

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
ხელნაწერის უფლებით

ლ ა შ ა რ უ რ უ ა

პრიზმატულ კალაპოტებში წყლის ნაკადის თავისუფალი
ზედაპირის მრუდების აგების გამარტივებული მეთოდი

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარმოდგენილი დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი
2012 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
სამშენებლო ფაკულტეტის საინჟინრო მექანიკის დეპარტამენტზე

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: სრ. პროფესორი ტარიელ კვიციანი

რეცენზენტები: სრ. პროფესორი იური ქადარია
ტ.მ.დ., გია გიგიბერია

დაცვა შედგება 2012 წლის 12 ივნისს 14⁰⁰ საათზე, საქართველოს
ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სადისერტაციო
საბჭოს კოლეგიის სხდომაზე, I კორპუსი, აუდიტორია 507ა.

მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 72.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება საქართველოს ტექნიკური
უნივერსიტეტის ბიბლიოთეკაში და სტუ-ს ვებ გვერდზე.

სადისერტაციო საბჭოს

სწავლული მდივანი

სრ. პროფესორი მ. კუბლაშვილი

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

ნაშრომის აქტუალურობა. ქვეყანაში ახალი მიწების ათვისებისა და სოფლის მეურნეობის განვითარების მიზნით, სულ უფრო ფართოვდება სამელიორაციო სამუშაოები. მათგან, იზრდება დამშრობი და საირიგაციო არხების რაოდენობა. ამავდროულად, დამშრობ სისტემებში არსებული დამშრობი და საკოლექტორო არხების უმეტესი ნაწილი საჭიროებს განახლებას, რეკონსტრუქციას და ზოგიერთ შემთხვევაში, ხელახალ აგებას.

ამჟამად, მხოლოდ კოლხეთის დაბლობზე არსებობს რამდენიმე ათასი დამშრობი არხი და კოლექტორი, რომელთა ფსკერის დახრა ნულოვანია და მნიშვნელოვანი სიგრძე აქვს. ძირითადად, მათი განივკვეთი ტრაპეციისებრია, ჩალაგებულია თხრილში და ზოგჯერ ტარდება მისი რეკონსტრუქცია.

მიუხედავად იმისა, რომ ეს არხები აგებულია წყლის ხარჯის მაღალი გამტარობის გათვალისწინებით, ხშირად ვერ ატარებს გაანგარიშებულ მოცულობას და წყალი ზემოდან გადმოდის, რაც იწვევს მოსაზღვრე ტერიტორიების, მათგან ერთად კი, სასოფლო-სამეურნეო კულტურების დატბორვას და დაჭაობებას. წყალი ყოვნდება ველზე და არხებშიც, ირღვევა სატუმბი სადგურების მუშაობის გრაფიკი (დამშრობი სისტემისა, თუ ასეთი არის) და მთლიანობაში, გაშრობა-მელიორაციის ეფექტურობა.

დამშრობი და სარწყავი სისტემების გამართული მუშაობის გარანტია სწორი ჰიდრავლიკური გაანგარიშება, აგრეთვე ისეთი დამშრობი და სარწყავი ქსელი-არხების აგება, რომლებიც საიმედოდ განსაზღვრავს წყლის ნაკადის ხარჯს დამშრობ და სარწყავ არხებში.

სწორედ ამ აქტუალურ პრობლემებს ეძღვნება ეს ნაშრომი.

სამუშაოს მიზანია საქართველოში არსებული სარწყავი და დამშრობი არხების მუშაობის მდგომარეობის შესწავლა და გამოკვლევა. ნატურული და ლაბორატორიული ექსპერიმენტების, აგრეთვე ჰიდრავლიკური კვლევების მეთოდების გამოყენებით დადგენა ფაქტორებისა, რომლებიც ფსკერის პირდაპირი და ნულოვანი ქანობის სარწყავ და დამშრობ არხებში წყლის ნაკადის მოძრაობის პროცესზე მოქმედებს მდოვრედ ცვლადი რეჟიმის დინებისას.

პრიზმატულ კალაპოტებში გამოვიკვლიოთ სითხის დამყარებული არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებები მუდმივი და ცვლადი სითხის ხარჯის შემთხვევებში; ამავდროულად, გამოვიკვლიოთ, პრიზმულ კალაპოტებში ნაკადის თავისუფალი ზედაპირების ფორმები, აგრეთვე არხის საფეხურიდან ძირს ვარდნილი ნაკადის მოხაზულობა – ტრაექტორიის განტოლება.

ამოცანის გადასაწყვეტად პრიზმული არხ-კალაპოტების სწორი ჰიდრავლიკური გაანგარიშების მიზნით, ჩატარდეს თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევები.

ექსპერიმენტების ჩატარების მიზნით, გამოვიყენოთ განზომილებათა თეორიისა და ექსპერიმენტების დაგეგმვის მეთოდიკა შეზღუდული კლასიკური გეგმით, რომელიც საშუალებას მოგვცემს მნიშვნელოვნად შევამციროთ ექსპერიმენტების რაოდენობა. საანგარიშო დამოკიდებულებები გამოვიყენოთ მთელი რიგი გეომეტრიული და კინემატიკური მახასიათებლების განსაზღვრისათვის, პრიზმატულ კალაპოტებში წყლის ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის მრუდების ასაგებად.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები. კვლევის ობიექტს წარმოადგენს ფსკერის პირდაპირი და ნულოვანი ქანობის პრიზმატული არხ-კალაპოტების ჰიდრავლიკური გაანგარიშება თეორიული და ექსპერიმენტული მეთოდების გამოყენებით, პრიზმატულ კალაპოტებში ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის მრუდის აგების გამარტივებული მეთოდის დამუშავება, წყალსატარის საფეხურიდან ძირს თავისუფლად ვარდნილი წყლის ნაკადის ტრაექტორიის განტოლების მიღება.

ნაშრომში გამოყენებულია თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევების ჰიდრავლიკაში ფართოდ ცნობილი მეთოდები. საკვლევ ამოცანებში სამიებელი ფუნქციები დამოკიდებულია რამდენიმე ცვლადზე და საჭიროა დავადგინოთ მრავალცვლადიანი ფუნქციონალური დამოკიდებულების მოდელი, მისი ცხადი სახე ცხრილით მოცემული ექსპერიმენტების საფუძველზე. ამ ამოცანის გადასაწყვეტად ვიყენებთ პროფესორების ტ. კვიციანის და გ. რურუას მიერ შემოთავაზებულ „მრავალფაქტორიანი საინჟინრო ექსპერიმენტების დაგეგმვას“, რომლის საფუძველზე ყოველი კონკრეტული ამოცანისათვის ჩვენ მიერ დამუშავდა მეთოდიკა „მრავალცვლადიანი ფუნქციონალური

დამოკიდებულების მოდელი და მისი ცხადი (ანალიზური) სახის დადგენა სრული და შეზღუდული კლასიკური გეგმის გამოყენებით“.

ნაშრომის ძირითადი შედეგები და მეცნიერული სიახლე. ტრაპეციულ არხებსა და კალაპოტებში თანაბარი დინების ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას მოცემული Q, b, m, n, i ან v, h, m, n, i სიდიდეების შემთხვევისათვის შედგენილია ნომოგრამები ნაკადის სიღრმისა და წყალსატარის ფსკერის სიგანის განსაზღვრისათვის.

ჩატარებულია პრიზმულ კალაპოტში წყლის ნაკადის არათანაბარი მოძრაობისას თავისუფალი ზედაპირის მრუდების აღმწერი დიფერენციალური განტოლების სრულყოფილი გამოკვლევა. დაზუსტებულია წყლის ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ფორმები. განხილულია დაცემისა და შეტბორვის წირების ნორმალური და კრიტიკული სიღრმეების წრფეთა მიმართ განლაგების ყველა შესაძლო შემთხვევა.

არაპრიზმულ კალაპოტში სითხის ცვლადი ხარჯით მოძრაობის ზოგადი სახის დიფერენციალური განტოლების საფუძველზე (როცა ერთდროულად მიმდინარეობს სითხის არათანაბარი მიერთება და გამოყოფა ნაკადის დინების გასწვრივ) მიღებულია პრიზმულ კალაპოტში ცვლადი ხარჯით სითხის არათანაბარი მოძრაობის ყველა კერძო შემთხვევისათვის დიფერენციალური განტოლება, რომელიც აღწერს ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის მრუდს.

პრიზმულ კალაპოტში საფეხურის კვეთის ზემო (დინების საწინააღმდეგო) მიდამოში განსაზღვრულია წყლის ნაკადის ჰიდრავლიკური მახასიათებლები, მიღებულია არხის საფეხურის კვეთში სიჩქარეთა და წნევათა განაწილების კანონი, აგრეთვე ჯამური ჭარბი წნევის გამოსათვლელი დამოკიდებულება.

საფეხურის ქვემოთ თავისუფლად ვარდნილი ნაკადის ტრაექტორიის დადგენის მიზნით, შედგენილია ზემოთა ზედაპირის ჭავლის მოძრაობის დიფერენციალური განტოლება და მიღებულია ჭავლის მოძრაობის განტოლებები გარკვეული საწყისი პირობების საფუძველზე.

ცხრილით მოცემული მრვალცვლადიანი ფუნქციონალური დამოკიდებულების მოდელის განსასაზღვრავად მიღებულია კრიტერიალური პირობები. ამ კრიტერიუმების საფუძველზე მიღებულია ყოველი კონკრეტული

ამოცანისათვის საძიებელი მრავალცვლადიანი ფუნქციონალური დამოკიდებულების ცხადი სახით ჩასაწერი ანალიზური დამოკიდებულება.

დადგენილია შვერილის სიმქისის n კოეფიციენტისა და შვერილის სიმაღლის სიდიდეების ცვლილება, როგორც წყალსადენის საფეხურიდან დაშორების მანძილსა და წყლის კუთრ ხარჯზე დამოკიდებულების ფუნქცია. აგრეთვე დადგენილია წყლის ნაკადის კრიტიკული სიღრმის ადგილმდებარეობა პრიზმულ კალაპოტებში დინების წყნარი რეჟიმისას, წყლის კუთრი ხარჯის, შვერილის სიმაღლის, სიმქისისა და წყლის სიბლანტის კინემატიკური კოეფიციენტების მიხედვით.

მიღებულია საანგარიშო დამოკიდებულება წყალსატარის საფეხურის კვეთში წყლის ნაკადის სიღრმის განსაზღვრისათვის, როგორც წყლის კუთრი ხარჯის, წყალსატარის ფსკერის დახრის, შვერილის სიმქისის სიმაღლისა და სიბლანტის კინემატიკური კოეფიციენტების მიხედვით.

განსაზღვრულია წყლის ნაკადის თავისუფალი ზედაპირისა და წყლის ნაკადის სიღრმის ფუნქციურ დამოკიდებულებათა მრუდების მოდელი და მისი ცხადი (ანალიზური) სახე პრიზმულ კალაპოტებში დინების წყნარი რეჟიმისას, წყალსატარის ნულოვანი და პირდაპირი დახრის შემთხვევებში.

მიღებულია დამოკიდებულება, რომლის მიხედვით განისაზღვრება ის მანძილი საფეხურის კვეთიდან, სადაც გვექნება მოცემული სიღრმე. ამ დამოკიდებულებით შეიძლება განვსაზღვროთ ნებისმიერ ორ კვეთს შორის მანძილი და საჭიროების შემთხვევაში, წყლის ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის მრუდი ავაგოთ დაწყებული არა საფეხურის კვეთიდან, არამედ წყალსატარის ნებისმიერი სხვა კვეთიდან.

წყალსატარის საფეხურიდან გადადინებული წყლის ნაკადის ტრაექტორიის დასადგენად მიღებულია ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ზედა და ქვედა ჭავლების ტრაექტორათა განტოლებები.

პრაქტიკული მნიშვნელობა და შედეგების გამოყენების სფერო. გამოკვლევის შედეგები მნიშვნელოვნად ამარტივებს და არსებითად აზუსტებს პრიზმულ კალაპოტებსა და არხებში წყლის ნაკადის არათანაბარი მდოვრედ მოძრაობის ჰიდრაულიკურ გაანგარიშებას.

პრიზმული კალაპოტებისა და არხების ჰიდრაულიკური გაანგარიშების რეკომენდებული მეთოდი შეიძლება წარმატებით გამოვიყენოთ საშრობი არხების

განგარიშებისთვის კოლხეთის დაბლობში, განსაკუთრებით ჰორიზონტალური ფსკერის არხების შემთხვევაში.

ნაშრომის აპრობაცია. ნაშრომის ძირითადი დებულებები აპრობირებულია „საქწყალპროექტში“, კოლხეთის დაბლობში ზოგიერთი საშრობი სისტემის დაპროექტებისას, თბილისის უმაღლესი საწავლებლების თეორიული მექანიკის საქალაქო სემინარებზე (თბილისი, 1988-90წწ.), „საქწყალპროექტი“-ს ტექნიკური საბჭოს თათბირზე (1989-90წწ.), საქართველოს ჰიდროტექნიკის და ენერგეტიკის სამეცნიერო კვლევითი ინსტიტუტების ჰიდრაულიკისა და საინჟინრო გეოლოგიის განყოფილების სხდომებზე (თბილისი, 1990წ.), სტუ-ს სტუდენტთა სამეცნიერო-ტექნიკურ კონფერენციაზე (თბილისი, 2011წ.).

