საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ზ. დანელია, თ. ამბროლაძე, მ. თოფურია

ჰიდრავლიკა, ჰიდროლოგია, ჰიდრომეტრია

დამტკიცებულია სახელმძღვანელოდ
სტუ-ს სარედაქციო-საგამომცემლო
საბჭოს მიერ. 06.06.2013, ოქმი №3

თბილისი
2013

უაკ 532.551.48:627.133

განხილულია წყალსამეურნეო საქმიანობასთან დაავშირებული ძირითადი თეორიული და პრაქტიკული საკითხები: ჰიდრავლიკის საფუძვლები, ჰიდროლოგიის ამოცანები, ჰიდრომეტრიულ კვლევათა მეთოდები და ხელსაწყოები, ხიდებისა და საგზაო მილების ჰიდრავლიკური გაანგარიშების მეთოდები.

შედგენილია პროგრამის სრული შესაბამისობით. განკუთვნილია სამშენებლო ფაკულტეტის სტუდენტებისათვის.

რეცენზენტები: სრული პროფესორი ნ. კოდუა,
სრული პროფესორი ზ. ციხელაშვილი

© საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2013
ISBN 978-9941-20-380-0
http://www.gtu.ge/publishinghouse/

ყველა უფლება დაცულია. ამ წიგნის ნებისმიერი ნაწილის (ტექსტი, ფოტო, ილუსტრაცია თუ სხვა) გამოყენება არც ერთი ფორმითა და საშუალებით (ელექტრონული თუ მექანიკური), არ შეიძლება გამომცემლის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

საავტორო უფლებების დარღვევა ისჯება კანონით.

სახელმძღვანელო ეძღვნება
ჰიდრავლიკის კათედრის ღვაწლმოსილ
პროფესორ არკადი პაპაშვილის ხსოვნას

თავი I. ჰიდრავლიკის, ჰიდროლოგიისა და ჰიდრომეტრიის საბანი

ჰიდრავლიკა, ჰიდროლოგია და ჰიდრომეტრია დისციპლინებია, რომლებიც ძირითადად ემსახურება სითხის თვისებებისა და წყლის ბუნებრივი რესურსების შესწავლის, წყალთან დაკავშირებული საინჟინრო ნაგებობების დაგეგმარებისა და წყალსამეურნეო ღონისძიებების განხორციელების საერთო საქმეს. ასე, რომ ისინი ორგანულადაა ურთიერთდაკავშირებული, რამაც შესაძლებელი გახადა სათანადო სპეციალობებისათვის გამაერთიანებელი საგნის შემოთავაზება: "ჰიდრავლიკა, ჰიდროლოგია ჰიდრომეტრია, საგზაო წყალგამტარ ნაგებობათა ჰიდრავლიკური გაანგარიშება".

ჰიდრავლიკა არის მექანიკის ერთ-ერთი დარგი, რომელიც შეისწავლის სითხეების წონასწორობისა და მოძრაობის კანონებს და შეიმუშავებს სათანადო მეთოდებს ამ კანონების პრაქტიკული გამოყენებისათვის სხვადასხვა საინჟინრო ამოცანის გადასაწყვეტად. ჰიდრავლიკას ორ ნაწილად ყოფენ: ჰიდროსტატიკა და ჰიდროდინამიკა. პირველი შეისწავლის სითხის წონასწორობის პირობებს და მის ურთიერთქმედებას მყარ სხეულებთან, ხოლო მეორე-ნაკადის მოძრაობის კანონებს. ხშირად ჰიდრავლიკის მეორე ნაწილს მიაკუთვნებენ სითხის კინემატიკასაც, რომელიც განიხილავს სითხეების მოძრაობის შესაძლო სახეებსა და ფორმებს ამ მოძრაობის გამომწვევი მიზეზების გარეშე.

ჰიდრავლიკის კანონები ქმნის სახალხო მეურნეობის ისეთი მნიშვნელოვანი დარგების საფუძველს, როგორიცაა: ჰიდროტექნიკა, წყლის ტრანსპორტი, სარკინიგზო და საავტომობილო ტრანსპორტი, წყალმომარაგება და კანალიზაცია, მიწების მორწყვა და დაშრობა, ჰიდრავლიკური მანქანები, ჰიდრომექანიზაცია და სხვა.

ჰიდროლოგია მიეკუთვნება მეცნიერებათა ჯგუფს, რომელიც შეისწავლის დედამიწის ჰიდროსფეროს ატმოსფეროსთან, ლითოსფეროსა და ბიოსფეროსთან ურთიერთკავშირს [6]. ჰიდროსფერო შეიძლება წარმოვიდგინოთ წყლის წყვეტილ გარსად, რომელიც განლაგებულია ატმოსფეროსა და დედამიწის ქერქს შორის და

შეადგენს ოკეანეების, ზღვების, ტბების, მდინარეების, ჭაობების, მყინვარებისა და მიწისქვეშა წყლების ერთობლიობას.

ჰიდროლოგიის შესწავლის ობიექტების მრავალფეროვნებამ და სირთულემ განაპირობა ამ მეცნიერების დიფერენციაცია მეტ-ნაკლებად დამოუკიდებელ ნაწილებად: **ხმელეთის ჰიდროლოგია** შეისწავლის ხმელეთის ზედაპირულ წყლებს (მდინარეები, ტბები, წყალსაცავები, ჭაობები, მყინვარები); ზოგიერთი კლასიფიკაციით მას მიეკუთნება აგრეთვე დედამიწის ქერქის ზედა ფენებში არსებული ბუნებრივი მიწისქვეშა წყლები. **ოკეანის ჰიდროლოგია** (ოკეანოლოგია) აერთიანებს მეცნიერულ დისციპლინებს, რომლებიც სწავლობს ოკეანეებსა და ზღვებში მიმდინარე ფიზიკურ, ქიმიურ, გეოლოგიურ და ბიოლოგიურ პროცესებს. **მიწისქვეშა წყლების ჰიდროლოგია** (ჰიდროგეოლოგია) ერთდროულად მიეკუთვნება როგორც გეოლოგიის, ისე ჰიდროლოგიის დარგს; ჰიდროგეოლოგია შეისწავლის მიწისქვეშა წყლებს.

სამშენებლო სპეციალობები ჰიდროლოგიას განიხილავს საინჟინრო თვალსაზრისით; მათი პრაქტიკული მიზანია ადამიანის სახალხო-სამეურნეო შემოქმედებაში ჰიდროლოგიური პროცესების რაციონალური გამოყენება. საგზაო-სატრანსპორტო ნაგებობების სპეციალობის პროფესიული ინტერესის ძირითადი სფეროა ხმელეთის ზედაპირული წყალნაკადები, ამიტომ შესაბამისი სპეციალობის სტუდენტები შეისწავლიან ჰიდროლოგიის მხოლოდ იმ საკითხებს, რომლებიც მიეკუთვნება ხმელეთის, უფრო ზუსტად კი მდინარეთა ჰიდროლოგიას.

ჰიდრომეტრია არის მეცნიერება, რომელიც შეისწავლის წყლის ობიექტებზე დაკვირვებისა და ჰიდროლოგიური მახასიათებლების გაზომვის მეთოდებს, დაკვირვებათა მონაცემების დამუშავების ხერხებს, გაზომვებისათვის საჭირო სპეციალურ ხელსაწყოებსა და მოწყობილობებს; ამჟამად ჰიდრომეტრიას მიიჩნევენ ჰიდროლოგიასთან ორგანულად დაკავშირებულ დამოუკიდებელ მეცნიერებას.

ჰიდრავლიკის, ჰიდროლოგიისა და ჰიდრომეტრიის შესწავლისას იყენებენ ექსპერიმენტული (ლაბორატორიული, ნატურული) და თეორიული გამოკვლევების მეთოდებს. ისინი ცალ-ცალკე თუ ერთიანობაში ეყრდნობა მრავალ თეორიულ და გამოყენებით დისციპლინას.

ჰიდრავლიკის, ჰიდროლოგიისა და ჰიდრომეტრიის როლი სახალხო, კერძოდ საგზაო-სახიდე მეურნეობის განვითარების სფეროში ფრიად მნიშვნელოვანია. ამ შემთხვევაში საგნის, როგორც გამოყენებითი მეცნიერების, ძირითადი მიზანია ბუნებრივ

თუ ხელოვნურ წყალნაკადებთან სატრანსპორტო გზების გადაკვეთებზე შესაბამისი წყალგამტარი ნაგებობების გამოკვლევა-დაგეგმარება. ამ ნაგებობათა სახეობა თუ კონსტრუქცია მრავალგვარია, მეტწილად საჭიროა გავითვალისწინოთ: საგზაო მილი, მცირე (საშუალო) ხიდი ან მსხვილი სახიდე გადასასვლელი. მათი უსაფრთხო ფუნქციონირება და საიმედოობა, როგორც წესი, განსაზღვრავს სატრანსპორტო ქსელის ეფექტურობასა და შეუფერხებლობას. მეტი სიცხადისათვის დავძენთ რომ საავტომობილო გზების თითოეულ კილომეტრზე საშუალოდ მოდის ერთი წყალგამტარი მილი ან პატარა ხიდი; მთაგორიან რაიონებში ეს რიცხვი აღწევს 3...5-ს. ზემოთქმულიდან ნათელია მოცემული საგნის პასუხსაგები როლი და ადგილი. იმისათვის, რომ წინასწარი (საერო) წარმოდგენა შეგვექმნას საგნის ლოგიკურ მთლიანობაზე, მაგალითისათვის გავყვეთ სახიდე გადასასვლელის განხორციელების საინჟინრო თანამიმდევრობას. დაპროექტების საწყის ეტაპზე შეირჩევა მდინარესთან გადაკვეთის ხელსაყრელი გასწორი და წყალგამტარი ნაგებობის ტიპი; ამისათვის, სხვა განმსაზღვრელ პირობებთან ერთად ეფუძვნებიან წინასწარ მონაცემებს მდინარის წყლიანობისა და სხვა ჰიდროლოგიურ მახასიათებლებზე. შემდგომ, ჰიდრომეტრიულ სამუშაოთა ორგანიზაციის შედეგად ხდება მდინარის ჰიდროლოგიური მახასიათებლების შესწავლა შერჩეულ კვეთში (სიღრმე h, სიგანე B, სიჩქარე V, ხარჯი Q და სხვა). ეს მონაცემები, უახლოესი ჰიდრომეტრიული სადგურის მრავალწლიან დაკვირვებებთან ერთად, საშუალებას იძლევა გავიანგარიშოთ შერჩეული ნაგებობის კლასის შესაბამისი საანგარიშო ჰიდროლოგიური მახასიათებლები. მათ საფუძველზე ხდება სახიდე გადასასვლელის ჰიდრავლიკური გაანგარიშება, გადაწყვეტილად და საბუთდება ნაგებობის შერჩეული ტიპი, განისაზღვრება მისი მთავარი ზომები და ნიშნულები: მალების ჯამური სიგრძე (b_1+b_2), შეტბორვა ხიდის წინ ∇_2, მალის ნაშენის ქვედა ნიშნული ∇_3, მისასვლელი ყრილების სიმაღლის ზომა ∇_4, საერთო და ადგილობრივი წარეცხვის რაოდენობა ∇_5, ხიდის ბურჯების საძირკვლის ჩაღრმავება ∇_6 და სხვა.

