ღვარცოფსაწინააღმდეგო ახალი ტიპის კონსტრუქციები. აგრარული მეცნიერების პრობლემები, სამეცნიერო შრომათა კრებული, ტ. XX, თბილისი, 1997, გვ. 180–186;
55. ყრუაშვილი ი., ქაცარავა თ., კუხალაშვილი ე. ღვარცოფის შემფოთებული ზონის საანგარიშო მახასიათებლები. აგრარული მეცნიერების პრობლემები, სამეცნიერო შრომათა კრებული, ტ. IX, თბილისი, 1997, გვ. 229–230;
56. ყრუაშვილი ი., ქაცარავა თ., კუხალაშვილი ე. კალაპოტური ჰიდროტექნიკური ნაგებობების დიობების ძირითადი გაბარიტების შერჩევა. აგრარული მეცნიერების პრობლემები, სამეცნიერო შრომათა კრებული, ტ. I, თბილისი, 1997, გვ. 235–238;
57. კუხალაშვილი ე., ინაშვილი ი., კლიმაშვილი ი. არასტაციუნალურ საფუძველზე ღვარცოფსაცავის მახასიათებლების ცვლილების კანონზომიერების განსაზღვრა. სტუ, ჟ. „ჰიდროინჟინერია“, #1–2 (17–18) თბილისი, 2014, გვ. 46–53;
58. ყრუაშვილი ი., კუხალაშვილი ე., ინაშვილი ი., ბზიავა კ., კირტავა ვ. ჰიპერკონცენტრირებული ნაკადების ჰიდრავლიკური მახასიათებლების განგარიშება ღვარცოფსაშიში გადადინების შემთხვევაში. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია „კლიმატის ცვლილება და მისი გავლენა სოფლის მეურნეობის მდგრად უსაფრთხო განვითარებაზე“, თბილისი, 2014, გვ. 345–348;
59. ყრუაშვილი ი., ინაშვილი ი., კლიმაშვილი ი. „ღვარცოფსაწინააღმდეგო ბარიერის საპროექტო პარამეტრების კომპიუტერული მოდელირება“, საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია „გლობალური დათბობა და

- აგრობიომრავალფეროვნება“, საქართველოს სოფლის მეურნეობის მეცნიერებათა აკადემია, თბილისი, 2015, გვ. 334-337;
60. Круаშვილი И. Г., Кухалашვილი Э. Г., Инашვილი И.Д., Бзиава К.Н., Лорткипანიძე Д. Г. «Установление гидравлических параметров селевых русел». Ж. Экологические системы и приборы, 2016, с. 9-14;
61. Kereselidze D. Evaluation and Management of the Risk of Flooding River Bank. Engineering Geology for Society and Territory. Vol.3: River Basin, Reservoir Sedimentation and Water Recourses. Springer International Publishing Switzerland. ISBN: 978-3-319-09053-5, ISBN: 978-3-319- 09054-3 (e-Book), DOI: 10.1007/978-3-310-09054-2. 2015, pp. 463-468;
62. 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;
63. გ. გავარდაშვილი, ე. კუხალაშვილი, ი. კვიციანი სტეფანწმინდის (ყაზბეგის) რაიონში არსებული ღვარცოფსაშიშროება და სტიქიის რეგულირების გზები. წყალთა მეურნეობის, გარემოს დაცვის, არქიტექტურისა და მშენებლობის თანამედროვე პრობლემები, თბილისი, 2016 წ., VI გამოცემა;
64. G. Gavardashvili, E. Kukhalashvili, T. Supatashvili, I. Iremashvili, K. Bziava, Giorgi Natroshvili, I. Qufarashvili. 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. Barselona, Spain, Yune 11-12, 2019, pp. 1029-1032 (იბპ.ფაქტ.);
65. 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). 2020. ISSN 1512-1887, pp. 251-257.
<http://journals.org.ge/index.php/aans/issue/view/19/23>;

66. 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;

67. 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;

68. 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.);

69. ზ.გვიშიანი, მ.ნანიტაშვილი, დ.გურგენიძე, მ.მღებრიშვილი. ღვარცოფული ნარევის რეოლოგიური მახასიათებლების განსაზღვრის საკითხი. მე-9 საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია „წყალთა მეურნეობის, გარემოს დაცვის, არქიტექტურისა და მშენებლობის თანამედროვე პრობლემები“, შრომთა კრებული, გამომცემლობა „საჩინო“, თბილისი, 2019 წ., გვ. 73-83;