პუბლიკაციები. ნაშრომის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია 3 სამეცნიერო სტატიაში.

დისერტაცია შედგება შესავლის, ოთხი თავის, ძირითადი დასკვნებისა და ლიტერატურისაგან (72 დასახელების, მათ შორის 12 უცხო ენებზე), წარმოდგენილია 140 გვ. ნაბეჭდი ტექსტი, 12 ცხრილისა და 48 ნახაზის ჩათვლით.

ნაშრომის შინაარსი

შესავალში მოყვანილია ნაშრომის საერთო შინაარსი, დასაბუთებულია დასმული საკითხის აქტუალობა, განხილულია სარწყავი და საშრობი სისტემების ჰიდრაულიკური განგარიშების მეთოდოლოგია, მეცნიერული სიახლეები და პრაქტიკული მნიშვნელობა.

პირველ თავში მოცემულია საკითხის შესწავლის თანამედროვე მდგომარეობა, პრიზმული კალაპოტების მოკლე დახასიათება, დანიშნულება და გავრცელების არე, ნატურული გამოკვლევების ზოგიერთი მონაცემი. მოყვანილია პრიზმულ არხებსა და კალაპოტში წყლის ნაკადის თანაბარი დინების ჰიდრაულიკური განგარიშების არსებული ფორმულები, შეზის კოეფიციენტის რიცხვითი მნიშვნელობის დასადგენი ფორმულები როგორც ღია, ისე დაწნევიანი არხებისათვის. შეზის კოეფიციენტის გამოთვლისას შემოთავაზებული დამოკიდებულებისათვის გაკეთებულია დასკვნა ამ ფორმულების გამოყენების პირობების შესახებ, აგრეთვე ხორკლიანობის კოეფიციენტის რეკომენდებულ მნიშვნელობათა ცხრილები, რომლებიც

მოითხოვს შესაბამის გადახედვას. ჩვენი აზრით, არასაკმარისად არის შესწავლილი საკითხი ნაკადის არათანაბრობის გავლენის შესახებ, მის წინააღმდეგობაზე.

განხილულია პრიზმულ არხებსა და კალაპოტში თანაბარი დინების ჰიდრავლიკური გაანგარიშების ლიტერატურაში არსებული ამოცანები და მათი ამოხსნის მეთოდები ტრაპეციულ არხებსა და კალაპოტებში. თანაბარი დინების ყველა ჰიდრავლიკური გაანგარიშება წარმოდგენილია სამ ჯგუფად, ე.ი. გაკეთებულია ამოცანების კლასიფიკაცია. პირველ ჯგუფში განხილულია 6 ამოცანა, მეორეში – 5, ხოლო მესამეში – 3. აგებულია ახალი ნომოგრამები იმ ამოცანების გადასაწყვეტად რომლებშიც საძიებელია ნაკადის h სიღრმე და მოცემული სიდიდეებია Q, b, m, n, i ან v, b, m, n, i ; აგრეთვე, იმ ამოცანებისათვის, რომლებშიც საძიებელია წყალსატარის ფსკერის b სიგანე და მოცემული სიდიდეებია Q, h, m, i, n ან v, h, m, i, n .

მეორე თავში მოყვანილია ცხრილით მოცემული მრავალცვლადიანი ფუნქციის მიახლოებითი ანალიზური ხერხით განსაზღვრა. კვლევის პროცესში ხშირად აუცილებელია ცდის მონაცემების მნიშვნელობათა საფუძველზე მოიძებნოს მოდელი, რომელიც მიახლოებით მაინც აღწერს საძიებელ ფუნქციას. მრავალფაქტორიან ინჟინრულ ექსპერიმენტებში მნიშვნელოვანი პრობლემა. არა მარტო საძიებელი ფუნქციის მოდელის დადგენა, არამედ მისი ცხადი (ანალიზური) სახის მიღება.

ტ. კვიციანის და გ. რურუას შრომებში მოყვანილი მრავალცვლადიანი ფუნქციონალური დამოკიდებულების მოდელის კრიტერიალური პირობების საფუძველზე, ჩვენ მიერ დადგენილია ყოველი კონკრეტული ჰიდრავლიკური ამოცანისთვის საძიებელი ფუნქციების მოდელი და მიღებულია მისი ცხადი სახით ჩასაწერი ანალიზური გამოსახულება.

განხილულია მრავალცვლადიანი ფუნქციონალური დამოკიდებულების კრიტერიალური პირობები, ორი ცვლადის ფუნქციისათვის:

$$z = f(x, y), \quad (1)$$

სადაც z განსაზღვრულია R^2 -ზე. შეიძლება ადგილი ჰქონდეს შემდეგი პირობიდან რომელიმე ერთ-ერთს:

$$\frac{f(x, y^{(j+K_2)})}{f(x, y^{(j)})} = \frac{f_1^{(j+K_2)}(x)}{f_1^{(j)}(x)} = C_{1,j}. \quad (2)$$

$$\frac{f(x^{(i+K_1)}, y)}{f(x^{(i)}, y)} = \frac{f_2^{(i+K_1)}(y)}{f_2^{(i)}(y)} = C_{2,i}, \quad (3)$$

$$f(x, y^{(j+K_2)}) - f(x, y^{(j)}) = f_3^{(j+K_2)}(x) - f_3^{(j)}(x) = C_{3,j}, \quad (4)$$

$$f(x^{(i+K_1)}, y) - f(x^{(i)}, y) = f_4^{(i+K_1)}(y) - f_4^{(i)}(y) = C_{4,i}, \quad (5)$$

$$\frac{\lg f(x, y^{(j+K_2)})}{\lg f(x, y^{(j)})} = \frac{\lg f_5^{(j+K_2)}(x)}{\lg f_5^{(j)}(x)} = C_{5,j}, \quad (6)$$

$$\frac{\lg f(x^{(i+K_1)}, y)}{\lg f(x^{(i)}, y)} = \frac{\lg f_6^{(i+K_1)}(y)}{\lg f_6^{(i)}(y)} = C_{6,i}, \quad (7)$$

სადაც $C_1 = f_1(y)$, $C_2 = f_2(x)$, $C_3 = f_3y$, $C_4 = f_4(x)$, $C_5 = f_5(y)$, $C_6 = f_6(x)$,

$k_1, k_2 \in N_0$, $i \in N$, $j \in N$, $x^{(i)} \in R$, $y^{(j)} \in R$.

ნაჩვენებია, რომ (2) და (3) კრიტერიალური პირობების მართებულობის შემთხვევაში, (1)-ის მოდელს აქვს ნამრავლის სახე

$$z = \varphi_1(x) \cdot \varphi_2(y). \quad (8)$$

(4) და (5) კრიტერიალური პირობების მართებულობისას, (1) ფუნქციის მოდელს ექნება შემდეგი სახე:

$$z = f(x, y) = \varphi_3(x) + \varphi_4(y). \quad (9)$$

(6) და (7) კრიტერიალური პირობების მართებულობისას, (1) ფუნქციის მოდელს ექნება შემდეგი სახე:

$$Z = [\varphi_5(x)]^{\varphi_6(y)}, \quad (10)$$

სადაც $\varphi_1(x)$, $\varphi_3(x)$, $\varphi_5(x)$, $\varphi_2(y)$, $\varphi_4(y)$, $\varphi_6(y)$ არის x და y ცვლადების ნებისმიერი ფუნქციები.

მრავალცვლადიანი ფუნქციის მოდელის დასადგენად ვიყენებთ სრულ და შეზღუდულ კლასიკურ გეგმას. (1)-სთვის სრული კლასიკური გეგმა მოცემულია 1-ელი ცხრილის სახით

y	x	y ⁽¹⁾	y ⁽²⁾	...	y ^(j)	...	y ^(m₂)
x ⁽¹⁾		f(x ⁽¹⁾ , y ⁽¹⁾)	f(x ⁽¹⁾ , y ⁽²⁾)	...	f(x ⁽¹⁾ , y ^(j))	...	f(x ⁽¹⁾ , y ^(m₂))
x ⁽²⁾		f(x ⁽²⁾ , y ⁽¹⁾)	f(x ⁽²⁾ , y ⁽²⁾)	...	f(x ⁽²⁾ , y ^(j))	...	f(x ⁽²⁾ , y ^(m₂))
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
x ⁽ⁱ⁾		f(x ⁽ⁱ⁾ , y ⁽¹⁾)	f(x ⁽ⁱ⁾ , y ⁽²⁾)	...	f(x ⁽ⁱ⁾ , y ^(j))	...	f(x ⁽ⁱ⁾ , y ^(m₂))
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
x ^(m₁)		f(x ^(m₁) , y ⁽¹⁾)	f(x ^(m₁) , y ⁽²⁾)	...	f(x ^(m₁) , y ^(j))	...	f(x ^(m₁) , y ^(m₂))

განხილულია აგრეთვე შემთხვევა, როცა y ფუნქცია დამოკიდებულია x₁, ..., x_n ცვლადებზე, ე.ი.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \tag{11}$$

სადაც y განსაზღვრულია Rⁿ -ზე.

დავუშვათ, კმაყოფილდება შემდეგი კრიტერიუმები:

$$\left. \begin{aligned} \frac{f(x_1, x_2^{(j+K_2)}, \dots, x_n^{(v)})}{f(x_1, x_2^{(j)}, \dots, x_n^{(v)})} &= \frac{f_1^{(j+K_2, \dots, v)}(x_1)}{f_1^{(j, \dots, v)}(x_1)} = C_{1,j} = f_1(x_1) \\ \frac{f(x_1^{(i+K_1)}, x_2, \dots, x_n^{(v)})}{f(x_1^{(i)}, x_2, \dots, x_n^{(v)})} &= \frac{f_1^{(i+K_1, \dots, v)}(x_2)}{f_2^{(i, \dots, v)}(x_2)} = C_{2,j} = f_2(x_2) \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{f(x_1^{(i+K_1)}, x_2^{(j)}, \dots, x_n)}{f(x_1^{(i)}, x_2^{(j)}, \dots, x_n)} &= \frac{f_n^{(i+K_1, j, \dots)}(x_n)}{f_n^{(i, j, \dots)}(x_n)} = C_{n,v} = f_n(x_n) \end{aligned} \right\}, \tag{12}$$

მაშინ (11)-ის მოდელს ექნება შემდეგი სახე:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_1(x_1) \cdot f_2(x_2) \dots f_n(x_n); \tag{13}$$

ხოლო, თუ ადგილი აქვს შემდეგ პირობებს:

$$\left. \begin{aligned} f(x_1, x_2^{(j+K_2)}, \dots, x_n^{(v)}) - f(x_1, x_2^{(j)}, \dots, x_n^{(v)}) &= f_1^{(j+K_2, \dots, v)}(x_1) - f_1^{(j, \dots, v)}(x_1) = C_{1,j} = f_1(x_1) \\ f(x_1^{(i+K_1)}, x_2, \dots, x_n^{(v)}) - f(x_1^{(i)}, x_2, \dots, x_n^{(v)}) &= f_1^{(i+K_1, \dots, v)}(x_2) - f_2^{(i, \dots, v)}(x_2) = C_{2,i} = f_2(x_2) \\ &\dots\dots\dots \\ f(x_1^{(i+K_1)}, x_2^{(j)}, \dots, x_n) - f(x_1^{(i)}, x_2^{(j)}, \dots, x_n) &= f_n^{(i+K_1, j, \dots)}(x_n) - f_n^{(i, j, \dots)}(x_n) = C_{n,v} = f_n(x_n) \end{aligned} \right\}, \tag{14}$$

მაშინ (11)-ის მოდელს ექნება შემდეგი სახე:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_n(x_n), \quad (15)$$

სადაც $f_1(x_1), f_2(x_2), \dots, f_n(x_n)$ ერთი ცვლადის ნებისმიერი ფუნქციებია, ამასთან $K_1 \in Z_0, K_2 \in Z_0, \dots, K_n \in Z_0; i \in Z, j \in Z, \dots, v \in Z$.

ამრიგად, თუ გვაქვს R^n -ზე განსაზღვრული n დამოუკიდებელ-ცვლადიანი (11) ფუნქცია, მაშინ (13) ტიპის მოდელის არსებობისათვის აუცილებელი და საკმარისია, ადგილი ჰქონდეს (12) პირობას; ხოლო (15) ტიპის მოდელის არსებობისათვის აუცილებელი და საკმარისია, ადგილი ჰქონდეს (14) პირობას.

1-ელ ცხრილში $x^{(i)}$ და $y^{(j)}$ არის x და y დამოუკიდებელი ცვლადების ფიქსირებული დონეები; $i = 1, 2, \dots, m_1; j = 1, 2, \dots, m_2; f(x^{(i)}, y^{(j)})$ – (1)-ის ფიქსირებული მნიშვნელობა, რომელიც წარმოადგენს 1-ელი ცხრილის კვანძებს.