თავი II. საბნის განვითარების მოკლე მიმოხილვა

ხმელეთის ზედაპირული წყლების გამოყენებას ძველი და ღრმა ფესვები აქვს: წყალს ყოველთვის ჰქონდა და აქვს კაცობრიობისათვის გადამწყვეტი მნიშვნელობა. მდინარეები, ტბები და ზღვები, რომელთა მახლობლად ადამიანი სახლდებოდა, იყო მისი განვითარების ძირითადი საფუძველი. საკმარისია გავიხსენოთ ძველი ცივილიზაციები მესოპოტამიაში (მდ. ტიგროსისა და ევფრატის აუზები), მდ. ნილოსის დაბლობზე, ამუდარიის, რიონის, არაქსის აუზებში და სხვა. ადამიანის წყალსამეურნეო საქმიანობის მრავალმა ნიმუშმა ჩვენამდეც მოაღწია: დაახლოებით 5000 წლის ისტორია აქვს კოშეინის ქვის კაშხალს ეგვიპტეში; ამავე პერიოდისაა ქვის წყობის ჭები, რომლებიც გალერეებით იყო შეერთებული მდ. ნილოსთან და მისი დონის აღრიცხვა ხდებოდა ჭის კედელზე დატანილი ნიშნულებით; ჩვენს წელთაღრიცხვამდე 500 წლით ადრე ტარდებოდა სარეგულაციო სამუშაოები ტიგროსთან და ევფრატამდე; ძვ. ა. VI–III საუკუნეებში რომის იმპერიაში შენდებოდა უნიკალური წყალსადენი სისტემები აკვედუკების ფართო გამოყენებით (ისინი ახლაც იწვევს გაოცებას); თანამედროვე ჰოლანდიის ტერიტორიაზე მაცხოვრებლები ოდითგანვე ებრძვიან ზღვის შემოტევას ჯებირების მეშვეობით; კავკასიისა და აზიის რესპუბლიკებში აღმოჩენილია სარწყავი არხების ნაშთები, რომლებიც ძვ.ა. პირველი ათასწლეულს მიეკუთვნება; მდინარეების, ტბებისა და ზღვების აღწერებს ვხვდებით ძველ ლიტერატურულ წყაროებში: მაგალითად, პლინიუსი (29–79 წწ.) მდ. ფაზისის (რიონის) შესახებ წერს, რომ "...იგი სანაოსნოა დიდი გემებისათვის..., პატარა გემებით ასვლა შეიძლება უფრო ზევითაც. ფაზისზე აშენებულია 120 ხიდი"; ადამიანები უხსოვარი დროიდან აწარმოებენ დაკვირვებებს მდინარეთა დონეებზე; ჰიდრომშენებლობის გამორჩეულ ნიმუშად მიიჩნევენ XII საუკუნის ალაზნისა (199კმ) და სამგორის (20 კმ) სარწყავ არხებს; დაახლოებით ამ პერიოდს განეკუთვნება ვარძიის სამონასტრო კომპლექსის წყალმომარაგების კლდეში გამოკვეთილი 3,5 კმ სიგრძის გვირაბი; ძველად ხიდების მშენებლობის მაღალი განვითარების უტყუარი ნიმუშია პომპეუსის ხიდი

მცხეთასთან და ა.შ. შეიძლება უამრავი ისტორიული მაგალითის მოყვანა.

კაცობრიობის წყალსამეურნეო საქმიანობის უდიდესმა გამოცდილებამ თანდათან მიგვიყვანა ცალკეულ განზოგადებებთან ჰიდრავლიკური კანონების სახით. ერთ-ერთი პირველი ნაშრომი ჰიდრავლიკაში, რომელიც წარსულმა შემოგვინახა და რომელშიც პირველადაა მოცემული სითხეში სხეულის ცურვისა და ტივტივის თეორიის საფუძვლები, არის არქიმედეს ტრაქტატი "მცურავი სხეულების შესახებ" (250 წელი ძვ. ა.).

არქიმედეს შემდეგ თითქმის 16 საუკუნემ განვლო, სანამ გამოჩნდებოდა შრომები ჰიდრავლიკაში. ამ თვალსაზრისით, უნდა აღინიშნოს ლეონარდო და ვინჩის (1452–1519), სტევინის (1548–1620), გალილეის (1564–1642), ტორიჩელის (1642–1727) და სხვათა შრომები. მათ დიდი როლი შეასრულეს ჰიდრავლიკის ცალკეული ნაწილების განვითარების საქმეში, თუმცა ჰიდრავლიკამ, როგორც დამოუკიდებელმა დისციპლინამ, ჩამოყალიბება დაიწყო პეტერბურგის მეცნიერებათა აკადემიის აკადემიკოსების მ.ლომონოსოვის (1711–1765), დ.ბერნულის (1700–1782) და ლ. ეილერის (1707–1783) შრომების შემდეგ. დ. ბერნულმა 1738 წელს გამოსცა კაპიტალური ნაშრომი "ჰიდროდინამიკა". რომელშიც მოცემულია ზოგადი დამოკიდებულება სითხის ნაწილაკების მდებარეობას, სითხეში წნევასა და ნაწილაკების მოძრაობის სიჩქარეს შორის. მ. ლომონოსოვმა 1748 წელს აღმოაჩინა მასისა და ენერგიის შენახვის (მუდმივობის) კანონი. რითაც შექმნა თეორიული საფუძველი ჰიდროდინამიკის შემდგომი განვითარებისათვის. ლ. ეილერმა 1755 წელს მოგვცა იდეალური სითხის წონასწორობისა და მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებები.

ევროპაში ჰიდრავლიკის თეორიული საფუძვლების პრაქტიკული გამოყენება დაკავშირებულია ფრანგი მეცნიერების – შეზის, დარსის, ვენტურის, ბაზენის და სხვათა ღვაწლთან.

რუსეთში ამ პერიოდში და რანდენადმე უფრო მოგვიანებით გამოდის ი. გრომეკას (1951–1889), ნ. პეტროვის (1836–1920), ნ. ჟუკოვსკის (1847–1921) კლასიკური შრომები, რომლებიც ეხება ხრახნული ნაკადების, შეზეთვის თეორიის, ჰიდრავლიკური დარტყმის, ფილტრაციის, სითხეების წინაღობისა და ჰაერნაოსნობის საკითხებს.

ჰიდროლოგიის განვითარების უმნიშვნელოვანესი პერიოდი იწყება XVI საუკუნის ბოლოდან, როდესაც ფრანგმა (პერო, მარიოტი) და ინგლისელმა (გალილეი) მეცნიერებმა ნალექების, აორთქლებისა და ჩამონადენის უშუალო გაზომვათა საფუძველზე პირველებმა ჩამოაყალიბეს წყლის ბრუნვის მთავარი რაოდენობრივი თანაფარდობები.

ჰიდროლოგია-ჰიდრომეტრიულ გამოკვლევათა და ჰიდრომშენებლობის განვითარების საქმეში მნიშვნელოვანია პეტრე I-ის ეპოქა: მდინარეებზე დაიწყო სისტემატური გამოკვლევები, 1715 წ. მოეწყო პირველი წყალსაზომი საგუშაგო მდ. ნევაზე, მდ. ოკა არხით დაუკავშირდა მდ. დონს და სხვა. დიდია ბუნებრივი წყლების შესწავლის საქმეში მ. ლომონოსოვის ღვაწლი. უდიდესი ღვაწლი დასდო საქართველოს ბუნების შესწავლას ვახუშტი ბაგრატიონმა.

წყალსამეურნეო მშენებლობის დაჩქარებული წინსვლა აღინიშნება XIX და, განსაკუთრებით, XX საუკუნის განმავლობაში: წყლის რესურსების ჰიდროლოგიურ-ჰიდრომეტრიულ შესწავლას ეძლევა სისტემატური მეცნიერული ხასიათი, სწრაფად იზრდება მორწყვითი მიწათმოქმედება, შენდება უნიკალური ჰიდრონაგებობები (მათ შორის ხიდები), ფართოდ ინერგება წყალმომარაგება და ჰიდროენერგეტიკა. 1919 წ. პეტერბურგში ჩამოყალიბდა სახელმწიფო ჰიდროლოგიური ინსტიტუტი, რომელმაც ითავა წყლის რესურსების კვლევის ერთიანი სისტემით წარმართვა, მეთოდური ხელმძღვანელობა და წყლის რაციონალური გამოყენების მეცნიერული დასაბუთება. ჰიდროლოგია-ჰიდრომეტრიის განვითარების ყველაზე ნაყოფიერი პერიოდი იწყება ერთიანი ჰიდრომეტეოროლოგიური სამსახურის ჩამოყალიბების დღიდან (1929 წ.), როდესაც ახალი თვისებრივი იმპულსი მიეცა წყლის რესურსების შესწავლის საქმეს. 1929–1931 წლებში პირველად გაიხსნა უმაღლესი და საშუალო სპეციალური სასწავლებლები ჰიდროლოგიის ინჟინერ-ტექნიკოსების მოსამზადებლად.