70. Круаშვილი И. Г., «Сели и методы борьбы с ними», Тбилиси, ГТУ, 2014, 338 с.;

71. E. Kukhalashvili, G. Gavardashvili, Sh. Kupreishvili, N. Beraia, 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;

72. კუხალაშვილი ე., ინაშვილი ი., კლიმიაშვილი ი. არასტაციუნალურ საფუძველზე ღვარცოფსაცავის მახასიათებლების ცვლილების

- კანონზომიერების განსაზღვრა. სტუ, ჟ. „ჰიდროინჟინერია“, #1-2 (17-18) თბილისი, 2014, გვ. 46-53;
73. ე. კუხალაშვილი, გ. გავარდაშვილი, ი. ირემაშვილი, ლ. მასიაია, ნ. ბერაია, ხ. კიკნაძე, ქ. დადიანი. მათემატიკური მოდელი ღვარცოფის ენერგეტიკული მახასიათებლების შეფასებისთვის. ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა მეუნეობის ინსტიტუტის სამეცნიერო შრომათა კრებული #74, თბილისი, 2019, გვ. 100-107;
74. Шеко А.И. Методы изучения и прогноза экзогенных геологических процессов. М., „Недра“, 1988, 215 с.;
75. შ. გაგოშიძე, ი. ქადარია, გ. კახაძე. მ. კოდუა. მაღლივი კაშხლებიდან ვარდნილი ნაკადებით კლდოვანი ფუძეების წარეცხვების გაანგარიშებისათვის. ჰიდროინჟინერია, N1-2 (29-30), 2021;
76. გავარდაშვილი გ. ბმული ღვარცოფული ნაკადის სიჩქარის განსაზღვრა ჰაერის წინაღობის გათვალისწინებით. საქ. მეცნიერებათა აკადემიის მოამბე, თბილისი, 1995, ტ. 151, ¹³, გვ. 444-447 (თანაავტორობით).;
77. გავარდაშვილი გ. მდინარე დურუჯის აუზში ეროზიულ – ღვარცოფული პროცესების პროგნოზირება და მათი საწინააღმდეგო ახალი საინჟინრო – ეკოლოგიური ღონისძიებები. „მეცნიერება“. თბილისი, 2003 წ. 116. გვ.;
78. ქადარია შ. გაგოშიძე მ. კოდუა ი. რიჟამაძე. ნაპირგასწვრივ ტალღურ მოძრაობათა გაანგარიშებისათვის საზღვაო და სამდინარო არხებში სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი „ენერჯია“ #2 (82) თბილისი 2017 წ. გვ. 75-81. ISSN 1512-0120;
79. ყრუაშვილი ი., ქაცარავა თ., კუხალაშვილი ე. ღვარცოფის შემფოთებული ზონის საანგარიშო მახასიათებლები. აგრარული მეცნიერების პრობლემები, სამეცნიერო შრომათა კრებული, ტ.IX, თბილისი, 1997, გვ. 229-230;
80. Trapaidze V. “Risk Analysis of the River Bank Washout and Flooding of the Areas”. Earth Sciences Vol. 4, No. 5- 1, 2015, pp. 113-119;