ერთფაქტორიანი ექსპერიმენტის ცნობილი მეთოდით, 1-ელი ცხრილის საშუალებით ვპოულობთ ერთფაქტორიან ფუნქციებს შემდეგი სახით:

$$\left. \begin{aligned} f(x, y^{(j)}) &= f^{(j)}(x) \\ f(x^{(i)}, y) &= f^{(i)}(y) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

ამის შემდეგ, ვამოწმებთ ამ ფუნქციებით ზემოთ მიღებული ((2) ან (3); (4) ან (5); (6) ან (7)) პირობების (კრიტერიუმების) არსებობას.

თუ (16) აკმაყოფილებს (2) ან (3) პირობებს, მაშინ საძიებელი ფუნქციის ერთ-ერთი (არა ერთადერთი) მოდელი იქნება (8) სახის ნამრავლი; თუ კმაყოფილდება (4) ან (5), მაშინ საძიებელი (1) ფუნქციის მოდელის ერთ-ერთი სახე იქნება (9) სახის ჯამი, ხოლო (6) ან (7) პირობების არსებობისას საძიებელი (1) ფუნქციის ერთ-ერთი მოდელი იქნება (10) ტიპის ხარისხოვან-მაჩვენებლიანი ფუნქცია.

შევნიშნოთ, რომ (2), (3), (4), (5), (6) და (7) პირობები 1-ელი ცხრილიდან შეიძლება დააკმაყოფილოს (8), (9) ფუნქციებისგან განსხვავებულმა სხვა მრავალმა ფუნქციამ.

(1) საძიებელი ფუნქციის (8), (9) ან (10) სახით მოდელის განსაზღვრის შემდეგ, შეზღუდული კლასიკური ცხრილის საფუძველზე შეიძლება დავადგინოთ, რომ (1)-ს იქნება ერთ-ერთი შემდეგი ცხადი სახე:

ამრიგად, როცა მივიღებთ (8) მოდულს, მაშინ მის ცხად სახეს ვიპოვით შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$z = f(x, y) = f_1(x) \cdot f_2(y) = \frac{f(x, y^{(j)}) \cdot f(x^{(i)}, y)}{f(x^{(i)my^{(j)}}) f(x^{(i)}, y^{(j)})}; \quad (17)$$

როცა მივიღებთ (9) მოდულს მაშინ

$$z = f(x, y) f_1(x) + f_2(y) = f(x, y^{(j)}) + f(x^{(i)}, y) - f(x^{(i)}, y^{(j)}); \quad (18)$$

როცა კმაყოფილდება (10) კრიტერიუმი, მაშინ

$$\lg z = \lg f(x, y) = f_2(y) \cdot \lg f_1(x) = \frac{\lg f(x, y^{(j)}) \cdot \lg f(x^{(i)}, y)}{\lg f(x^{(i)}, y^{(j)})}. \quad (19)$$

(17), (18) და (19)-ში $f(x^{(i)}, y^{(j)})$ წარმოადგენს შეზღუდულ კლასიკურ გეგმაში (იხ. მე-2 ცხრილი) სვეტებისა და სტრიქონების გადაკვეთაში მიღებულ ერთ-ერთ კვანძს, როცა $x = x^{(i)}$ და $y = y^{(j)}$.

ცხრილი 2

x	y	$y^{(1)}$	$y^{(2)}$	$y^{(3)}$	...	$y^{(j)}$	...	$y^{(m_2)}$
$x^{(1)}$		$f(x^{(1)}, y^{(1)})$	$f(x^{(1)}, y^{(2)})$	$f(x^{(1)}, y^{(3)})$	...	$f(x^{(1)}, y^{(j)})$	...	$f(x^{(1)}, y^{(m_2)})$
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮
$x^{(i)}$		$f(x^{(i)}, y^{(1)})$	$f(x^{(i)}, y^{(2)})$	$f(x^{(i)}, y^{(3)})$	...	$f(x^{(i)}, y^{(j)})$	...	$f(x^{(i)}, y^{(m_2)})$
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$x^{(m_1)}$		–	–	–	–	$f(x^{(m_1)}, y^{(j)})$	–	–

იმის მიხედვით, თუ რომელ ფუნქციებს შევიყვანოთ (8), (9) და (10) ფორმულებში, გადაკვეთის კვანძებია $f(x^{(1)}, y^{(j)})$ ან $f(x^{(i)}, y^{(j)})$. თუკი ამ დამოკიდებულებებში შეგვყავს $f(x^{(1)}, y)$ ფუნქცია, მაშინ კვანძად მივიღებთ $f(x^{(1)}, y^{(j)})$, ხოლო თუ შეგვყავს $f(x^{(i)}, y)$, მაშინ – $f(x^{(i)}, y^{(j)})$.

იმ შემთხვევაში, როცა მრავალცვლადიანი (11) ფუნქცია მოცემულია ცხრილის სახით და კმაყოფილდება (12) ან (14) კრიტერიუმები, მაშინ (11)-ის ცხად სახეს ვიპოვით ფორმულების მეშვეობით.

ამრიგად, როცა მივიღებთ (13) მოდელს, მაშინ (11)-ის ცხადი სახე იქნება

$$y = \frac{f(x_1, x_2^{(j)}, \dots, x_n^{(v)}) + f(x_1^{(i)}, x_2, \dots, x_n^{(v)}) \cdot \dots \cdot f(x_1^{(i)}, x_2^{(j)}, \dots, x_n)}{[f(x_1^{(i)}, x_2^j, \dots, x_n^{(v)})]^{(n-1)}}. \quad (20)$$

ხოლო, როცა მივიღებთ (15) მოდელს, მაშინ (11)-ის ცხად სახეს ვიპოვით შემდეგი ფორმულით:

$$y = f(x_1, x_2^{(j)}, \dots, x_n^{(v)}) + f(x_1^{(i)}, x_2, \dots, x_n^{(v)}) + \dots + f(x_1^{(i)}, x_2^{(j)}, \dots, x_n) - f(x_1^{(i)}, x_2^j, \dots, x_n^{(v)}) \cdot (n-1), \quad (21)$$

სადაც $f(x_1^{(i)}, x_2^{(j)}, \dots, x_n^{(v)})$ წარმოადგენს შეზღუდული კლასიკური გეგმის კვანძს.

ამ თავში მოყვანილია აგრეთვე პრიზმულ კალაპოტებში წყლის არათანაბარი მოძრაობის ძირითადი დიფერენციალური განტოლებები.

არათანაბარი მოძრაობა შეიძლება დამყარდეს ფსკერის როგორც პირდაპირი ($i > 0$), ისე ნულოვანი ($i = 0$) და უარყოფითი ($i < 0$) ქანობების შემთხვევაში. ხშირად ვხვდებით სითხის ისეთ მოძრაობას, რომელსაც ახასიათებს ნაკადის გასწვრივ ხარჯის ცვლილება, რაც გამოწვეულია სითხის ნაკადის მოძრაობის გზაზე, მისგან გარკვეული ნაწილის გადინებით ან შემოდინებით. პირველ შემთხვევაში, გვაქვს სითხის მოძრაობა ნაკადის გასწვრივ ხარჯის კლებით, ხოლო მეორეში – სითხის მოძრაობა ხარჯის მატებით. ცვლადი მასის დინამიკის განტოლება განსხვავდება მუდმივი მასის დინამიკის განტოლებისაგან, აქ მხედველობაშია მიღებული მასების „შერევის“ (აღრევის) ხარჯზე ენერჯის დანაკარგები. სითხის ნაკადში ეს დანაკარგები ხშირ შემთხვევაში აღწევს სიდიდეებს, რომლებიც გაცილებით დიდია, ვიდრე შიგა „ხახუნზე“ დანაკარგები. ფიზიკურად, მნიშვნელოვანი დანაკარგები შერევაზე აიხსნება სისტემაზე წერტილების მიერთების და მისგან გამოყოფის შედეგად ძირითადი ნაკადის მიმართ ფარდობითი სიჩქარეების ჩაქრობის საფუძველზე. უწყვეტად მიმდინარეობს სხვადასხვა სიჩქარეთა ნაკადების შერევა, რომლებიც მოძრაობს სხვადასხვა პირობებში. პირდაპირი ქანობის შემთხვევაში, ცვლადი ხარჯით სითხის მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებას პრიზმულ კალაპოტებში, როცა ერთდროულად მიმდინარეობს სითხის ხარჯის არათანაბარი მიერთება და გამოყოფა ნაკადის მოძრაობის გასწვრივ ($q_1 \neq q_2 \neq \text{cost}$), აქვს შემდეგი სახე:

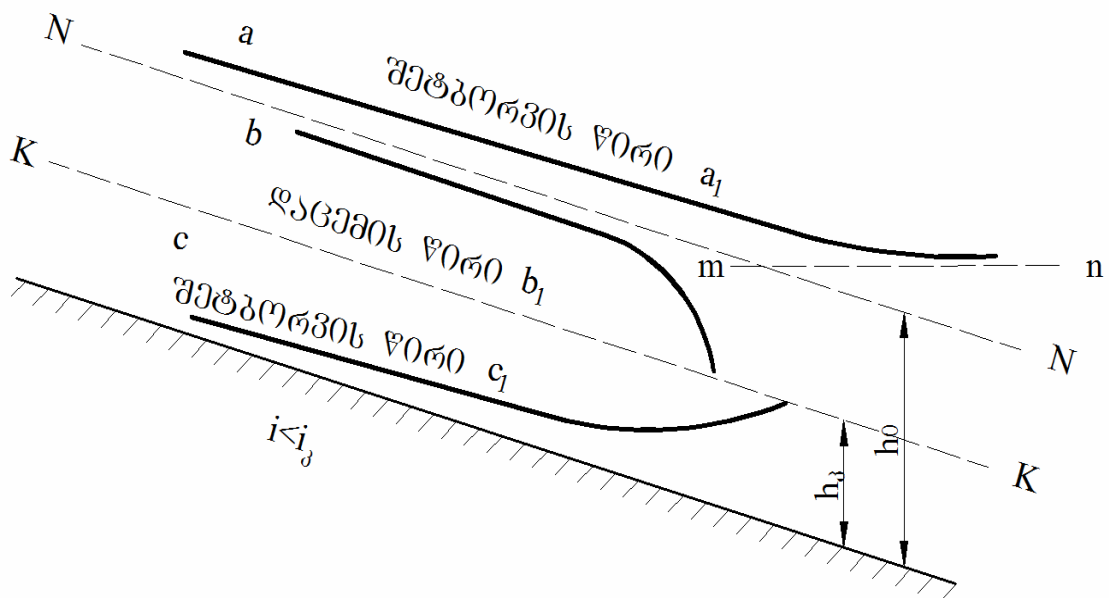
$$\frac{dh}{dx} = \frac{i - \frac{Q^2}{K^2} - \frac{\alpha_0(2-a_1)}{g\omega^2} Q \cdot q_1 + \frac{\alpha_0(2-a_2)}{g\omega^2} Q \cdot q_2}{1 - \frac{\alpha_0 Q^2}{g} \cdot \frac{B}{\omega^3} + \frac{\alpha_0(2-a_1)}{g\omega^2} Q \cdot x \cdot \frac{\partial q_1}{\partial h} - \frac{\alpha_0(2-a_2)}{g\omega^2} Q \cdot x \cdot \frac{\partial q_2}{\partial h}}. \quad (22)$$

(22) განტოლებიდან შეიძლება მივიღოთ ყველა კერძო შემთხვევის შესაბამისი განტოლება: $q_1 \neq \text{const}$, როცა მიმდინარეობს ხარჯის მხოლოდ არათანაბარი მიერთება, $q_2 = 0$, $\frac{\partial q_2}{\partial h} = 0$; როცა მიმდინარეობს ხარჯის მხოლოდ არათანაბარი გამოყოფა, $q_2 \neq \text{const}$, $q_1 = 0$, $\frac{\partial q_1}{\partial h} = 0$; როცა მიერთების ხარჯი მუდმივია, ხოლო გამოყოფის ხარჯი ცვალებადი, ე.ი. $q_1 = \text{const}$, $q_2 \neq \text{const}$ და $\frac{\partial q_1}{\partial h} = 0$; როცა მიერთების ხარჯი ცვალებადია, ხოლო გამოყოფის ხარჯი მუდმივი, ე.ი. $q_1 \neq \text{const}$, $q_2 = \text{const}$ და როცა ნაკადის ხარჯი მთელ სიგრძეზე მუდმივია, ამ შემთხვევაში (25)-ში $q_1 = q_2 = 0$, $\frac{\partial q_1}{\partial h} = \frac{\partial q_2}{\partial h} = 0$ და გვექნება:

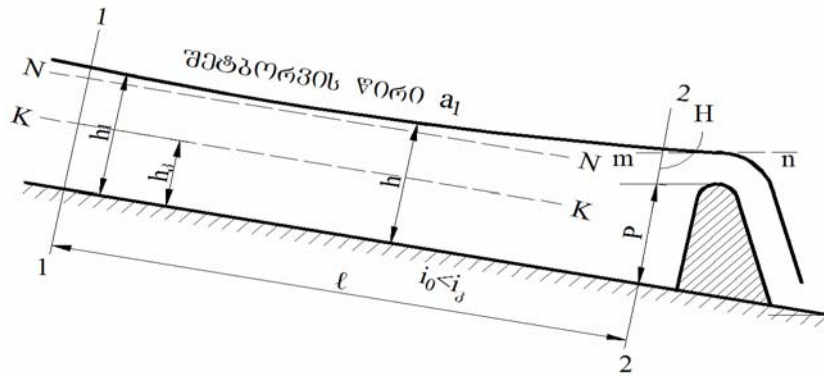
$$\frac{dh}{dx} = \frac{i - \frac{Q^2}{K^2}}{1 - \frac{\alpha_0 Q^2}{g} \cdot \frac{B}{\omega^3}}. \quad (23)$$

ადვილად შევამჩნევთ, რომ (22)-დან მიღებული (23) განტოლება არის (ჰიდრავლიკის კურსიდან ცნობილი) დამყარებული მდოვრედ ცვლადი ნაკადის არათანაბარი მოძრაობის დიფერენცირებული განტოლება. (22) განტოლება აღწერს ცვლადი ხარჯის სითხის მოძრაობის ზოგად შემთხვევას და შეიძლება გამოვიყენოთ პრიზმულ კალაპოტში თავისუფალი ზედაპირის წირის ასაგებად. ამ თავში მოყვანილია პრიზმულ კალაპოტებში სითხის არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლების სრულყოფილი გამოკვლევა; აგრეთვე გამოკვლეულია $h = f(\ell)$ ფუნქციის ყოფაქცევა $\frac{dh}{d\ell}$ წარმოებულის ნიშნის მიხედვით. დადგენილია, როდის განიცდის ფუნქცია წვეტას, ე.ი. როდის ხდება ნაკადის ერთი მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლა. წყნარიდან მძაფრ მდგომარეობაში ნაკადის გადასვლისას ადგილი აქვს სიღრმის მკვეთრ შემცირებას – წყალვარდნას, ხოლო ნაკადის მძაფრი

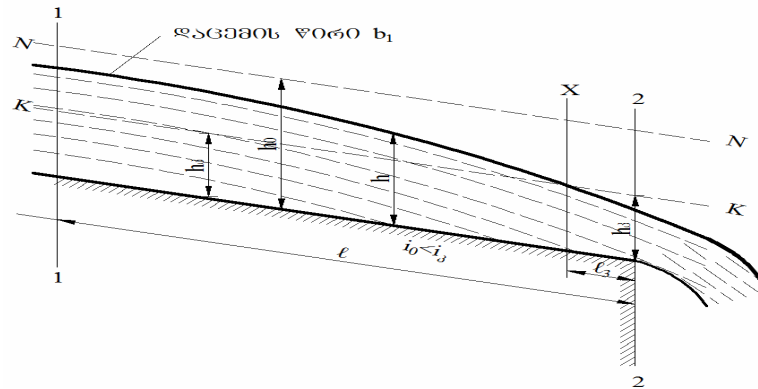
მდგომარეობიდან წყნარში გადასვლისას, ადგილი აქვს სიღრმის მკვეთრ ზრდას – ჰიდრავლიკურ ნახტომს. წყლის ნაკადის h სიღრმესა და კრიტიკული h_c სიღრმის თანაფარდობის, $\frac{dh}{d\ell}$ წარმოებულის ნიშნის, კინეტიკურობის Π_c პარამეტრის, Q^2/k^2 ფარდობის, წყლასატრის ფსკერის i ქანობისა და კრიტიკული i_c ქანობების თანაფარდობის საფუძველზე, დადგენილია ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის წირის (დაცემის და შეტბორვის) ასიმპტოტები. განხილულია ნაკადის თავისუფალი ზედაპირების მრუდეთა ძირითადი ფორმები პრიზმულ კალაპოტებში ფსკერის პირდაპირი, ნულოვანი და უკუქანობების შემთხვევაში; ხოლო არათანაბარი მოძრაობის შემთხვევაში, ნაკადის სიღრმე შეიძლება მეტი იყოს ან ნაკლები ნორმალურ და კრიტიკულ სიღრმეებზე. განხილულია შესაძლო სამი ვარიანტი, ე.ი. როცა თავისუფალი ზედაპირის წირი მოთავსებულია a მიდამოში – ნორმალური სიღრმის NN წრფის ზემოთ, b მიდამოში, როცა მოთავსებულია ნორმალურ NN წრფესა და KK კრიტიკულ წრფეს შორის და C მიდამოში, როცა მოთავსებულია ფსკერსა და KK წრფეებს შორის (იხ. ნახ. 1; 2; 3; 4).



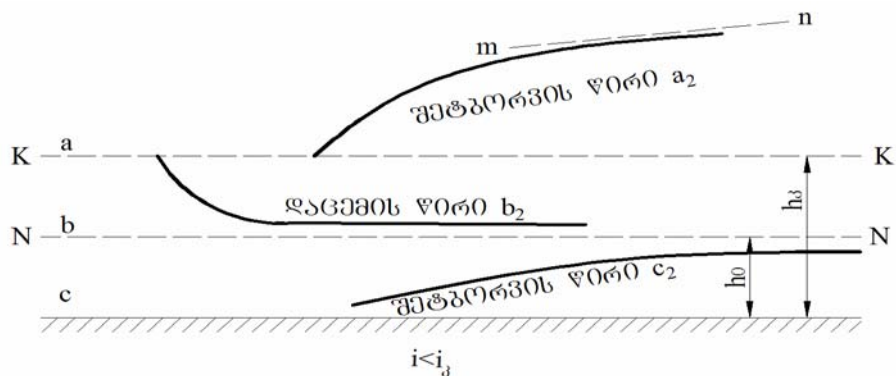
ნახ. 1. არათანაბარი მოძრაობა, როცა $i < i_c$ და $h > h_0$; a_1 – შეტბორვის წირი, b_1 – დაცემის (ვარდნის) წირი, c_1 – შეტბორვის წირი



ნახ. 2. წყალსაშვიანი კაშხალი a_1 თავისუფალი ზედაპირის წირი (შეტბორვის წირი)



ნახ. 3. არხის ბოლოში მოწყობილი საფეხური. b_1 დაცემის წირი



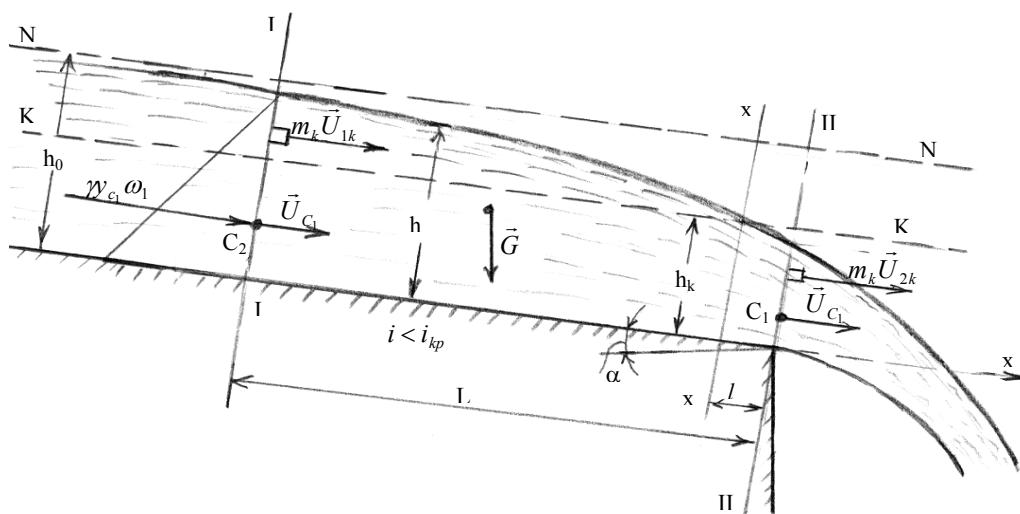
ნახ. 4. a_2 თავისუფალი ზედაპირის წირის მდებარეობა, როცა $h > h_0$. შეტბორვის წირი, b_2 – დაცემის წირი, c_2 – შეტბორვის წირი

მოყვანილი კვლევის საფუძველზე, ნაკადის თავისუფალი ზედაპირების ფორმების ვარიანტებით შესაძლებელია დავადგინოთ ნებისმიერი ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის წირის ფორმა. წყალსატარის საფეხურის კვეთის ქვემოთ წყლის ნაკადის დეფორმაციები და თავისუფალი ზედაპირების

წირების ფორმები ნაკლებადაა შესწავლილი, ამასთან ეს ამოცანები აქტუალურია ჰიდროტექნიკური ნაგებობების ჰიდრავლიკური განაგარიშებისათვის. ამ მიზნით, ჩატარებულია პრიზმულ კალაპოტში და საფეხურის ქვემოთ ნაკადის ჰიდრავლიკური პარამეტრების დასადგენად თეორიული კვლევები.

საფეხურის ქვემოთ წყლის ჭავლის ტრაექტორიის მოხაზულობა დამოკიდებულია მრავალ ფაქტორზე, მათ შორის წყალსატარის საფეხურის კვეთში ვერტიკალის გასწვრივ წყლის ნაკადის სიჩქარეთა განაწილებაზე. ამ კვეთში ვერტიკალზე სიჩქარეთა განაწილება და ჰიდროდინამიკურ წნევათა განაწილების სურათიც მკვეთრად განსხვავდება წყალსატარის საფეხურის ზემო კვეთებში სიჩქარეთა და წნევათა განაწილებისგან (იხ. ნახ. 6).

გამოკვლევები გვიჩვენებს, რომ არხის გრძივ პროფილში საფეხურის კვეთის მახლობელ რაიონში ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის წირის სიმრუდე იზრდება და ფაქტობრივად ნაკადის სიღრმე კრიტიკულს გაუტოლდება არა საფეხურის კვეთში, არამედ $x-x$ კვეთში, რომელიც მოთავსებულია საფეხურის ზემოთ (დინების საწინააღმდეგოდ) $l = (2 - 2,5)h_3$ მანძილზე (ნახ. 5). შევნიშნოთ, რომ l_x უბანზე და მის ქვემოთ ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის მნიშვნელოვანი სიმრუდის გამო, მის საანგარიშოდ ნაკადის მდოვრედ ცვალებადი მოძრაობისათვის მიღებული განტოლების და კრიტიკული სიღრმის გამოყენება არ შეიძლება.



ნახ. 5. წყალსატარში წყლის ნაკადის ჰიდრავლიკური ელემენტების განსაზღვრის საანგარიშო სქემა

პრიზმულ კალაპოტში საფეხურის ზემო (დინების საწინააღმდეგო) მიდამოში ნაკადის ჰიდრავლიკური მახასიათებლების დასადგენად, მოძრაობის რაოდენობის თეორემას აქვს შემდეგი სახე (ნახ.5):

$$\sum_{\kappa=1}^n (\Delta m_{\kappa} \cdot \vec{U}_{\kappa_2}) - \sum_{\kappa=1}^n (\Delta m_{\kappa} \cdot \vec{U}_{\kappa_1}) = \sum_{\kappa=1}^n \vec{R}_{\kappa} \cdot \Delta t, \quad (24)$$

სადაც Δm_{κ} არის ელემენტარული ნაწილაკის მასა; \vec{U}_{κ_1} და \vec{U}_{κ_2} - k -ური წერტილის გასაშუალოებული სიჩქარეები დროის t და $t + \Delta t$ მომენტებში;

\vec{R}_{κ} - k -ურ წერტილზე მოქმედი ყველა გარე ძალის ტოლქმედი;

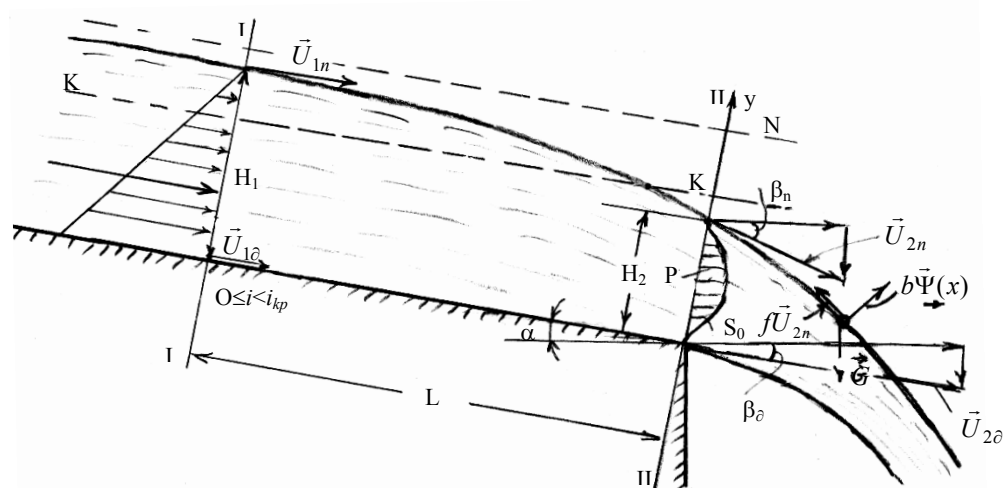
$m_{\kappa} \vec{U}_{\kappa_1}$ და $m_{\kappa} \vec{U}_{\kappa_2}$ - k -ური წერტილის მოძრაობის რაოდენობა დროის t და $t + \Delta t$ მომენტებში.