დღეისათვის ჩვენთან შექმნილია ამ პროფილის მრავალი უმაღლესი ტექნიკური სასწავლებელი და სამეცნიერო-კვლევითი ინსტიტუტი.

პირველი განყოფილება

ჰიდრავლიკა

თავი III. ზოგადი ცნობები სითხეების შესახებ

§ 3.1. სითხის უმთავრესი ფიზიკური თვისებები

სითხე არის ფიზიკური სხეული, რომელსაც შუალედური აგრეგატული მდგომარეობა უკავია აირისებრ და მყარ სხეულებს შორის. წნევის ან ტემპერატურის ცვლილებით ის შეიძლება გადავიდეს აირისებრ ან მყარ მდგომარეობაში.

სითხე ხასიათდება ორი ძირითადი თვისებებით:

1. **ის ძალიან მცირედ იცვლის მოცულობას** წნევისა და ტემპერატურის ცვლილებით. აირისაგან განსხვავებით სითხის მოცულობა არ განისაზღვრება ჭურჭლის მთლიანი მოცულობით;
2. **არ გააჩნია საკუთარი ფორმა** და ღებულობს იმ ჭურჭლის ფორმას, რომელშიც იმყოფება, ე.ი ხასიათდება დენადობით (ამით განსხვავდება მყარი სხეულისაგან და ემსგავსება აირს), მაგრამ აქვს გარკვეული ფორმის თავისუფალი ზედაპირი, რომელიც აირს არ გააჩნია. ეს უკანასკნელი თვისება **(დენადობა)** განპირობებულია იმით, რომ წონასწორობაში მყოფი სითხე ვერ უწევს წინააღმდეგობას შინაგან მხებ, ე.ი. ძვრის ზედაპირის გასწვრივ მოქმედ ძალებს.

აირი ასევე ხასიათდება დენადობით, მაგრამ სითხისაგან განსხვავებით კუმშვადია, არ გააჩნია თავისუფალი ზედაპირი და მთლიანად ავსებს მისთვის განკუთვნილ მოცულობას. სითხისა და აირის დენადობის საერთო თვისება მათ აერთიანებს "სითხის" საერთო სახელწოდებით. ამიტომ, ხშირად აირს **აირისებრ სითხეს** უწოდებენ, ხოლო თვით სითხეს – **წვეთოვან სითხეს**. ჰიდრავლიკის კვლევის ობიექტია წვეთოვანი სითხე; შემდგომ სითხეში უმეტეს შემთხვევაში წყალს ვიგულისხმებთ.

1. **კუთრი (მოცულობითი) წონა (γ).** ერთგვაროვანი სითხის კუთრი წონა ეწოდება მისი ერთეული მოცულობის წონას და განისაზღვრება G სითხის წონის ფარდობით W მოცულობასთან:

$$\gamma = \frac{G}{W} \tag{3.1}$$

კუთრი წონის განზომილებაა: MKS სისტემაში - კგძ/მ^3; Si სისტემაში – $\frac{ნ}{მ^3}$.

მტკნარი წყლის კუთრი წონა +4°C ტემპერატურის დროს

$$\gamma = 1000 \frac{კგძ}{მ^3} = 9810 \frac{ნ}{მ^3}.$$

2. **სიმკვრივე (ρ).** ერთგვაროვანი სითხის სიმკვრივე ეწოდება მისი ერთეული მოცულობის მასას და განისაზღვრება სითხის მასის ფარდობით W მოცულობასთან:

$$\rho = \frac{m}{W}. \tag{3.2}$$

სიმკვრივის განზომილებაა: MKS სისტემაში – $\frac{კგძ \cdot წმ^2}{მ^4}$; Si სისტემაში – $\frac{კგ}{მ^3}$.

მტკნარი წყლის სიმკვრივე +4^0 C ტემპერატურის დროს

$$\rho \approx 102 \quad \frac{კგძ \cdot წმ^2}{მ^2} = 1000 \frac{კგ}{მ^3}.$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ G=mg, მაშინ (3.1) გამოსახულებიდან

$$\gamma = \frac{G}{W} = \frac{mg}{W} = \frac{m}{W} g,$$

ე.ი.

$$\gamma = \rho g. \tag{3.3}$$

3. **სითხის კუმშვადობა.** ექსპერიმენტი გვიჩვენებს, რომ სითხე დიდ წინააღმდეგობას უწევს თანაბარ და ყოველმხრივ კუმშვას. სითხის კუმშვადობა ხასიათდება მოცულობითი კუმშვის კოეფიციენტით (β_p), რომელიც გამოსახავს W სითხის მოცულობის ფარდობით ცვლილებას მასზე წნევის ერთი ერთეულით ცვლილების შემთხვევაში

$$\beta_p = -\frac{1}{W} \frac{dW}{dp}. \tag{3.4}$$

ნიშანი ”–” გამოსახულებაში მიუთითებს იმაზე, რომ წნევის გაზრდით სითხის მოცულობა მცირდება.

β_p კოეფიციენტის შებრუნებულ სიდიდეს სითხის მოცულობითი დრეკადობის მოდული ეწოდება:

$$K = \frac{1}{\beta_p}. \qquad (3.5)$$

წყლისათვის 500 ატმ-მდე წნევისა და ჩვეულებრივი ტემპერატურის (0....20^{0}C) პირობებში $K = 22 \cdot 10^8$პა.

აღნიშნულიდან გამომდინარეობს, რომ ჩვეულებრივ პირობებში წნევის ცვლილებისას სითხე პრაქტიკულად არ იცვლის მოცულობას. ამიტომ, ჰიდრავლიკაში სითხე განიხილება, როგორც უკუმშველი სხეული (სითხის კუმშვადობის გათვალისწინების აუცილებლობა იქმნება სითხის მექანიკის მხოლოდ ზოგიერთი საკითხის განხილვისას, მაგალითად, ჰიდრავლიკური დარტყმის მოვლენის განხილვას).

4. სითხის ტემპერატურული გაფართოება. სითხის თვისებას, შეიცვალოს მოცულობა ტემპერატურის ცვლილებით, ტემპერატურული გაფართოება ეწოდება. ეს თვისება ხასიათდება ტემპერატურული გაფართოების კოეფიციენტით (β_t), რომელიც გამოსახავს სითხის W მოცულობის ფარდობით ცვლილებას ტემპერატურის 1°C-ით გაზრდის დროს

$$\beta_t = -\frac{1}{W}\frac{dW}{dt}. \qquad (3.6)$$

წყლის, ტემპერატურის 0-დან 1000^0-მდე, ხოლო წნევის 1-დან 900 ატმ-მდე ცვლილებისას, β_t იცვლება 0,000014...0,000621 ფარგლებში.

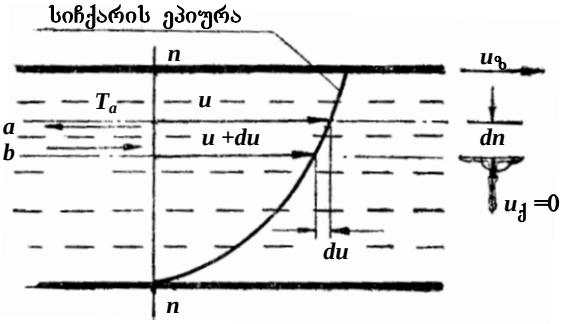
5. სითხის სიბლანტე (შიგა ხახუნი). სითხის თვისებას, წინააღმდეგობა გაუწიოს თავისივე ნაწილაკების ფარდობით ძვრას მოძრაობის შემთხვევაში, **სიბლანტე ან შიგა ხახუნი** ეწოდება.

საკითხის ფიზიკური არსის გასარკვევად დავუშვათ, რომ სითხეს უკავია სივრცე ორ ჰორიზონტალურ ფირფიტას შორის, რომელთაგან ქვედა უძრავია ($U_ჟ$=0), ხოლო ზედა მოძრაობს ქვედას პარალელურად მუდმივი $U_გ$ სიჩქარით (ნახ. 3.1). ზედა ფირფიტა, მოძრაობის დაწყებიდან გარკვეული დროის შემდეგ, წარიტაცებს სითხის იმ ნაწილაკებს, რომლებიც უშუალოდ ეხება მის ზედაპირს და მიანიჭებს საკუთარ $U_გ$ სიჩქარეს. ეს ადასტურებს სითხის ნაწილაკებსა და ფირფიტას შორის ურთიერთქმედების ფაქტს. ასეთი სახის ურთიერთქმედებას **სითხის გარე ხახუნი** ეწოდება.

ფირფიტის მიმდებარე ნაწილაკები, თავის მხრივ, მოძრაობაში მოიყვანს მახლობლად მდებარე ნაწილაკებს და წარიტაცებს

რამდენადმე ნაკლები სიჩქარით და ა.შ. ეს იმას მოწმობს, რომ თვით სითხის ნაწილაკებს შორისაც აღიძვრება მხები ურთიერთქმედება მათი შეხების სიბრტყის გასწვრივ. მსგავს ურთიერთქმედებას **შიგა ხახუნი** ეწოდება.

შეიძლება წარმოვიდგინოთ, რომ ფირფიტებს შორის მოთავსებული სითხის მთელი მასა შედგება უსასრულო რაოდენობის მცირე სისქის შრეებისაგან, რომელთა საზღვრებიც 3.1 ნახაზზე ნაჩვენებია წყვეტილით. შრეების მოძრაობის სიჩქარე n-n ნორმალის გასწვრივ იცვლება უწყვეტად $U=U_ჟ=0$-დან $U=U_გ$-მდე (სიჩქარეთა ეპიურა მოცემულია 3.1 ნახაზზე). ნაკადის ასეთმა მოძრაობამ მიიღო ლამინარული (შრეებრივი) მოძრაობის სახელწოდება.