81. Daido A., Sacamoto V. Viscosity and yield value of the fluid containing plenty clay. Proc. Osaka tech. College Depart. Civ. Eng., 1973, p. 59-68;
82. Мирцхулава Ц. Е. Современные СТМИ возможности предсказания уязвимого состояния территорий и объектов для катастрофических селей- ж. Геоэкология № 1 Тбилиси 2006 гю ст. 57-65;
83. Гачечиладзе И. Э. Ливни в Грузии, 1934 г., 60 с.;
84. Кикилашвили Т.В. О селевых потоках правобережья р. Алазани и меры борьбы с ними. Изд-во АН СССР, М., 1957, с. 171-177;
85. კილასონია ჭ., ხელიძე გ. წყალსაცავის სანაპირო ფერდობების დამაბულ-დეფორმაციული მდგომარეობის რიცხვითი ანალიზი წყალსაცავში და სამთო მასივში წყლის დონეთა ცვალებადობით ცივის მეწყერის მაგალითზე. ენერჯია #4, 1997 წ., გვ. 42-47;
86. Ростомов Г. Д. Формирование максимальных расходов воды рек по территории Закавказья, -346—Тр.Зак. рег. ШМ, 1982, вып. 77.83., с.24-31;
87. Сванидзе Г.Г. Цуцкиридзе Я.А. Основные гидрометеорологические явления на Кавказе. Гидрометеиздат, Л., 1980 г., 288 с. ;
88. ე. კუხალაშვილი, გ. გავარდაშვილი, ი. ირემაშვილი, ნ. ბერაია, ქ. დადიანი, ხ. კიკნაძე, ლ. მაიასაია. წყალსატევების კვების წყაროთა ჰიდროლოგიური მახასიათებლები და მათი როლი წყლის ინტეგრირებულ მართვაში, საქართველოს სოფლის მეურნეობის აკადემია, ინტერნეტ სამეცნიერო-პრაქტიკული კონფერენცია, „საქართველოს აგროსაინჟინრო სექტორის სტაბილიზაციისა და განვითარების პრიორიტეტები კორონავირუსის პანდემიისა და მის შემდგომ პერიოდში“, 17-18 სექტემბერი, 2020 წ., თბილისი, გვ. 149-159;
89. E. Kukhalashvili, G. Gavardashvili, I. Iremashvili*, N. Beraia, Kh. Kiknadze. Debris flow density and their effect on debris flow regulation buildings, Annals of Agrarian

Science Journal homepage: <http://journals.org.ge/index.php> ISSN 1512-188 Volume 19, Number 1, March 2021, pp. 13-22;

90. E. Kukhalashvili, N. Kvashilava, Sh. Kupreishvili, N. Beraia. Estimation of the associated mudflow impact on semi-conical through constructions, *Annals of Agrarian Science*, 15 (2017), 322-328, pp. 322-328;

91. E. Kukhalashvili, G. Gavardashvili, Sh. Kupreishvili, N. Beraia. Effects of cohesive mudflow on semi-cylindrical anti-mud structure, *Construction of Optimized Energy Potential*, vol. 7, N 2/2018, pp. 35-44;

92. Trapaidze V., „Water Quality Variability of the River Rioni” paper proceedings of *Climate Change Adaptation*, Colombo, Sri Lanka, 2015, pp. 48-55;

93. Trapaidze V. „ASSESSMENT OF VARIABILITY OF FLOODS AND FRESHETS FREQUENCY IN SEPARATE MONTH OF SOME GEORGIA’S RIVERS” *Prosedings ICAE-2015*, pp. 75-78;

94. Кулиев С.Н., Усьман Б.Н., Абдинов И.А. Вопросы гидравлики глинистых и цементных растворов. Баку, Азернесир, 1963, с. 140;

95. Kereselidze D. „Assessment of the catastrophic events originated in the river Vere basin” *The First SDSU – Georgia STEM WORKSHOP on Nanotechnology and Environmental Sciences*, 2015, pp. 180-182,

96. Степанов Б.С. О соотношении транспортных и гравитационных сил при движении селевых потоков. *Селевые потоки*. М., Гидрометеоздат, 1977, сб.№2, с.;

97. Фукс Г.И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов. М.-Л., Гостехиздат, 1951, с. 252.;

98. Vartanov M., Kukhalashvili E., Beraia N., Maisaia L. Economic Efficiency of Debris-flow Control. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)* ISSN (Print) 2313-4410, ISSN (Online) 2313-4402, 2019, pp. 22-28;

99. Варганов М. В., Иорданишвили И., Кечхошвили И. М., Бераия Н. П., Шогирадзе М. Х. К вопросу прогнозирования опасности аварий и катастроф на действующих водохранилищах Грузии, საქართველოს სოფლის მეურნეობის აკადემია, ინტერნეტ სამეცნიერო-პრაქტიკული კონფერენცია „საქართველოს აგროსაინჟინრო სექტორის სტაბილიზაციისა და განვითარების პრიორიტეტები კორონავირუსის პანდემიისა და მის შემდგომ პერიოდში“, 17–18 სექტემბერი, 2020 წ., თბილისი, გვ. 49–58;

100. Варганов М. В., Кечхошвили И. М., Бераия Н. П., Дадияни К. З., Кикнаде Х. Л., Маисаия 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, с. 3-7.