იმპულსების (24) განტოლება შეიძლება გადავწეროთ შემდეგი სახით:

$$M \vec{U}_{c_2} - M \vec{U}_{c_1} = \sum_{\kappa=1}^n \vec{R}_{\kappa} \cdot \Delta t, \quad (25)$$

სადაც $M = \sum_{\kappa=1}^n m_{\kappa}$ არის ნაკადის მთლიანი მასა;

\vec{U}_{c_1} და \vec{U}_{c_2} - დროის t და $t + \Delta t$ მომენტში მასათა ცენტრების სიჩქარეები, შესაბამისად I-I და II-II კვეთებში.



ნახ. 6. სიჩქარეთა განაწილების და ზედა ჭავლის ტრაექტორიის განტოლების მისაღები საანგარიშო სქემა

II-II კვეთში ფსკერულ და შუალედურ ჭავლათა სიჩქარეები გამოისახება შემდეგი სახით:

$$U_{2\partial} = \sqrt{2g \left(H_1 + \frac{U_{1\partial}^2}{2g} + iL - h_{f\partial} \right)} = \varphi_{\partial} \sqrt{2g \left(H_1 + \frac{\alpha_1 U_{1\partial}^2}{2g} + iL \right)}, \quad (26)$$

$$U_{2y} = \sqrt{2g \left(H_1 + \frac{U_{1y}^2}{2g} + iL - Y - \frac{P_{2y}}{\gamma} - h_{fy} \right)} = \varphi_y \sqrt{2g \left(H_1 + \frac{U_{1y}^2}{2g} + iL - Y - \frac{P_{2y}}{\gamma} \right)}, \quad (27)$$

სადაც Y არის II-II კვეთში ჭავლის ჩაღრმავება; P_{2y} - ჭავლის ცენტრში პიეზომეტრული დაწნევა II-II კვეთში. მიღებული დამოკიდებულებიდან ჩანს, რომ არსებული უცნობების გარდა, წარმოიშვა ახალი P_{2y} , β_n და β_y უცნობები, თუ არ მივიღებთ მხედველობაში აგრეთვე φ_n , φ_{∂} და φ_y უცნობებს. მამასადამე, ამოცანა კიდევ უფრო გართულდა.

P_{2y} - ის განსაზღვრისათვის დავუშვით, რომ ნაკადი არის პოტენციალურია და ნაკადში სიჩქარეები ექვემდებარება ფართობთა კანონს; მაშინ შეიძლება დავწეროთ:

$$U_{2yx} = \frac{r_n}{r_y} \cdot U_{2nx} = \frac{r_{\partial}}{r_y} \cdot U_{2\partial x}, \quad (28)$$

სადაც r_n და r_{∂} არის II-II კვეთში ზედა და ფსკერული ჭავლების სიმრუდის რადიუსები; r_y - იგივე შუალედური ჭავლისათვის.

(28) დამოკიდებულება წარმოადგენს II-II კვეთში სიჩქარეთა განაწილების კანონს. აქ r_n და r_{∂} უცნობი სიდიდეებია, რომელთა საზღვრებში უნდა იცვლებოდეს r_y უცნობი. ცხადია, ამ სიდიდეების განსაზღვრა შესაძლებელია, მაშინ, როცა გვეცოდინება ზედა, ფსკერული და შუალედური ჭავლების ტრაექტორიათა განტოლებები.

საფეხურის კვეთში წნევების განაწილების კანონს აქვს შემდეგი სახე:

$$P_y = \gamma \cdot \frac{\Delta V_y^2}{2g} = \gamma Y_n^2 z_0 \left(\frac{\varphi_y}{\varphi_n} \sqrt{1 - \frac{y}{z_0} - \frac{r_{\partial}}{r_y}} \right). \quad (29)$$

საფეხურიდან მირს ვარდნილი ნაკადის ზემოთა ზედაპირის ჭავლის ტრაექტორიის განტოლების მისაღებად შევადგინოთ მოძრაობის შემდეგი დიფერენციალური განტოლებები (იხ. ნახ. 6):

$$m \frac{d^2 x_n}{dt^2} = f U_{nx}^2 + b \Psi_x(x) + G \sin \alpha, \quad (30)$$

$$m \frac{d^2 y_n}{dt^2} = fU_{ny}^2 + b\Psi_y(x) - G \cos \alpha, \quad (31)$$

სადაც fU_n^2 არის ჭავლის გამოყოფილ ნაწილაკზე მოქმედი ჰაერის წინაღობის ძალა;

$\overline{b\Psi(x)}$ – ჭავლის ნაწილაკზე ნაკადის მხრიდან მოქმედი წნევის ძალა;

\vec{G} – ნაწილაკის სიმძიმის ძალა.

(30) და (31) განტოლებების ინტეგრირებით და საწყისი პირობების გამოყენებით, მივიღებთ:

$$x_n = \frac{f}{m} \int \int [U_{nx}^2 dt] dt + \frac{b}{m} \int \int [\Psi_x(x) dt] dt + \frac{gt^2}{2} \sin \alpha + U_{nx_0} t, \quad (32)$$

$$y_n = \frac{f}{m} \int \int [U_{ny}^2 dt] dt + \frac{b}{m} \int \int [\Psi_y(x) dt] dt + \frac{gt^2}{2} \cos \alpha + U_{ny_0} t - H_2. \quad (33)$$

(32) და (33) განტოლებები წარმოადგენს თავისუფლად ვარდნილი ნაკადის ზემოთა ზედაპირის ჭავლის მოძრაობის განტოლებებს. ცხადია, თუ ამ განტოლებებიდან გამოვრიცხავთ t პარამეტრს, მივიღებთ ტრაექტორიის განტოლებას.

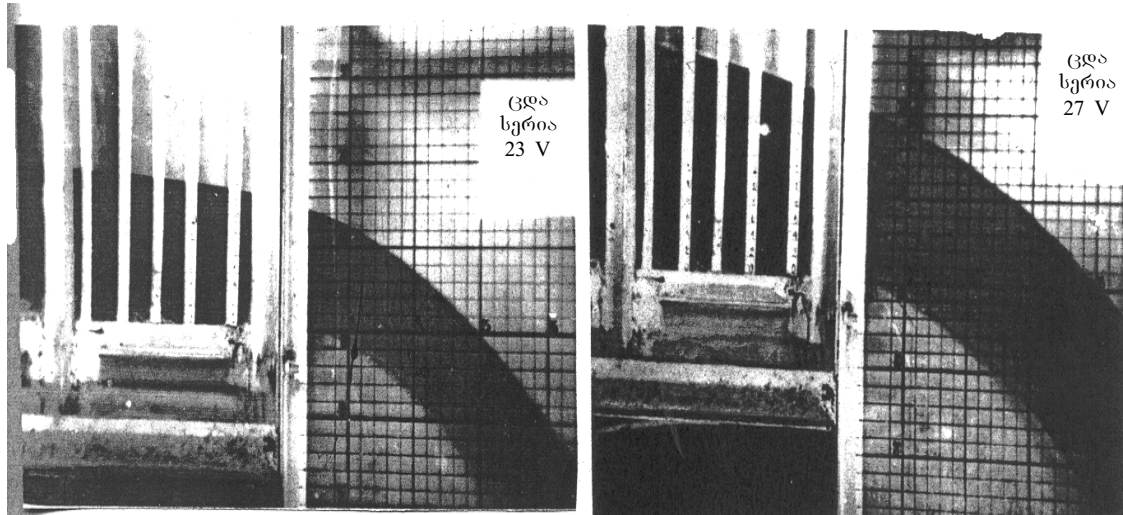
ანალოგიური მსჯელობით შეგვიძლია მივიღოთ ნაკადის ქვედა ზედაპირის და შუალედური ჭავლების მოძრაობისა და მათი ტრაექტორიების განტოლებებიც.

პრაქტიკული საინჟინრო ამოცანების გადასაწყვეტად საჭიროა ვიცოდეთ. რიგი ჰიდრავლიკური ელემენტები, როგორებიცაა: P_y , $\Psi(x)$, U_n , U_y და H_2 .

ამრიგად შეიძლება დავასკვნათ, რომ საჭიროა შემდგომი კვლევითი სამუშაოები ჩატარდეს ექსპერიმენტული მეთოდით.

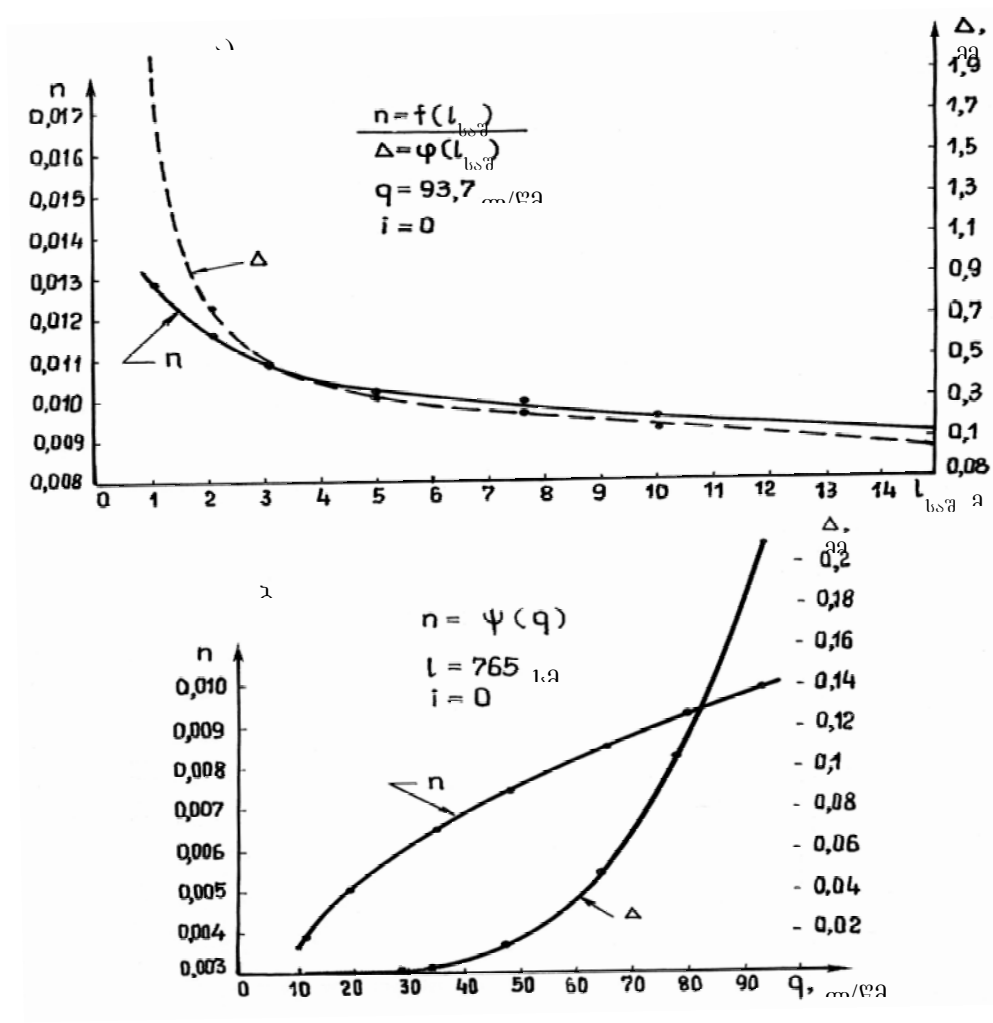
მესამე თავში მოცემულია პრიზმულ კალაპოტში თავისუფალი ზედაპირის მრუდების აგების გამარტივებული მეთოდი. ლიტერატურაში რეკომენდებულია თეორიული წინაპირობები და მსჯელობა სხვადასხვა განივკვეთის კალაპოტებში წყლის თავისუფალი ზედაპირის წირის ჰიდრავლიკური გაანგარიშების და ხასიათის შესახებ. მაგრამ ამ საფუძველზე ჩატარებული გამოთვლების საბოლოო შედეგების საიმედოობის შესახებ საუბარი ექსპერიმენტული მონაცემების და ნატურული გაზომვების საფუძველზე აგებული თავისუფალი ზედაპირის მრუდების აგების გარეშე, არარეალურია.

ნაკადის თავისუფალი ზედაპირების მრუდე და წყალსატარის საფეხურიდან თავისუფლად ვარდნილი წყლის ნაკადის ტრაექტორიის დასადგენად ჩატარდა მრავალრიცხოვანი ექსპერიმენტი. ანათვლების აღება ხდებოდა როგორც ვიზუალურად, ისე ფოტომასალების საშუალებითაც (ნახ. 7).