ნახ. 3.1

განვიხილოთ სითხის ორი მეზობელი a და b შრე. მანძილი მათ ღერძებს შორის აღვნიშნოთ dn-ით. ხოლო სიჩქარეები, შესაბამისად, u-თი და (u+du)-თი, a შრე, რომელიც უფრო მეტი სიჩქარით მოძრაობს, ცდილობს წარიტაცოს b შრე, ეს უკანასკნელი კი ამუხრუჭებს a შრის მოძრაობას. შემდეგ აღნიშნულ შრეებს შორის წარმოიქმნება ხახუნის ძალები (T_a და T_b), რომელთაც თითოეული შრის მიმართ შესაბამისი მიმართულება ექნება.

ნიუტონის ჰიპოთეზის თანახმად, ხახუნის ძალა (T) ორ მეზობელ შრეს შორის, წრიული კვეთის მილსადენებში, ლამინარული მოძრაობის დროს (ნახ. 3.2) გამოითვლება ფორმულით:

$$T = \pm\mu\frac{du}{dn}S. \qquad (3.7)$$

აქედან

$$\tau = \frac{T}{S} = \pm\mu\frac{du}{dn}, \tag{3.8}$$

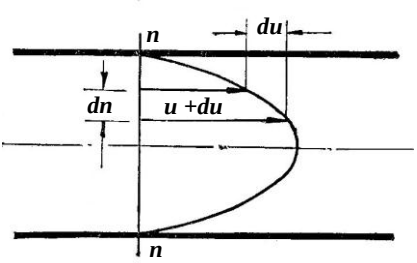
სადაც S არის შრეების შეხების ზედაპირის ფართობი;

τ – ხახუნის ძალა ერთეულ ფართობზე (მხები ძაბვა), ნ/მ^2;

μ – სიბლანტის დინამიკური კოეფიციენტი, ნ.წმ/მ^2;

$\frac{du}{dn}$ – სიჩქარის გრადიენტი ნორმალის n-n გასწვრივ.

"+" ან "–" (3.8) გამოსახულებაში აიღება $\frac{du}{dn}$ სიჩქარის გრადიენტის ნიშნის გათვალისწინებით ისე, რომ τ ყოველთვის იყოს დადებითი (3.1 ნახაზზე $\frac{du}{dn} < 0$, ხოლო 3.2 ნახაზზე $\frac{du}{dn} > 0$).



ნახ. 3.2

სიბლანტის დინამიკური კოეფიციენტი მოცემული სითხისათვის დამოკიდებულია მხოლოდ მის ტემპერატურაზე და, ჩვეულებრივ პირობებში, პრაქტიკულად არ არის დამოკიდებული წნევისა და სიჩქარის გრადიენტზე.

ჰიდრავლიკურ გაანგარიშებებში ხშირად სარგებლობენ ν **სიბლანტის კინემატიკური კოეფიციენტით** (ეს სახელწოდება კოეფიციენტმა მიიღო განზომილების გამო, რომელშიც შედის მხოლოდ კინემატიკური მახასიათებლები), რომელიც გამოითვლება სიბლანტის დინამიკური კოეფიციენტის შეფარდებით სითხის სიმკვრივესთან.

$$\nu - \frac{\mu}{\rho} \text{ მ}^2/\text{წმ}. \tag{3.9}$$

აქვე უნდა აღვნიშნოთ, რომ (3.8) გამოსახულებას კოლოიდური ხსნარებისა და "პლასტიკური" სითხეებისათვის უნდა დაემატოს τ_0 წევრი, რომელსაც "ძვრის ძაბვას" უწოდებენ

$$\tau = \tau_0 \pm \mu\frac{du}{dn}. \tag{3.10}$$

τ_0 არის მხები ძაბვის ის ზღვრული მნიშვნელობა, რომლის გადალახვის შემდეგაც განსახილველი სითხე მოვა მოძრაობაში შესაბამისი სიჩქარის გრადიენტით.

სითხეს, რომელიც (3.8) კანონს ემორჩილება ნიუტონისეული ეწოდება, ხოლო მას, რომლისთვისაც მართებულია (3.10) დამოკიდებულება – **ბინგემისეული**.

6. კაპილარობა. სითხის თვისებას, აიწიოს ან დაიწიოს მცირე დიამეტრის მილაკებში (კაპილარებში) ზედაპირული დაჭიმულობის ძალების გავლენით, **კაპილარობა** ეწოდება.

20°C ტემპერატურის წყლის დროს მილაკის d(მმ) დიამეტრისა და კალაპოტური აწევის h(მმ) სიმაღლეს შორის დამოკიდებულებას ასეთი სახე აქვს:

$$hd \approx 30 \text{მმ}^2;$$

ვერცხლისწყლისათვის (t=20°C)

$$hd = 10{,}15 \text{მმ}^2.$$

აქ h კალაპოტური დაწევის სიმაღლეა.

§ 3.2. სითხის განსაკუთრებული მდგომარეობა

ჰიდროტექნიკური მშენებლობის პრაქტიკაში ხშირად ვხვდებით შემთხვევებს, როდესაც სითხე (წყალი) იძენს განსაკუთრებულ მდგომარეობას: მოძრაობისას მას შეიძლება მიუერთდეს აირისებრი ან მყარი სხეული ან თვითონ გადავიდეს მყარ მდგომარეობაში. განვიხილოთ ეს შემთხვევები წყლის მაგალითზე.

1. **ნაკადის აერაცია.** ჰაერთან შეხებაში მყოფი დიდი სიჩქარით მოძრავი წყლის ნაკადი შეიძლება გაჯერდეს ჰაერის ბუშტულებით და მივიღოთ წყლისა და ჰაერის ნარევი (ე.წ. **ორფაზა სისტემა**). ამ მოვლენას ნაკადის აერაცია ეწოდება.

2. ნაკადის გაჯერება ნატანით. თუ წყლის ნაკადი წარეცხვად კალაპოტში მოძრაობს, მაშინ საკმარისად დიდი სიჩქარეების დროს ხდება ნაკადის თანდათანობით გაჯერება კალაპოტის გრუნტის ნაწილაკებით, რომლებიც წყალთან ერთად მოძრაობს შეწონილ მდგომარეობაში. ამ შემთხვევაში მიიღება ორფაზა სისტემა. ჩვეულებრივ, შეწონილ ნაწილაკებთან ერთად გრუნტის ნაწილაკების გარკვეული ნაწილი გადაადგილდება უშუალოდ კალაპოტის ფსკერზე.

3. წყალში ყინულის კრისტალების წარმოქმნა. წნევის გაზრდით ან ტემპერატურის შემცირებით წყალში შეიძლება წარმოიქმნას ყინულის კრისტალები; ერთგვაროვანი თხევადი გარემოს ნაცვლად მიიღება ორფაზა სისტემა.

4. კავიტაცია. ბუნებრივ პირობებში წყალი შეიცავს გახსნილ ჰაერს (წყლის მოცულობის დაახლოებით 2%-ს). წნევის (p) შემცირებისას ხდება მისი გამოყოფა მცირე ბუშტულების სახით,

რაც იწვევს ნაკადის მთლიანობის რღვევას; მივიღებთ ორფაზა სისტემას. თუ წნევა შემცირდება წყლის ნაჯერი ორთქლის წნევამდე, მაშინ დაიწყება წყლის ორთქლის და ნაწილობრივ ჰაერით გაჯერებული ბუშტულების გამოყოფა. ამ უკანასკნელის ნაჯერი ორთქლის წნევაზე მეტი წნევის ზონაში ($P>P_{ნ.ო.}$) მოხვედრისას ბუშტულები მკვეთრად შეიკუმშება და მოხდება ორთქლის კონდენსაცია. შედეგად ბუშტულები ქრება და მათ ადგილს დიდი სიჩქარით ავსებს გარემომცველი სითხე; ხდება ადგილობრივი ჰიდრავლიკური დარტყმები და წნევის ადგილობრივი ზრდა (1000 და მეტი ატმოსფერომდე). აღნიშნული მოვლენა ცნობილია კავიტაციის სახელწოდებით. გაზრდილი წნევის მექანიკური მოქმედება იწვევს კონსტრუქციის მასალის რღვევას კავიტაციის არეში. კავიტაციას ახლავს დამახასიათებელი ხმა და დანადგარის ვიბრაცია.

§ 3.3. სითხეზე მოქმედი ძალები

სითხეზე მოქმედებს ორი სახის გარე ძალა: **მასური** და **ზედაპირული**. მასური ძალა მოდის განსახილველი სითხის მოცულობის თითოეულ ნაწილაკზე და ამ სითხის მასის პროპორციულია. ერთგვაროვანი სითხის ($\rho = const$) შემთხვევაში მასური ძალა პროპორციული იქნება სითხის მოცულობისაც; ამიტომ, როცა $\rho = const$ (შემდეგში მხედველობაში გვექნება ერთგვაროვანი სითხე), მასურ ძალას შეიძლება ვუწოდოთ მოცულობითი **ძალაც.** მოცულობითს მიეკუთვნება, მაგალითად, სითხის საკუთარი სიმძიმის ძალა ინერციის და მაგნიტოჰიდროდინამიკური ძალები.

ზედაპირული ძალები მოქმედებს უძრავ ან მოძრავ სითხეში გამოყოფილი მოცულობის შემომფარგვლელ ზედაპირზე. ზოგად შემთხვევაში (ზედაპირზე ამ ძალების თანაბრად განაწილებისას) ზედაპირული ძალის სიდიდე იმ ფართობის პროპორციულია, რომელზედაც ის მოქმედებს. ზედაპირულს მიეკუთვნება ზედაპირისადმი **ნორმალური** (ჰიდროსტატიკური და ჰიდროდინამიკური წნევის ძალები) და მხები ძალები (ხახუნის ძალები)

განასხვავებენ გარე და შიგა მოცულობით და ზედაპირულ ძალებს. **გარე ძალები** სითხის მასაზე და მის შემომსაზღვრელ ზედაპირზე მოქმედებს გარედან. **შიგა ძალები** სითხის ნაწილაკების ურთიერთქმედების ძალებია. ისინი წყვილძალებს წარმოადგენს და მათი ჯამი სითხის აღებულ მოცულობაში ყოველთვის ნულის ტოლია.