ნახ. 7. წყალსატარის (საფეხურიდან) თავისუფლად გადადინებული წყლის ნაკადის ხედი: ა) Q_1 ხარჯი, ფსკერის i_1 ქანობით; ბ) Q_2 ხარჯი, ფსკერის i_2 ქანობით

თავისუფალი ზედაპირის მრუდის აგების საკითხებისადმი მიძღვნილ ლიტერატურაში n კოეფიციენტი მანინგის ან პავლოვსკის ფორმულაში, რომლის მეშვეობით განისაზღვრება შეზის კოეფიციენტი C ან სიმქისის სიმაღლე Δ სმ, მოცემული კალაპოტისთვის არ არის დამოკიდებული წყლის ნაკადის კინემატიკურ ან დინამიკურ მახასიათებლებზე და წარმოადგენს მუდმივას – წყალსატარის უცვლელ მახასიათებელს.



ნახ. 8 ა. $n = f(l_{\text{საშ}})$ და $\Delta = \varphi(l_{\text{საშ}})$ ფუნქციონალური დამოკიდებულების გრაფიკი; ბ. $n = \psi(q)$ და $\Delta = g(q)$ ფუნქციონალური დამოკიდებულების გრაფიკები

ჩვენი ცდების მეშვეობით ამ მონაცემების შემოწმებისას, ძირითადად ნულოვანი ქანობის შემთხვევაში დადგინდა, რომ n და Δ წყალსატარის სიგრძის მიხედვით იცვლებოდა როგორც წყლის სიღრმე, ისე ხარჯი (ნახ. 8). 8. ა და 8. ბ ნახაზებზე აგებულია სითხის თავისუფალი ზედაპირის მრუდები. ცდების მონაცემების დამუშავების საფუძველზე, n და Δ -ს მნიშვნელობების გამოსათვლელად მიღებულია შემდეგი ემპირიული დამოკიდებულებები:

$$n = \frac{h_{\text{საშ}}^{1,67} \cdot \sqrt{I_{\text{საშ}}} \cdot B}{(1 + 2h_{\text{საშ}})^{0,67} \cdot Q}, \quad (34)$$

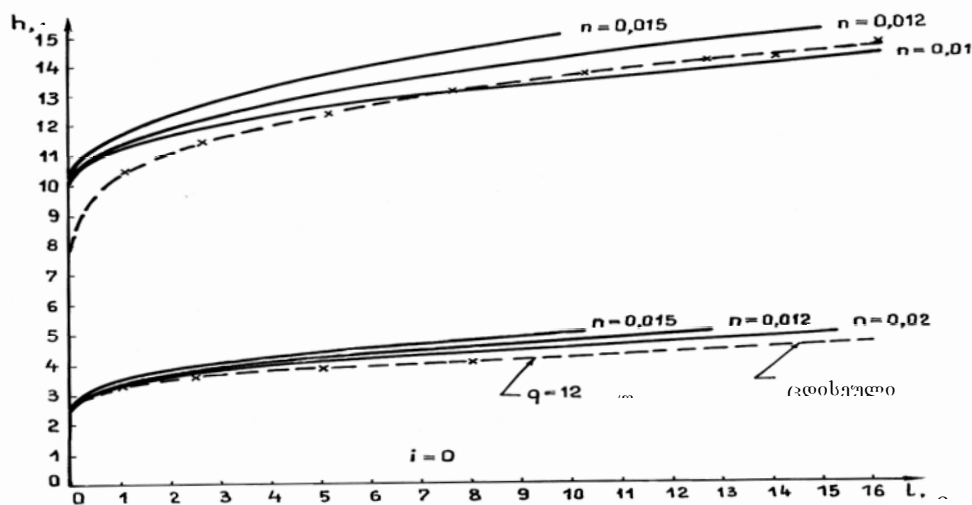
$$\Delta = 1.46 \cdot \frac{h_{\text{საშ}}}{1 + 2h_{\text{საშ}}} \cdot 10^{-\frac{Q(1+2h_{\text{საშ}})^{0.5}}{17.72h_{\text{საშ}}^{1.5} \cdot I_{\text{საშ}}^{0.5}}}, \quad (35)$$

სადაც $h_{\text{საშ}}$ წყლის ნაკადის საშუალო სიღრმეა მონაკვეთის განხილულ ნაწილში;

$I_{\text{საშ}}$ – ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის საშუალო დახრა (ქანობი) ამ მონაკვეთზე.

პრიზმულ კალაპოტში თავისუფალი ზედაპირის მრუდის ასაგები ბახმეტევის საანგარიშო ფორმულის და ცდისეული შედეგების შედარებისთვის მოგვყავს $i=0$, $Q_1=93.7$ ლ/წმ, $Q_2=20$ ლ/წმ, $Q_3=11.9$ ლ/წმ, შემთხვევისათვის, როდესაც $n_1=0.01$; $n_2=0.012$; $n_3=0.015$ (იხ. ნახ.8). წყვეტილი მრუდები აგებულია ჩვენი ცდის მონაცემების მიხედვით, ხოლო უწყვეტი – ბახმეტევის ხერხის მიხედვით, n კოეფიციენტის სხვადასხვა მნიშვნელობისთვის.

მე-9 ნახ-დან ჩანს, რომ ცდისეული მრუდები როგორც რაოდენობრივად, ისე თვისებრივად არ ემთხვევა გაანგარიშებულ მრუდებს, რომლებიც აგებულია ბახმეტევის მეთოდის მიხედვით.



ნახ. 9. ბახმეტევის საანგარიშო ფორმულის და ცდისეული შედეგების შედარების გრაფიკები

თუ დავყვარდნობით წყლის დინების მოვლენის ფიზიკას მართკუთხა განიკვეთის პრიზმულ წყალსატარში, რომელსაც ბოლო კვეთში აქვს საფეხური, მაშინ დინების გასწვრივ წყლის სიღრმე განპირობებული იქნება შემდეგი ძირითადი ფაქტორებით:

$$h = f(q, l, \Delta, v, g, i), \quad (36)$$

სადაც q წყლის კუთრი ხარჯია კალაპოტში, მ²/წმ; ℓ – მანძილი საფეხურიდან კალაპოტის განხილულ კვეთამდე; Δ - ფსკერის სიმქისის სიმაღლე, მ; v - წყლის სიბლანტის კინემატიკური კოეფიციენტი, მ²/წმ; g – თავისუფალი ვარდნის აჩქარება, მ²/წმ; i – წყალსატარის ფსკერის დახრა, უგანზომილებო სიდიდე.

მრავალცვლადიანი ფუნქციური (36) დამოკიდებულების მოდელის განსაზღვრისათვის გამოვიყენოთ II თავში მოყვანილი მრავალფაქტორიანი ფუნქციონალური დამოკიდებულებების მოდელის გამოვლენის ხერხი.

მაგრამ უნდა აღვნიშნოთ, რომ ჩვენს ცდებში Δ, v და g მუდმივი სიდიდეებია. (35) ფორმულის მიხედვით განსაზღვრული Δ -ს საშუალო მნიშვნელობაა 0.43 მმ; თუ $t=19^0$, მაშინ ცნობარების თანახმად, $v=1,035 \cdot 10^{-6}$ მ²/წმ; $g=9,81$ მ²/წმ.

ექსპერიმენტული მონაცემების შედეგების მიხედვით დადგინდა, რომ კმაყოფილება შემდეგი კრიტერიუმები:

$$\frac{h_{q,\ell_1,i} - h_{q,\ell_2,i}}{h_{q,\ell_3,i} - h_{q,\ell_4,i}} = A_1; \quad \frac{h_{q_1,\ell,i} - h_{q_2,\ell,i}}{h_{q_3,\ell,i} - h_{q_4,\ell,i}} = A_2;$$

$$\frac{h_{q_2,\ell,i} - h_{q,\ell_2,i}}{h_{q_1,\ell_3,i} - h_{q,\ell_2,i}} = A_3; \quad \frac{h_{q_1,\ell_1,i} - h_{q_2,\ell_1,i}}{h_{q_3,\ell_1,i} - h_{q_4,\ell_1,i}} = A_4.$$

ეს კრიტერიუმები აკმაყოფილებს, უფრო სწორად, მიუთითებს, რომ (36) დამოკიდებულების მოდელი არის შემდეგი ფუნქციური დამოკიდებულება:

$$h = f_1(q) \cdot f_2(i) + f_3(q) \cdot f_4(i) \cdot f_5(\ell). \quad (37)$$

ნაკადის დინების ფიზიკა და (37) მოდელის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ პირველი შესაკრები $f_1(q) \cdot f_2(i)$ არის საფეხურის კვეთაში ნაკადის h სიღრმე და ცხადი სახით არ არის დამოკიდებული ნაკადის v სიბლანტეზე, ფსკერის Δ სიმქისეზე და სიმძიმის ძალის g აჩქარებაზე; მეორე შესაკრები უდავოდ არის (36) დამოკიდებულებაში შემავალი ყველა ფაქტორის ფუნქცია, ე.ი.

$$h - h_0 = \varphi(q, \ell, \Delta, v, g, i). \quad (38)$$

ცდის მონაცემებისა და წყალსატარის საფეხურის რაიონში ნაკადის დინების პროცესის ანალიზის თანახმად, წყლის სიღრმე წყალსატარის საფეხურის ზემოთ შეიძლება განსაზღვროთ შემდეგი ემპირიული დამოკიდებულებით:

$$h_0 = \left(0,77 + 0,228 \cdot \frac{i}{i_j} \right) \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}} = \left(0,77 + 0,23 \cdot \frac{i}{i_j} \right) h_j, \quad (39)$$

სადაც h_j ნაკადის კრიტიკული სიღრმეა

$$h_j = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}};$$

i_j კრიტიკული ქანობი განისაზღვრება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$i_j = \frac{q^2 n^2 (1 + 2h_j)^{1,33}}{h_j^{3,33}}.$$

მეორე შესაკრების გაშიფვრის მიზნით, გამოვიყენეთ თეორემა (II), რომლის საფუძველზე მივიღეთ:

$$\begin{aligned} \frac{h-h_0}{h_j} &= C \cdot f_4(i) \cdot \left(\frac{\ell}{h_j} \right)^y \cdot \frac{\Delta^{i-y} \cdot g^{\frac{1}{3}(1-y)}}{v^{\frac{2}{3}(1-y)}} \cdot \left(\frac{g\Delta^3}{v^2} \right)^v = \\ &= C \cdot f_4(i) \cdot \left(\frac{\ell}{h_j} \right)^y \cdot \left(\frac{g\Delta^3}{v^2} \right)^{v+\frac{1}{3}(1-y)}. \end{aligned} \quad (40)$$

ჩვენი ცდების თანახმად, ნაკადის კრიტიკული სიღრმე h_j მიიღება საფეხურიდან ℓ_j მანძილზე; ℓ_j დამოკიდებულია q, v, Δ და g -ზე.

განზომილების მუდმივობის პრინციპის საფუძველზე, მივიღეთ:

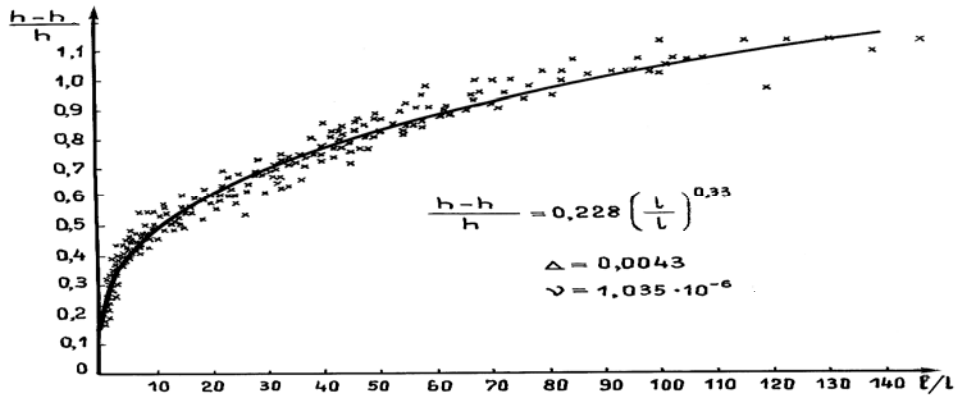
$$\ell_k = B \left(\frac{q}{v} \right)^{x_1} \left(\frac{g\Delta^3}{v^2} \right)^{u_1} \cdot \Delta.$$

აქ B , x_1 და u_1 მუდმივი სიდიდეებია, რომლებიც უნდა განისაზღვროს ექსპერიმენტულად; რადგან ჩვენს ცდებში Δ, v და g მუდმივი სიდიდეებია, ამიტომ ექსპერიმენტების თანახმად, გვექნება $x_1 = 0,67$. თუ შევცვლით $q^{0,67} = \sqrt[3]{g} \cdot h_j$, მივიღებთ:

$$\ell_j = B \left(\frac{g\Delta^3}{v^2} \right)^{u_1} \cdot \frac{\Delta \cdot \sqrt[3]{g}}{v^{0,67}} \cdot h_j = 4,46 h_j. \quad (41)$$