§ 3.4. იდეალური და რეალური სითხეები

ბუნებაში არსებული ყველა სითხე **რეალურია (ბლანტია).** ექსპერიმენტი გვიჩვენებს, რომ წნევისა და ტემპერატურის ჩვეულებრივი ცვლილებისას რეალური სითხე იმდენად მცირედ იცვლის თავის მოცულობას, რომ ეს ცვლილება პრაქტიკულად შეიძლება უგულებელვყოთ. ამიტომ, ჰიდრავლიკაში სითხე განიხილება, როგორც უკუმშველი სხეული (§ 3.1).

ზემოთ აღვნიშნეთ, რომ უძრავ სითხეში მხები ძაბვები არ არსებობს, მოძრავი სითხის ნაკადში კი ისინი წარმოიქმნება შრეების ურთიერთშეხების ზედაპირებზე (სითხის სიბლანტე).

პრაქტიკაში გვხვდება კერძო შემთხვევა, როდესაც სიბლანტით გამოწვეული ხახუნის ძალები იმდენად მცირეა სითხეზე მოქმედ სხვა ძალებთან შედარებით, რომ ისინი შეიძლება უგულებელვყოთ (როგორც უძრავ სითხეში).

ანალიზურ გამოკვლევებში ხშირად სარგებლობენ **იდეალური** სითხის ცნებით. იდეალური სითხე არის წარმოსახვითი სითხე, რომელიც აბსოლუტურად უკუმშველია და რომელშიც მოძრაობის დროს არ წარმოიქმნება ხახუნის ძალები. ცხადია, რომ იდეალური სითხე ბუნებაში არ არსებობს და ის მხოლოდ ჩვენს წარმოდგენაში შექმნილი აბსტრაქტული მოდელია.

აღნიშნულიდან გამომდინარეობს, რომ უძრაობაში მყოფი სითხის შესწავლისას არ არსებობს იდეალური და რეალური სითხეების განსხვავების აუცილებლობა, ხოლო რეალური სითხის მოძრაობისას დამატებით უნდა იქნეს გათვალისწინებული ხახუნის ძალები, ე.ი. სიბლანტე.

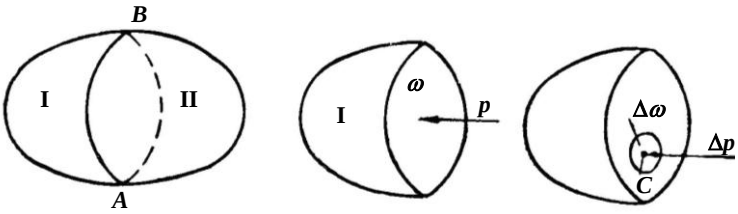
თავი IV. ჰიდროსტატიკა

§ 4.1. ჰიდროსტატიკური წნევა და მისი თვისებები

განვიხილოთ სითხის მოცულობა, რომელიც წონასწორობაში იმყოფება (ნახ. 4.1). ჩვენს წარმოდგენაში ეს მოცულობა სიბრტყით გავყოთ ორ, I და II ნაწილებად და ერთ-ერთი მათგანი, ვთქვათ, II ნაწილი მოვაცილოთ. დარჩენილი I ნაწილის წონასწორობის აღსადგენად საჭიროა მასზე მოვდოთ მოცემული II ნაწილის ზემოქმედების გამომსახველი (შემცვლელი) ზედაპირული ძალები. ამ ძალების ტოლქმედს (ნახ. 4.1, ბ) გამყოფ ზედაპირზე (ან სხვანაირად „მოქმედების ზედაპირზე“) მოქმედ ჰიდროსტატიკურ წნევის ძალას უწოდებენ, ხოლო მის ფარდობას იგივე ω

ზედაპირის ფართობთან - საშუალო ჰიდროსტატიკურ წნევის ძალას

$$p_{\text{საშ}} = \frac{P}{\omega}. \tag{4.1}$$



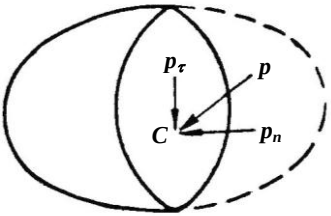
ნახ. 4.1

ახლა „მოქმედების ზედაპირზე“ ავიღოთ ნებისმიერი C წერტილი და მის გარშემო გამოვყოთ ელემენტარული Δω ფართობი (ელემენტარულ ფართობში ვგულისხმობთ მცირე ფართობს, x, y და z წერტილთა კოორდინატები ერთმანეთისაგან განსხვავებულია უსასრულოდ მცირე სიდიდით) (ნახ. 4.1, გ); მასზე იმოქმედებს შესაბამისი ელემენტარული ΔP ძალა (ასეთი ელემენტარული ძალების ტოლქმედს წარმოადგენს სწორედ P ძალა). თუ წარმოვიდგენთ, რომ Δω ფართობი მიისწრაფვის ნულისაკენ ისე, რომ C წერტილი ყოველთვის Δω ფართობის შემომფარგვლელი კონტურის შიგნით რჩება, მაშინ მივიღებთ ΔP/ω ფარდობის ზღვარს, რომელსაც ეწოდება ჰიდროსტატიკური წნევა სითხის მოცემულ C წერტილში

$$p = \lim\left(\frac{\Delta P}{\Delta \omega}\right). \tag{4.2}$$

ჰიდროსტატიკურ წნევას აქვს სამი დამახასიათებელი თვისება:

1. **ჰიდროსტატიკური წნევა ყოველთვის მიმართულია მოქმედების ზედაპირისადმი შიგა ნორმალის გასწვრივ.** განვიხილოთ წონასწორობაში მყოფი სითხის რაიმე მოცულობა და, ზემოაღნიშნულის ანალოგიურად, AB სიბრტყით გავყოთ ორ ნაწილად (ნახ 4.2). გამყოფ სიბრტყეზე ავიღოთ ნებისმიერი C წერტილი და ვიგულისხმოთ, რომ ჰიდროსტატიკური

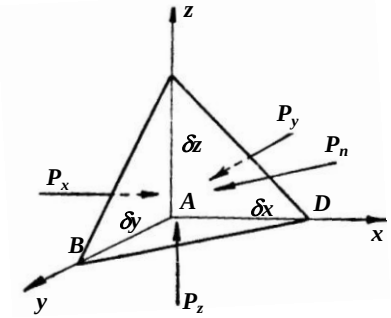


ნახ. 4.2

წნევა (p) ამ წერტილში მიმართულია არა მოქმედების ზედაპირის მართობულად, არამედ რაიმე კუთხით. მაშინ ის შეიძლება დავშალოთ ზედაპირის მართობულ (p_n) და მხებ (p_τ) შემდგენებად. რადგან სითხე არ ეწინააღმდეგება მხებ და გამჭიმავ ძალებს, p_τ შემდგენი და გარე ნორმალის გასწვრივ მიმართული p_n შემდგენი გამოიწვევს სითხის ნაწილაკების გადაადგილებას, რაც ეწინააღმდეგება იმ ძირითად პირობას, რომ სითხის განსახილველი მოცულობა იმყოფება წონასწორობაში.

2. ჰიდროსტატიკური წნევა სითხის ნებისმიერ წერტილში არ არის დამოკიდებული ზედაპირის ორიენტირებაზე, ე.ი. ჰიდროსტატიკური წნევა მოცემულ წერტილში ყველა მიმართულებით თანაბარი სიდიდით მოქმედებს.

ამ თვისების დასამტკიცებლად წონასწორობაში მყოფ სითხეში (A) წერტილთან გამოვყოთ ელემენტარული ტეტრაედრი, რომელიც იმყოფება ზედაპირული და მოცულობითი ძალების ზემოქმედების ქვეშ. ტეტრაედრის წიბოები აღვნიშნოთ $\delta x, \delta y, \delta z$-ით, ხოლო მოცულობა δW-ით (ნახ 4.3). მოვაცილოთ მას გარემომცველი სითხე და წონასწორობის შესანარჩუნებლად ტეტრაედრის წახნაგებზე მართობულად მოვდოთ შესაბამისი P_x, P_y, P_z, და P_n ზედაპირული ძალები, სადაც P_n არის დახრილი BCD წახნაგზე მოქმედი წნევის ძალა. ამ ძალების გარდა ტეტრაედრზე მოქმედებს მოცულობითი ძალებიც (სიმძიმის ძალა, ინერციის ძალა).



ნახ. 4.3

ერთეულ მასაზე მოქმედი მოცულობითი ძალების ტოლქმედი აღვნიშნოთ F-ით, ხოლო მისი გეგმილები კოორდინატთა ღერძებზე $-F_x$, F_y, F_z-ით. F-ს ხშირად მოცულობითი ძალების აჩქარებას უწოდებენ, ხოლო F_x, F_y, F_z-ს მოცულობითი ძალების აჩქარების გეგმილებს. იმის გამო, რომ განსახილველი ტეტრაედრი აღნიშნული ძალების (ზედაპირული და მოცულობითი) მოქმედებით წონასწორობაში იმყოფება, შეგვიძლია შევადგინოთ განტოლებები:

$$\left.\begin{aligned} P_x - P_n\cos(n,\hat{}z) + F_x(\rho\delta W) = 0;\\ P_y - P_n\cos(n,\hat{}y) + F_y(\rho\delta W) = 0;\\ P_z - P_n\cos(n,\hat{}z) + F_z(\rho\delta W) = 0. \end{aligned}\right\} \qquad (4.3)$$

ამ გამოსახულებებში $(n,\hat{}x)$, $(n,\hat{}y)$ და $(n,\hat{}z)$ არის BCD წახნაგის ნორმალის მიერ კოორდინატთა სისტემის ღერძებთან შედგენილი კუთხეები; $\rho\delta W$ – ტეტრაედრის მასა, ხოლო $F(\rho\delta W)$ – მასზე მოქმედი მოცულობითი ძალების სიდიდე.

(4.3) სისტემის პირველი განტოლების თითოეული წევრი გავყოთ ω_x-ზე, მივიღებთ:

$$\frac{P_x}{\omega_x} - \frac{P_n \cos(n,\hat{}x)}{\omega_x} + \frac{F_x(\rho\delta W)}{\omega_x} = 0. \qquad \text{(a)}$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ

$$\omega_x = \frac{1}{2}\delta_y\delta_z;\ \ \omega_x = \omega_n \cos(n,\hat{}x) \quad \text{და} \quad \delta W = \frac{1}{6}\delta_x\delta_y\delta_z\ ,$$

მაშინ (a) გამოსახულება შეიძლება ასეთი სახით ჩავწეროთ:

$$\frac{P_x}{\omega_x} = \frac{P_n}{\omega_n} - \rho F_x \frac{1}{3}\delta x.$$

ანალოგიურად შედგება დანარჩენი ორი განტოლებაც. გვექნება სისტემა

$$\left.\begin{aligned} \frac{P_x}{\omega_x} &= \frac{P_n}{\omega_n} - \rho F_x \frac{1}{3}\delta x; \\ \frac{P_y}{\omega_y} &= \frac{P_n}{\omega_n} - \rho F_y \frac{1}{3}\delta y; \\ \frac{P_z}{\omega_z} &= \frac{P_n}{\omega_n} - \rho F_z \frac{1}{3}\delta z. \end{aligned}\right\}$$

თუ განვიხილავთ ამ გამოსახულების ზღვარს, როდესაც δx, δy და δz მიისწრაფვის ნულისაკენ, მივიღებთ:

$$p_x = p_n\ ; p_y = p_n\ ;\ p_z = p_n,$$

ანუ

$$p_x = p_y = p_z = p_n. \qquad (4.4)$$

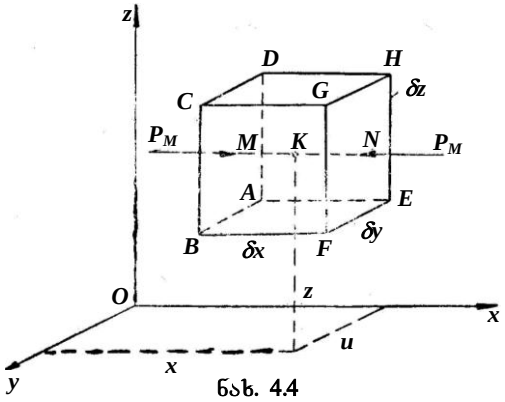
ეს ტოლობა გამოსახავს ჰიდროსტატიკური წნევის მეორე თვისებას.

3. ჰიდროსტატიკური წნევა წერტილში დამოკიდებულია მხოლოდ წერტილის მდებარეობაზე სივრცეში:

$$P = f(x,y,z). \qquad (4.5)$$

§ 4.2. სითხის წონასწორობის დიფერენციალური განტოლებები (ლ. ეილერის განტოლებები)

ჰიდროსტატიკური წნევის განაწილების კანონის დასადგენად წონასწორობაში მყოფ სითხეში გამოვყოთ ელემენტარული პარალელეპიპედი $\delta x, \delta y$ და δz წიბოებით და სიმძიმის ცენტრით K წერტილში (ნახ. 4.4) განსახილველ მოცულობაზე იმოქმედებს ორი სახის ძალა: ზედაპირული და მოცულობითი. ზედაპირული ძალები არის პარალელეპიპედის გარემომცველი სითხის წნევის ძალები და, ჰიდროსტატიკური წნევის პირველი თვისების თანახმად, მიმართულია პარალელეპიპედის წახნაგების მართობულად, შიგა ნორმალის გასწვრივ. რაც შეეხება მოცულობით ძალებს, მათ მიეკუთვნება პარალელეპიპედის სიმძიმის და ინერციის ძალები.



ნახ. 4.4

ზედაპირული ძალების სიდიდის დასადგენად დავუშვათ, რომ K წერტილში (რომლის კოორდინატებია x, y და z) ჰიდროსტატიკური წნევა არის p. თუ გავიხსენებთ, რომ p წნევა არის კოორდინატების უწყვეტი ფუნქცია, მაშინ Ox ღერძის მართობული BCDA და EFGH წახნაგების სიმძიმის ცენტრებში (M და N წერტილებში), რომლებიც K წერტილიდან დაცილებულია $1/2\delta_X$ მანძილით, ჰიდროსტატიკური წნევის მნიშვნელობები ტოლი იქნება:

$$P_M = P - \frac{\partial p}{\partial x}\frac{1}{2}\delta x;$$

$$P_N = P - \frac{\partial p}{\partial x}\frac{1}{2}\delta x,$$

სადაც კერძო წარმოებული (კერძო წარმოებული, რადგან K-დან M და N წერტილებში გადაადგილებისას იცვლება მხოლოს x კოორდინატი). $\frac{\partial p}{\partial x}$ არის წნევის ცვლილება ერთეულ მანძილზე Ox ღერძის გასწვრივ **(წნევის გრადიენტი),** ხოლო $\frac{\partial p}{\partial x}\cdot\frac{1}{2}\cdot\delta x$ –წნევის ცვლილება $\frac{1}{2}\cdot\delta x$ მანძილზე. x ღერძის დადებითი მიმართულებით $\frac{\partial p}{\partial x}\cdot\frac{1}{2}\cdot\delta x$ სიდიდე და ემატება p წნევას, ხოლო საწინააღმდეგო მიმართულებით – აკლდება.

ABCD და EFGH წახნაგები ელემენტარულია, რის გამოც P_M და P_N შეიძლება განვიხილოთ, როგორც ჰიდროსტატიკური წნევის საშუალო მნიშვნელობები აღნიშნულ წახნაგებზე; ამიტომ, მათზე მოქმედი ზედაპირული ძალები (ჰიდროსტატიკური წნევის ძალები), შესაბამისად, $\left(P-\frac{\partial p}{\partial x}\frac{1}{2}\delta x\right)\delta y\delta z$ და $\left(P+\frac{\partial p}{\partial x}\frac{1}{2}\delta x\right)\delta y\delta z$ გამოსახულების ტოლი იქნება.

ანალოგიურად გამოითვლება წნევის ძალის მნიშვნელობები სხვა წახნაგებისათვისაც.

მაშასადამე, წნევის ძალები, რომლებიც ცვლის გარემომცველი სითხის მასის ზემოქმედებას პარალელეპიპედზე, ტოლია მოცემული წახნაგის სიმძიმის ცენტრში ჰიდროსტატიკური წნევის მნიშვნელობებისა და შესაბამისი წახნაგის ფართობის ნამრავლი.

როგორც ზემოთ ვთქვით, ზედაპირული ძალების გარდა განსახილველ პარალელეპიპედზე მოქმედებს მოცულობითი ძალებიც. ერთეულ მასაზე მოსული მოცულობითი ძალების ტოლქმედი აღვნიშნოთ F-ით, ხოლო გეგმილები კოორდინატთა ღერძებზე – F_X,F_Y, F_Z-ით (§4.1), მაშინ პარალელეპიპედზე მოქმედი მოცულობითი ძალის სიდიდე $F=(\rho\delta x\delta y\delta z)$ ნამრავლის ტოლი იქნება. აქ $\rho\delta x\delta y\delta z$ არის პარალელეპიპედის მასა.

პარალელეპიპედის წონასწორობის პირობიდან გამომდინარეობს, რომ მასზე მოქმედი ზედაპირული და მოცულობითი ძალების გეგმილების ჯამი თითოეულ ღერძზე ნულის ტოლია. ამიტომ, ღერძისათვის შეგვიძლია დავწეროთ:

$$\left(p-\frac{\partial p}{\partial x}\cdot\frac{1}{2}\delta x\right)\delta y\delta z-\left(p+\frac{\partial p}{\partial x}\cdot\frac{1}{2}\delta x\right)\delta y\delta z+F_x(\rho\delta x\delta y\delta z)=0$$

ანუ

$$F_x - \frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial p}{\partial x} = 0\,.$$

თუ ანალოგიურად შევადგენთ დანარჩენ ორ განტოლებასაც *Ox* და *Oz* ღერძებისათვის, მივიღებთ სითხის წონასწორობის დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემას (განტოლებები შედგენილია სითხის ერთეული მასისათვის):

$$\left.\begin{aligned} F_x - \frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial p}{\partial x} &= 0;\\ F_y - \frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial p}{\partial y} &= 0;\\ F_z - \frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial p}{\partial z} &= 0. \end{aligned}\right\} \qquad (4.6)$$

ეს განტოლებები პირველად მოცემულ იქნა ლ. ეილერის მიერ 1755 წელს, რის გამოც მათ ეილერის განტოლებებს უწოდებენ. ისინი გამოსახავენ სითხეში ჰიდროსტატიკური წნევის განაწილების კანონს დიფერენციალური ფორმით.

§ 4.3. სითხის წონასწორობის დიფერენციალურ განტოლებათა ინტეგრირება

იმისათვის, რომ (4.6) განტოლებებს პრაქტიკული გამოყენებისათვის (ინტეგრირებისათვის) მოსახერხებელი სახე მივცეთ გავამრავლოთ იგი dx,dy,dz-ზე და მიღებული შედეგები შევკრიბოთ

$$F_x dx + F_y dy + F_z dz - \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p}{\partial x}dx + \frac{\partial p}{\partial y}dy + \frac{\partial p}{\partial z}dz\right) = 0\,.$$

რადგან, p=*f*(x,y,z), ამიტომ ფრჩხილებში მოთავსებული გამოსახულება წნევის სრული დიფერენციალია და, მაშასადამე,

$$dp = \rho\left(F_x dx + F_y dy + F_z dz\right). \qquad (4.7)$$

ჩვენ მიერ განხილული სითხისათვის ρ=const, ამიტომ (4.7)-ის მარჯვენა ნაწილში ფრჩხილებში მოთავსებული გამოსახულება არის აგრეთვე U=*f*(x,y,z) ძალური ფუნქციის სრული დიფერენციალი, ე.ი.

$$dU = F_x dx + F_y dy + F_z dz\,. \qquad (4.8)$$

მაშასადამე

$$F_x = \frac{\partial U}{\partial x};\ F_y = \frac{\partial U}{\partial y};\ F_z = \frac{\partial U}{\partial z}\,. \qquad (4.9)$$

U ძალურ ფუნქციას **ძალთა პოტენციალს** ან, უბრალოდ, **პოტენციურ ფუნქციას უწოდებენ.** (4.9) გამოსახულებები გვიჩვენებს, რომ სითხე იმყოფება წონასწორობაში, თუ მასზე მოქმედ ძალებს აქვს პოტენციალი. აღნიშნულის გათვალისწინებით, (4.7) გამოსახულება შეიძლება ასე ჩაიწეროს:

$$dp = \rho\left(\frac{\partial U}{\partial x}dx + \frac{\partial U}{\partial y}dy + \frac{\partial U}{\partial z}dz\right) \qquad (4.10)$$

ან

$$dp=\rho dU\,. \qquad (4.10)'$$

ამ უკანასკნელის ინტეგრირებით მივიღებთ:

$$P=\rho U+C, \qquad (4.11)$$

სადაც C არის ინტეგრირების მუდმივა.