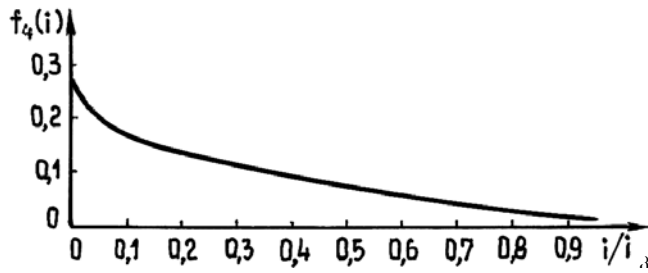
თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ ჩვენს ცდებში $v = 1,035 \times 10^{-6}$ მ²/წმ, $\Delta = 0,433$ მმ, მაშინ $i = 0$ შემთხვევაში მივიღებთ (ნახ. 10)

$$\frac{h-h_0}{h_k} = 0,228 \left(\frac{\ell}{\ell_k} \right)^{0,33}. \quad (42)$$

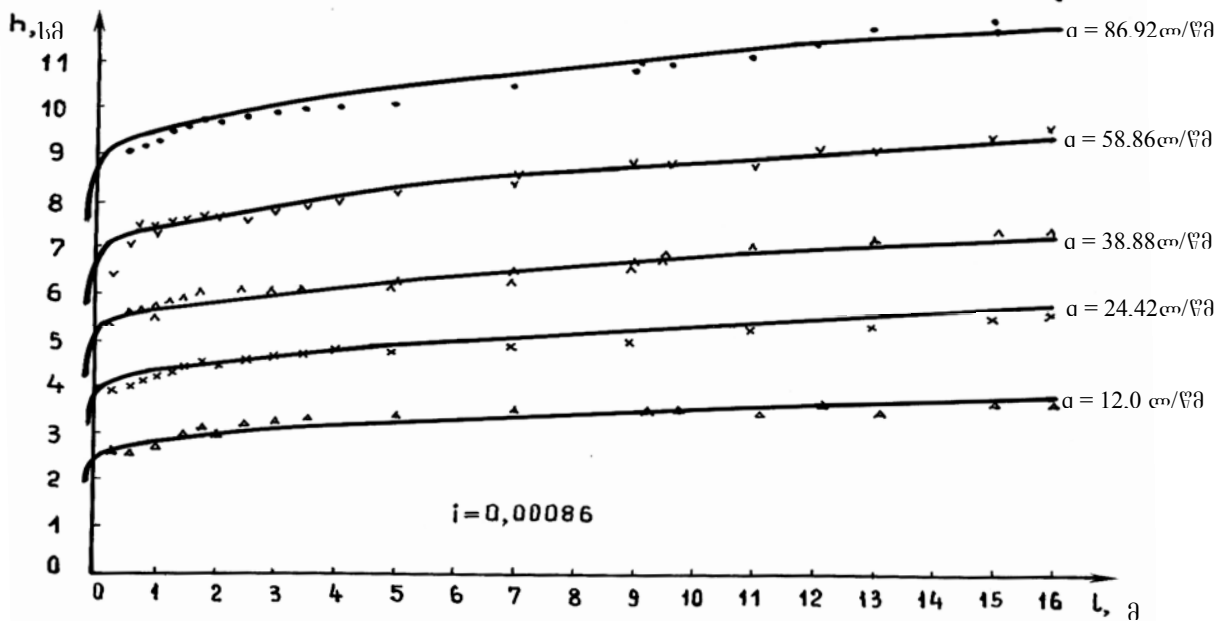


ნახ. 10. $f\left(\frac{h-\ell_0}{h_d}\right) = f\left(\frac{\ell}{\ell_d}\right)$ ფუნქციონალური დამოკიდებულების გრაფიკი

ხოლო, თუ $i > 0$, მაშინ ცდის მონაცემების თანახმად, (50)-ს ეწევა შემდეგი სახე (ნახ. 11):



(ნახ. 11): $f_4(i) = f\left(\frac{i}{i_d}\right)$ ფუნქციონალური დამოკიდებულების გრაფიკი



ნახ. 12. ცდის მონაცემის და (43) თანაფარდობის შედარების გრაფიკი

$$\frac{h - \left(0,77 + 0,23 \cdot \frac{i}{i_j} \right) \cdot h_k}{h_j} = 0,228 \left[1 - \left(\frac{i}{i_j} \right)^{0,61} \right] \cdot \left(\frac{\ell}{\ell_j} \right)^{0,33} \quad (43)$$

ცდის შედეგებისა და (43) თანაფარდობის მიხედვით მიღებული მონაცემების შედარება საკმაოდ კარგ თანხვედრას იძლევა (ნახ. 12); ამიტომ, იგი რეკომენდებულია წყლის ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის მრუდების ასაგებად მართკუთხა განივკვეთის საკმაოდ ფართო პრიზმული კალაპოტებისთვის, როცა $\Delta = 0,9$ მმ და $\nu = 1,035 \cdot 10^{-6} \text{მ}^2/\text{წმ}$.

უნდა აღინიშნოს, რომ (43) თანაფარდობის მიხედვით შეიძლება განისაზღვროს არა მარტო ნაკადის სიღრმე, არამედ მოცემული სიღრმის მიხედვით განისაზღვრება ის მანძილი საფეხურის კვეთიდან, სადაც გვექნება მოცემული სიღრმე. ამისათვის (43) შეიძლება გადავწეროთ შემდეგი სახით:

$$\ell = \left\{ \frac{\left[h - \left(0,77 + 0,23 \frac{i}{i_j} \right) \cdot h_j \right] \cdot \ell_j^{0,33}}{0,228 h_j \left[1 - \left(\frac{i}{i_j} \right)^{0,61} \right]} \right\}^{3,03}, \quad (44)$$

ან თუკი მოცემულია წყლის ნაკადის სხვადასხვა კვეთში (1-1 და 2-2) ორი სიღრმე, მაშინ (44) თანაფარდობის მიხედვით შეიძლება განვსაზღვროთ მათ შორის მანძილი და საჭიროების შემთხვევაში, წყლის ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის მრუდი ავაგოთ დაწყებული არა ნულოვანი კვეთიდან (საფეხურის კვეთი), არამედ წყალსატარის ნებისმიერი სხვა კვეთიდან.

ცდის მონაცემებისა და (43)–(44) თანაფარდობის მონაცემების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ:

1. ღია კალაპოტში წყლის ნაკადის ნორმალური დინების რეჟიმი შესაძლებელია მხოლოდ კრიტიკული მდგომარეობისას. ყველა სხვა შემთხვევაში თუ $0 < i < i_j$, პრაქტიკულად დინების ნორმალურ რეჟიმს ადგილი არ ექნება. თეორიულად მას შეიძლება ჰქონდეს ადგილი უსასრულო სიგრძის კალაპოტში;
2. $i = i_j$, $h = h_0 = h_j = \text{const}$ პირობებში, კალაპოტის მთელ სიგრძეზე დინება ნორმალურ-კრიტიკულია;

პრიზმულ კალაპოტებში ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის მრუდების აგება შესაძლებელია როგორც ცნობილი მრავალი მეთოდით, ისე ჩვენ მიერ შემოთავაზებული გამარტივებული მეთოდით. მაგრამ ჰიდროტექნიკური მშენებლობის მრავალი ამოცანის განხილვისას, საჭიროა ნაკადის თავისუფალი ზედაპირების ფორმები დადგინდეს, საფეხურის ქვემოთ ნაკადის დინების გასწვრივ. ეს ამოცანები სათანადო დონეზე არ არის გამოკვლეული და მოითხოვს შემდგომ კვლევას.

მესამე თავში ჩატარებულია კვლევა ამოცანის გადასაწყვეტად თეორიული მეთოდით, მაგრამ წყალსატარის საფეხურის ქვემოთ ვარდნილი ნაკადის ტრაექტორიის აღმწერი განტოლების მიღება დიდ სირთულეებთანაა დაკავშირებული. ძირითადი სირთულე ისაა, რომ საწყისი პირობები წარმოადგენს ერთმანეთისაგან დამოუკიდებელი ისეთი პარამეტრების ფუნქციებს, როგორებიცაა: ნაკადის სიღრმე, ხარჯი და სიჩქარე, წყალსატარის განივი კვეთის ფორმები, ფსკერის ქანობი, სიმქისე და სხვ.

ამოცანის გადასაწყვეტად ექსპერიმენტები ჩატარდა მართკუთხა განივკვეთის ჰიდრაულიკურ ღარში. ღარის ფსკერის ქანობი იცვლებოდა $i = 0 \div 0,1$ საზღვრებში, ხოლო წყლის ნაკადის კუთრი ხარჯი – $q = 0 \div 451$ ლ/წმ საზღვრებში.

საანგარიშო დამოკიდებულებების მისაღებად გამოიყენება შეზღუდული კლასიკური გეგმა, მაგრამ ცდები ჩავატარეთ სრული კლასიკური გეგმის შესაბამისად, რაც საშუალებას იძლევა შევამოწმოთ შეზღუდული კლასიკური გეგმის გამოყენებით მიღებული საანგარიშო დამოკიდებულებების მართებულობა.

წყალსატარის საფეხურის ქვევით ვარდნილი ნაკადის ზედა ჭავლის მოძრაობის ტრაექტორიის განტოლებას შეიძლება ჰქონდეს შემდეგი სახე:

$$y_n + H_2 = f(q, \rho, \mu, x, i, \Delta). \quad (45)$$

თუ გამოვიყენებთ განზომილებათა თეორიას, მივიღებთ:

$$\frac{y_n + H_2}{\Delta} = \varphi \left[\left(\frac{q\rho}{\mu} \right)^{\alpha_1}, \left(\frac{x}{\Delta} \right)^{\alpha_4}, i^{\alpha_5} \right], \quad (46)$$

სადაც $\rho = const$, $\mu = const$, $\Delta = const$.

(46) დამოკიდებულების მოდელის განსაზღვრისათვის ვისარგებლოთ მეორე თავში მოყვანილი მეთოდით, რომლის თანახმად დადგენილია, რომ კმაყოფილდება (12) კრიტერიუმი, ამიტომ (46)-ის მოდელს ექნება (13) ნამრავლის სახე:

$$\frac{y_n + H_2}{\Delta} = \varphi_1\left(\frac{q}{v}, i\right) \cdot \varphi_2\left(\frac{x}{\Delta}\right) = \varphi_1\left(\frac{q}{v}\right) \cdot \varphi_2\left(\frac{x}{\Delta}\right) \cdot \varphi_3(i). \quad (47)$$

(46) ფუნქციონალური დამოკიდებულების ცხადი სახით წარმოდგენა შეიძლება ჩვენ მიერ მიღებული (20) ფორმულის საფუძველზე და გვექნება:

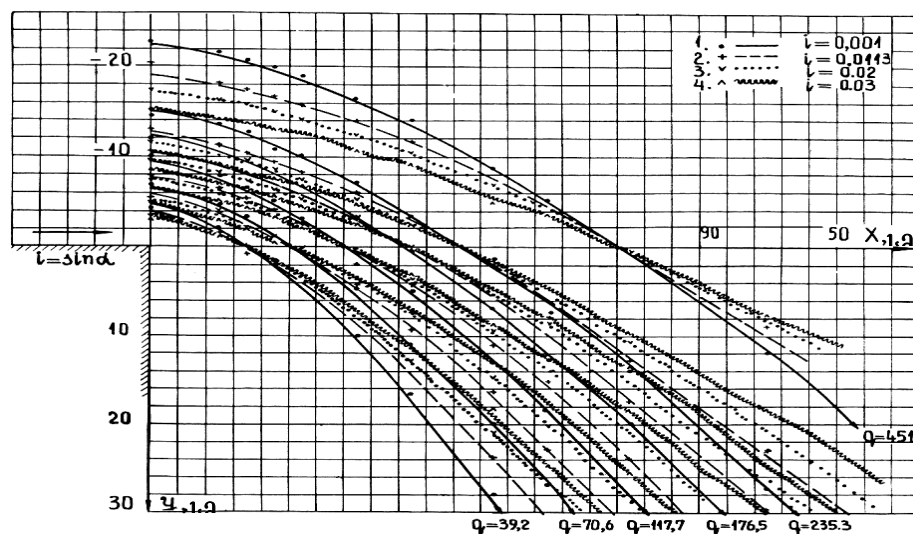
$$y_n = \frac{x^{1,52}}{(1,08 + 18,84i)q^{0,354}} - \frac{q^{0,64}}{2,18 + 36,08i}, \quad (48)$$

ანუ

$$\frac{y_n + H_2}{\Delta} = \frac{1,69}{1,08 + 18,84i} \left(\frac{x}{\Delta}\right)^{1,52} \cdot \left(\frac{v}{q}\right)^{0,354}.$$

მართკუთხა განივკვეთის წყალსატარებისათვის, როცა $\Delta = 0,026$ სმ, $v = 0,01$ სმ²/წმ (47) ემპირიული ფორმულით შემოწმებამ ძალიან კარგად აღწერა თავისუფლად ვარდნილი წყლის ნაკადის ზედა ჭავლების ტრაექტორიები.