თუ ცნობილია სითხეში ან მის თავისუფალ ზედაპირზე მდებარე წერტილისათვის p_0 წნევა და U_0 პოტენციური ფუნქცია, მაშინ (4.11) გამოსახულებიდან გვექნება:

$$P_0=\rho U_0+C. \qquad (4.12)$$

(4.11) და (4.12) ტოლობებიდან მივიღებთ

$$P=p_0+\rho(U-U_0). \qquad (4.13)$$

(4.13)′ განტოლება არის სითხის წონასწორობის დიფერენციალურ განტოლებათა ინტეგრალი და გამოსახავს წნევის განაწილების კანონს წონასწორობაში მყოფ სითხეში, როდესაც სითხეზე მოქმედებს პოტენციალის მქონე მოცულობითი ძალების ნებისმიერი სისტემა.

პოტენციური ფუნქციის ცნება. სივრცეს, რომელშიც რაიმე ფიზიკური მოვლენა მიმდინარეობს, **ფიზიკური ველი** ეწოდება. განასხვავებენ **სკალარულ** და **ვექტორულ** ველს. პირველს მიეკუთვნება, მაგალითად, ტემპერატურათა ველი, ხოლო მეორეს ძალთა ან სიჩქარეთა ველი.

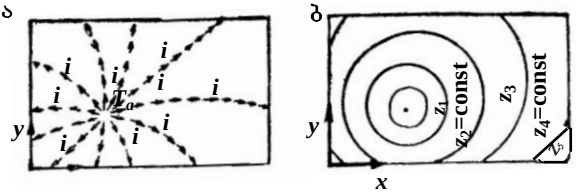
რაიმე სკალარის $\Psi=f(x, y, z)$ ველი შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს $\Psi=\text{const}$ წირებით (ან ზედაპირებით).

ვექტორული ველით ოპერირება გაცილებით რთულია, ვიდრე სკალარულით. ამიტომ, ვექტორულ ველს (მაგალითად, ძალთა ველს) მისი შესწავლისას ცვლიან სკალარული ველით, ამასთან ამ უკანასკნელს წარმოადგენენ განსაკუთრებული U ფუნქციის თანაბარი მნიშვნელობის წირებით. U ფუნქციას, რომელიც სკალარული სიდიდეა **პოტენციურ ფუნქციას** ან, უბრალოდ, პოტენციალს უწოდებენ. იგი იმ ვექტორთა პოტენციალია, რომელსაც ვიხილავთ (მაგალითად, ძალთა პოტენციალს, სიჩქარეთა პოტენციალს და სხვა) და ხასიათდება შემდეგი თვისებებით:

1. ის კოორდინატების (x, y, z) ფუნქციაა;

2. U ფუნქციის კერძო წარმოებულები კოორდინატებით, აღებული სკალარული ველის სხვადასხვა წერტილში, უნდა იძლეოდეს განსახილველი ვექტორების გეგმილთა სიდიდეებს „მინუს“ ნიშნით, ვექტორული ველის შესაბამის წერტილებში.

მაგალითისათვის განვიხილოთ დედამიწის ზედაპირის რელიეფი. მისი ყოველი წერტილი ხასიათდება გარკვეული ქანობით, რომელიც შეიძლება წარმოვადგინოთ უდიდესი დაქანების წირის გასწვრივ მიმართული ვექტორით (ნახ. 4.5,ა). ამიტომ, დედამიწის ზედაპირის რელიეფი შეიძლება განვიხილოთ, როგორც i ქანობების გამომსახველი **ვექტორების ველი**.



ნახ. 4.5

დედამიწის ზედაპირის ნიშნულები აღვნიშნოთ Z-ით და რელიეფის გეგმაზე გავატაროთ z=const ჰორიზონტალები (4.5,ბ). z ფუნქცია დამოკიდებულია x და y კოორდინატებზე და ხასიათდება შემდეგი თვისებით:

$$\frac{\partial z}{\partial x} = -i_x\,;\ \frac{\partial z}{\partial y} = -i_y\,,$$

სადაც i_x და i_y არის i ქანობის კომპონენტები.

აქედან ჩანს, რომ z სკალარული სიდიდე არის i ქანობის ვექტორული ველის პოტენციური ფუნქცია. პრაქტიკაში რელიეფს წარმოადგენენ სწორედ z=const ეკვიპოტენციალებით (ჰორიზონტალებით), რომელთა საშუალებითაც ადვილად დავადგენთ i ვექტორის მოდულს და მიმართულებას დედამიწის ზედაპირის ნებისმიერ წერტილში.

ჩვენ მიერ ზემოთ შემოტანილი U ფუნქცია არის მოცულობითი ძალების ვექტორული ველის პოტენციალი.

შევნიშნავთ, რომ ყველა ვექტორულ ველს არ გააჩნია პოტენციალი. ასეთი ველების შესწავლა მნიშვნელოვნად გართულებულია.

§ 4.4. თანაბარი წნევის ზედაპირი

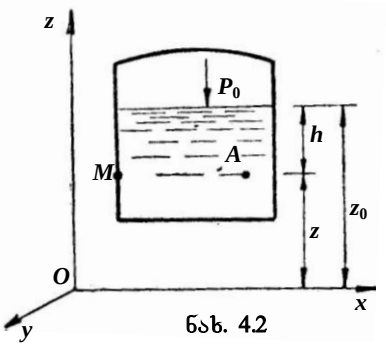
თანაბარი წნევის ზედაპირი ეწოდება ზედაპირს, რომლის ყველა წერტილში ერთნაირი წნევა მოქმედებს. ასეთი ზედაპირის განტოლება მიიღება (4.7) გამოსახულებიდან, თუ ვიგულისხმებთ, რომ p=const:

$$F_x dx + F_y dy + F_z dz = 0 . \qquad (4.14)$$

თანაბარი წნევის ზედაპირის ერთ-ერთი სახეა სითხის თავისუფალი ზედაპირი, რომლის ყოველ წერტილში მოქმედებს ერთი და იგივე წნევა.

§ 4.5. ჰიდროსტატიკის ძირითადი განტოლება

განვიხილოთ კერძო შემთხვევა, როდესაც წონასწორობაში მყოფ სითხეზე მოცულობითი ძალებიდან მოქმედებს მხოლოდ სიმძიმის ძალა. ამასთან, ვიგულისხმოთ, რომ სითხე მოთავსებულია დახურულ ჭურჭელში და მის თავისუფალ ზედაპირზე მოქმედებს ატმოსფერულის ტოლი ან მისგან განსხვავებული p_0 წნევა (ნახ. 4.6), მაშინ მოცულობითი ძალის (განსახილველ შემთხვევაში სიმძიმის ძალის) აჩქარების გეგმილები კოორდინატთა ღერძებზე ტოლი იქნება:



ნახ. 4.2

$$F_x=0;\ F_y=0;\ F_z=-g. \qquad (4.15)$$

თუ F_x; F_y და F_z-ის ამ მნიშვნელობებს შევიტანთ (4.8) გამოსახულებაში, მივიღებთ:

$$dU=-gdz$$

ან ინტეგრირებით

$$U=-gz+C. \qquad (4.16)$$

ინტეგრირების C მუდმივას ვიპოვით სასაზღვრო პირობებიდან: კერძოდ, როცა $z=z_0$, მაშინ $U=U_0$ და ამიტომ ინტეგრირებით

$$C=U_0+gz_0.$$

C-ს ეს მნიშვნელობა ჩავსვათ (4.16)-ში

$$U-U_0=g(z_0-z). \qquad (4.17)$$

(4.13) და (4.15) განტოლებების ერთობლივი ამოხსნით მივიღებთ:

$$p=p_0+\rho g(z_0-z)$$

ან (3.3) გამოსახულების გათვალისწინებით (4.13) და (4.15) განტოლებების ერთობლივი ამოხსნით მივიღებთ

$$p=p_0+\gamma(z_0-z). \qquad (4.18)$$

ამ უკანასკნელს შეიძლება ასეთი სახეც მივცეთ:

$$z_0+\frac{p_0}{\gamma}=z+\frac{p}{\gamma}. \qquad (4.19)$$

მიღებულ განტოლებას უწოდებენ **ჰიდროსტატიკის ძირითად განტოლებას.** (4.6) ნახაზიდან ჩანს, რომ $z_0-z=h$; ამიტომ (4.19) შეიძლება ასე გადავწეროთ:

$$p_{სრ(სბს.)}=p_0+\gamma h, \qquad (4.20)$$

სადაც $p=p_{სრ(სბს.)}$ არის ე.წ. სრული ანუ აბსოლუტური წნევა სითხის განსახილველ A წერტილში; h–A წერტილის ჩაძირვის სიღრმეა სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან.

როგორც ვხედავთ, სრული ჰიდროსტატიკური წნევის სიდიდე h სიღრმით ჩაძირულ რამე წერტილში შედგება სითხის თავისუფალ ზედაპირზე მოქმედი p_0 გარე წნევის და h სითხის სიმაღლის ისეთი სვეტის წონით გამოწვეული წნევის ჯამისაგან, რომელსაც ფუძედ აქვს ფართობის ერთეული.