უმნიშვნელო ცდომილებას აქვს ადგილი წყალსატარის საფეხურის რაიონში. საშუალო კვადრატული გადახრაა $\sigma = 0,356$, ხოლო ცდომილება $l = 0,256$ სმ (იხ. ნახ. 13).



ნახ. 13. საფეხურიდან ვარდნილი წყლის ნაკადის ზემოთა ზედაპირის ჭავლის ტრაექტორიები

ჩატარებული ცდების მონაცემების საფუძველზე, ანალოგიური მსჯელობით მიღებულია ნაკადის ქვედა თავისუფალი ზედაპირის ჭავლის ტრაექტორიის განტოლება, რომელსაც აქვს შემდეგი სახე:

$$y_H = \frac{x^{1,52}}{(1,08 + 18,84i)q^{0,354}}, \quad (49)$$

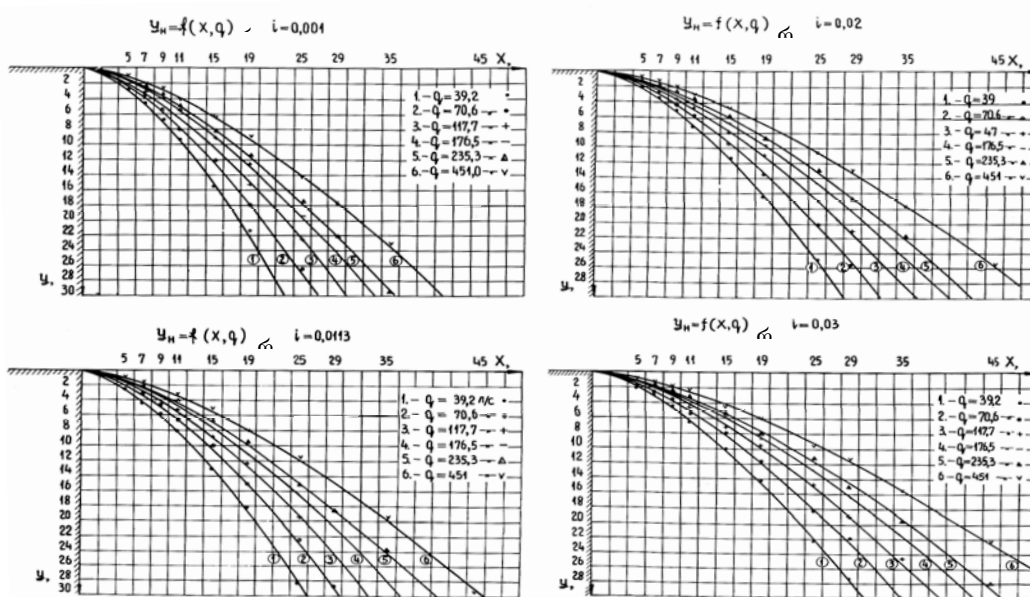
ანუ

$$\frac{y_H}{\Delta} = \frac{1,69}{1,08 + 18,84i} \cdot \left(\frac{x}{\Delta}\right)^{1,52} \cdot \left(\frac{v}{q}\right)^{0,354}.$$

(49) ემპირიული განტოლება აღწერს წყალსატარის საფეხურის ქვევით ვარდნილი წყლის ნაკადის ქვედა თავისუფალი ზედაპირის ჭავლის ტრაექტორიის განტოლებას იმ შემთხვევაში, თუ წყალსატარის განივ კვეთს აქვს მართკუთხედის ფორმა, ამასთან $v = 0,01$ სმ²/წმ, $\Delta = 0,026$ მმ.

მოყვანილი (49) ემპირიული ფორმულით გამოთვლილი შედეგების სრული კლასიკური გეგმით ჩატარებული ცდების შედეგებთან შედარება გვაძლევს კარგ თანხვედრას (ნახ. 14); ამასთან $\sigma^2 = 0,131$, $\sigma = 0,356$, $l = 0,258$ სმ. მაქსიმალური გადახრა 3,1 მმ-ია.

(49) განტოლების გამოყენება შეიძლება სხვადასხვა ჰიდროტექნიკური ნაგებობების ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისათვის, როგორცაა პრაქტიკული მოხაზულობის წყალსაშვიანი კაშხალი, კონსოლური წყალვარდნილები და სხვ.



ნახ. 14. საფეხურის ქვევით ვარდნილი ნაკადის ზედაპირის ჭავლის ტრაექტორიები

ძირითადი დასკვნები და რეკომენდაციები

1. გამოყვანილია საანგარიშო დამოკიდებულებები წყლის ნაკადის გეომეტრიული და კინემატიკური პარამეტრების განსაზღვრისათვის ფსკერის ნულოვანი და პირდაპირი დახრის შემთხვევებში.
2. პრიზმატულ არხ-კალაპოტებში წყლის ნაკადის ჰიდრაულიკური და გეომეტრიული პარამეტრების უგანზომილებო კომბინაციებს შორის კავშირი განსაზღვრულია განზომილებათა თეორიის გამოყენებით.
3. ცხრილით მოცემული მრავალცვლადიანი ფუნქციონალური დამოკიდებულების მოდელის განსასაზღვრავად დამუშავებულია შეზღუდული კლასიკური გეგმა, მიღებულია მოდელის დასადგენი კრიტერიალური პირობები, აგრეთვე სამიხილადი ფუნქციონალური დამოკიდებულების ანალიზური სახით ჩასაწერი ფორმულები.
4. შეზღუდული კლასიკური გეგმის გამოყენებით მიღებული ემპირიული ფორმულებით საკმაო სიზუსტით აღწერს მოვლენის ფიზიკას და სრული კლასიკური გეგმით მოცემულ მონაცემებს.
5. ექსპერიმენტული მონაცემების გამოყენებით განსაზღვრულია კოეფიციენტები და ხარისხის მაჩვენებლები საანგარიშო ფორმულებისათვის, პრიზმატულ კალაპოტებში წყლის დინების წყნარი რეჟიმისას მისი გეომეტრიული და ჰიდრაულიკური მახასიათებლების განსასაზღვრავად.
6. პრიზმატულ არხ-კალაპოტების ფსკერის ნულოვანი და პირდაპირი დახრის შემთხვევებში, წყლის ნაკადის არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებების ინტეგრირებით მიღებულია ფუნქციონალური დამოკიდებულება, რომელიც საშუალებას იძლევა არხის ნებისმიერ კვეთში განვსაზღვროთ წყლის სიღრმე და ავადგომთ თავისუფალი ზედაპირის მრუდი.
7. პრიზმატულ არხ-კალაპოტის საფეხურის კვეთში გასაზღვრული საწყისი პირობებისა და ექსპერიმენტული მეთოდის გამოყენებით მიღებულია საანგარიშო დამოკიდებულებები, რომლებიც აღწერს საფეხურიდან თავისუფლად ვარდნილი ნაკადის ზედა და ქვედა ზედაპირების ჭავლის ტრაექტორიებს და მთლიანად ნაკადის ტრაექტორიას.

8. მიღებული შედეგები მნიშვნელოვნად ამარტივებს და აზუსტებს პრიზმული სარწყავი და საშრობი არხ-კალაპოტების ჰიდრავლიკურ განგარიშებას წყლის ნაკადის არათანაბარი მდოვრედ ცვლადი მოძრაობის შემთხვევებისათვის.

დისერტაციის ძირითადი შინაარსი გამოქვეყნებულია შემდეგ ნაშრომებში:

1. **Квициани Т.А., Руруа Л.Г.**, Методика исследования кинематики ниспадающей струй. //Научно-технический журнал «Строительство», №4(19), Тбилиси, 2010, с. 42-48.
2. **Квициани Т.А., Руруа Л.Г.**, Вывод уравнения траектории верхней струйки потока ниже створа уступа водовода. // Научно-технический журнал «Строительство», №4(19), Тбилиси, 2010, с.61-68.
3. **რურუა ლ.** პრიზმულ კალაპოტში თავისუფალი ზედაპირის მრუდების აგების გამარტივებული მეთოდი. // სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი „მშენებლობა“, №1(20), თბილისი 2011წ, გვ. 15-21.

Simplified method to plot the curves of the free water current surface in prismatic bed

Summary

Hydraulic calculation is of great significance for any engineering project to construct reclamation construction or hydraulic facilities.

Any type of design of a reclamation construction usually covers hydraulic calculations: (a) when designing the network of channels provided they operate in the same mode; (b) to determine the shape and nature of the free current surface in case of the current irregular motion due to some reason; (c) when designing individual structures over the reclamation channels.

The guarantee for the trouble-free operation of the reclamation works network is the correct hydraulic calculation and construction of the kind of network-channel consistently specifying the free surface of the water surface in the irrigation and drying channels. The dissertation work is dedicated to this topical problem.

The work gives the existing formulae and problems of hydraulic calculation of smooth water flow in prismatic channels and beds, as well as the classification of problems of hydraulic calculation of smooth flow in trapezoidal channels.

The work uses widely known methods of experimental and theoretical studies, as well as methods of dimension theory and experimental design methods by using the limited classical

design, what allows significantly reducing the number of experiments, deducing calculation correlations to determine a number of geometric and kinematic properties to plot a curve of the free water current surface in prismatic beds.

During the laboratory studies and field observations, it becomes necessary to find a model of a functional relation with multiple variables, which will give at least an approximate description of the sought multi-variable function. For this purpose, the work gives the criterial conditions to determine a model of functional relation with multiple variables given in the table. According to the model specified by the given criteria, an analytical relation, which is to set down explicitly, of the sought functional relation with multiple variables for every specific hydraulic problem is gained.

Based on the described method, by using a complete and limited classical design, based on the experimental data, the empirical formulae are gained, which describe the physics of the phenomenon quite accurately.

The work gives the differential equations of irregular motion of the current changing smoothly in the prismatic bed, which describe the curve of the free current surface in case of direct, zero and reverse slopes of the bottom of the waterway. The work also gives a general differential equation of the liquid motion with variable discharge when the liquid discharge is added and extracted from the main current at the same time. The given equation is used to gain the differential equations of the liquid motion with variable discharges for every possible particular case of a prismatic bed.

The above-mentioned equations of the liquid motion in a prismatic bed are investigated for the direct, zero and reverse slopes of the bottom, and the results of the investigation are used to demonstrate the perspectives to use the differential equations of a smoothly changing movement of the liquid. For example, if the current shifts from the rigorous state to a smooth state, there occurs a hydraulic jump, and when the current shifts from the smooth state to a rigorous state, there forms a waterfall, i.e. for the depths close to the critical depth, a significant number of ripples are observed. So, the given equations are impossible to use for the areas of waterfalls or hydraulic jumps.

The work includes the investigation of the shape of the free current surfaces in a prismatic bed. In the beds with the bottoms with direct slopes, the location between the straight lines of normal and critical depths depends on the ratio of the bed longitudinal slope to the critical slope. In this connection, the work considers every possible particular case and identifies the location of lines of flooding and fall in relation to the straight lines of normal and critical depths. For zero and inverse slopes of the bottom, the location of lines of flooding and fall in relation to the critical depth straight line is identified. In addition, in every particular case, we may have only one shape of a line of a free surface. We must note that the literary sources

widely consider the study of the shapes of free current surface, but the present work specifies some moments, in particular, the liquid motion with a variable discharge, etc.

A theoretical investigation of the kinematics of the current in the prismatic bed and falling from the step of the prismatic bed is given. Following the results of the given studies, it is established that it is impossible to theoretically specify the numerical value of some parameters of the relations describing the line of the free current surface. So, the solution to the practical engineering problems has necessitated further research with an experimental method.

Numerous experiments are conducted and are used to gain calculation relations to determine the geometric and kinematic elements of the current for zero and direct slope of the bottom of the waterway for the watercourses with prismatic channel-beds.

The empirical formulae to determine the roughness coefficient for the channel wall and change of the lug value with the dependence on the distance from the waterway step and water discharge are gained. In addition, the location of the critical depth of water current is determined during the smooth flow in the prismatic bed according to the specific water discharge, lug height and kinematic coefficients of roughness and water viscosity.

The calculation relation to determine the water depth in the section of the waterway step is gained according to the specific water discharge, slope of the bottom of the waterway and kinematic coefficients of roughness and water viscosity.

A general relation to determine the water current depth to plot the free water surface, and the relation to determine the distance from the step section where the given depth is the case is gained. The given relation may be used to determine the distance between any two sections and plot the line of free surface of the water current if necessary, starting not from a zero section (step section), but from any section of the waterway.

The equations describing the trajectories of the ripples of upper and lower surfaces of the water current overflowing (with free fall) from the waterway step are gained. The experiments are conducted according to the complete classical design, what allows examining the righteousness of the gained calculation relations gained by using a limited classical design.

The results of the study significantly simplify and essentially specify the hydraulic calculation of the smooth irregular motion of the smooth water flow in beds and channels.

The recommended method to calculate prismatic beds and channels can be used successfully to calculate the drying channels on Kolkheti Valley, particularly in case of channels with a horizontal bottom.