(4.20) განტოლებიდან ჩანს, რომ სითხის თავისუფალ ზედაპირზე მოქმედი p_0 წნევა ერთნაირი ინტენსიურობით გადაეცემა ყველა მიმართულებით, რაც კიდევ ერთხელ ადასტურებს პასკალის კანონის მართებულობას (პასკალის კანონის თანახმად, უძრავი სითხის რაიმე წერტილში წნევის ყოველგვარი ცვლილება, რომელიც სითხის წონასწორობას არ არღვევს, უცვლელად გადაეცემა დანარჩენ წერტილებში).

მაშასადამე, (4.20) განტოლებასაც ასევე შეიძლება ეწოდოს ჰიდროსტატიკის ძირითადი განტოლება.

§ 4.6. მანომეტრული (ჭარბი) წნევა. პიეზომეტრული სიმაღლე. ვაკუუმი. ჰიდროსტატიკური დაწნევა. ჰიდროსტატიკის ძირითადი განტოლების გეომეტრიული და ენერგეტიკული არსი

ჭურჭლის კედლის შიგა ზედაპირზე მდებარე M წერტილში (ნახ. 4.6) სრული ჰიდროსტატიკური წნევა გამოითვლება (4.20) ფორმულით. გარედან ჭურჭლის კედელზე მოქმედებს ატმოსფერული წნევა ($p_{ატ}$). მაშასადამე, კედელი განიცდის წნევას, რომელიც სრული ჰიდროსტატიკური წნევის და ატმოსფერული

წნევის სხვაობის ტოლია. სრულ წნევაზე ერთი ატმოსფეროთი ნაკლებ წნევას **მანომეტრული ანუ ჭარბი** წნევა ეწოდება.

$$p_{\text{მან(ჭარ)}} = p_{\text{სრ(აბს)}} - p_{\text{ატ}} = p_0 + \gamma h + p_{\text{ატ}} - p_{\text{ატ}} . \qquad (4.21)$$

თუ ჭურჭელი ღიაა, მაშინ სითხის თავისუფალ ზედაპირზე მოქმედი წნევა ატმოსფერულის ტოლია ($p_0 = p_{\text{ატ}}$), ამიტომ (4.21) გამოსახულებიდან

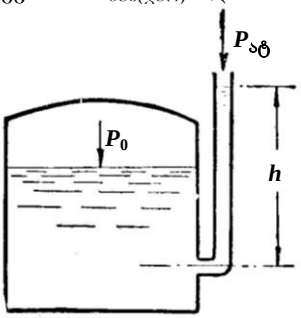
$$p_{\text{მან(ჭარ)}} = \gamma h . \qquad (4.22)$$

ჰიდროსტატიკური წნევის განზომილებაა: MKS სისტემაში- კგძ/მ^2; Si სისტემაში – ნ/მ^2. პრაქტიკაში ხშირად წნევას ასევე ზომავენ რომელიმე სითხის (წყლის, ვერცხლისწყლის) სვეტის სიმაღლითაც.

(4.21) განტოლებიდან

$$\frac{p_{\text{მან(ჭარ)}}}{\gamma} = \frac{p_0 - p_{\text{ატმ}} + \gamma h}{\gamma} + \frac{p_0 - p_{\text{ატმ}}}{\gamma} + h . \qquad (4.23)$$

ამ გამოსახულებაში ცვლადი სიდიდეებია $P_{\text{მან(ჭარ)}}$ და h. მაშასადამე, მანომეტრული (ჭარბი) წნევა სითხის ნებისმიერ წერტილში ხასიათდება თავისუფალი ზედაპირიდან წერტილის ჩაძირვის სიღრმით და, პირიქით, წერტილის ჩაძირვის სიღრმე ახასიათებს მანომეტრულ წნევას ამ წერტილში.



ნახ. 4.7

თუ სითხით შევსებულ რეზერვუარს მივუერთებთ ღიაბოლოიან მინის მილაკს (ნახ. 4.7), მაშინ მილაკში სითხე აიწევს რაღაც h სიმაღლეზე. იმის მიხედვით, თუ როგორია სითხის თავისუფალ ზედაპირზე მოქმედი წნევა (ტოლია, მეტია თუ ნაკლები ატმოსფერულ წნევაზე), მილაკში დონე დადგება შესაბამისად რეზერვუარში მოთავსებული სითხის დონეზე მაღლა ან დაბლა. ასეთ მილაკს **პიეზომეტრს** უწოდებენ, ხოლო h სიმაღლეს – **პიეზომეტრულ სიმაღლეს.** პიეზომეტრული სიმაღლე წნევას ზომავს ხაზოვან ერთეულებში, მაგალითად, ერთი ტექნიკური ატმოსფერო (1ატ), რომელიც 1კგძ/სმ^2 ან 10ტძ/მ^2 წნევის ტოლია, შეესაბამება პიეზომეტრულ სიმაღლეს:

$$h = \frac{p_{\text{ატმ}}}{\gamma} = \frac{10\text{ტძ/მ}^2}{10\text{ტძ/მ}^3} = 10\text{მ წყ.სვ} .$$

მაშასადამე, 1ატმ წნევა იზომება 10მ სიმაღლის წყლის სვეტით (ანალოგიურად მივიღებთ, რომ 1ატმ წნევა იზომება 736 მმ სიმაღლის ვერცხლისწყლის სვეტითაც).

თუ სითხის რომელიმე წერტილში სრული ჰიდროსტატიკური წნევა ატმოსფერულზე ნაკლებია ($p_{სრ(აბს)}<p_{ატ}$), მაშინ გვაქვს ვაკუუმი.

ვაკუუმი არის დანაკლისი ატმოსფერულ წნევამდე

$$p_{ვკ} = p_{ატ} - p_{სრ(აბს)}. \qquad (4.24)$$

სითხის სვეტის სიმაღლეს, რომლითაც იზომება ვაკუუმი, **ვაკუუმმეტრული სიმაღლე** ეწოდება

$$p_{ვკ} = p_{ატ} - \frac{p_{სრ(აბს)}}{\gamma}. \qquad (4.25)$$

ჩვეულებრივ, ვაკუუმის მაქსიმალური მნიშვნელობა სხვადასხვა ჰიდრავლიკურ დანადგარში არ აღემატება 0,6...0.8 ატმ-ს (6..8მ წყ.სვ). ხელსაწყოს, რომლითაც იზომება ვაკუუმი **ვაკუუმმეტრი** ეწოდება.

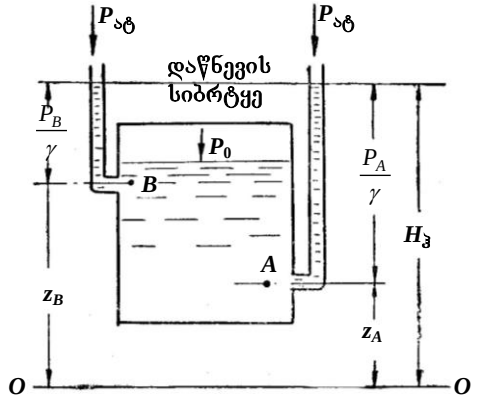
განვიხილოთ დახურულ რეზერვუარში მოთავსებული და წონასწორობაში მყოფი სითხე, რომლის თავისუფალ ზედაპირზე მოქმედებს p_0 წნევა (ნახ 4.8). სითხეში შევარჩიოთ ორი ნებისმიერი A და B წერტილი და ამ წერტილებთან რეზერვუარს მივუერთოთ პიეზომეტრები. ვერტიკალური კოორდინატების ასათვლელად ნებისმიერ ადგილას გავატაროთ ჰორიზონტალური საფარდი (ათვლის) სიბრტყე და ჩავთვალოთ, რომ 0-0 წირი წარმოადგენს მის კვალს. A და B წერტილების კოორდინატები (მდებარეობის სიმაღლეები ან გეომეტრიული სიმაღლეები) აღვნიშნოთ z_A და z_B-ით, ხოლო ჰიდროსტატიკური წნევები ამ წერტილებში - p_A და p_B-თი. მაშინ პიეზომეტრული სიმაღლეები, შესაბამისად, p_A/γ და p_B/γ ტოლი იქნება.

z_A+p_A/γ ან z_B+p_B/γ ჯამს უწოდებენ **ჰიდროსტატიკურ ან პიეზომეტრულ დაწნევას** სითხის მოცემულ წერტილში არჩეული 0-0 საფარდი სიბრტყის მიმართ; (4.19) განტოლების თანახმად ეს ჯამები ტოლია. მაშასადამე, სითხის მოცემული მოცულობისათვის პიეზომეტრული დაწნევა 0-0 საფარდი სიბრტყის მიმართ მუდმივი სიდიდეა

$$H_p = z_A + \frac{p_A}{\gamma} = z_B + \frac{p_B}{\gamma} = z + \frac{p}{\gamma} = const. \qquad (4.26)$$

რეზერვუართან მიერთებული პიეზომეტრები (მათ შორის A და B პიეზომეტრებიც) ფაქტიურად წარმოადგენს ზიარჭურჭლებს,

ამიტომ სითხის დონეები დადგება ერთ ჰორიზონტალურ სიბრტყეში, რომელსაც **პიეზომეტრული დაწნევის სიბრტყე ეწოდება**.



ნახ. 4.8

ახლა წარმოვიდგინოთ, რომ A წერტილში (ნახ. 3.8) თვმოყრილია სითხის რაიმე m მასა. ამ წერტილში რეზერვუართან პიეზომეტრის მიერთების მომენტში სითხის განსახილველი მასა ენერგიის დამატებითი დანახარჯის გარეშე აიწევს $\frac{p_A}{\gamma}$ სიმაღლეზე და მისი სრული ენერგია განისაზღვრება არა მარტო z_A მდებარეობის სიმაღლით, არამედ $\frac{p_A}{\gamma}$ პიეზომეტრული სიმაღლითაც. ამგვარად, A წერტილში m მასის პოტენციური ენერგია იქნება:

$$Э_ჱ = mgz_A + mg\frac{p_A}{\gamma} = mg(z_A + \frac{p_A}{\gamma}).$$

რაც შეეხება ერთეული წონის მქონე სითხის პოტენციურ ენერგიას, ანუ კუთრ **პოტენციურ ენერგიას**, ის გამოითვლება ფორმულით:

$$E_ჱ = Э_ჱ/mg = z_A + \frac{p_A}{\gamma}. \qquad (4.27)$$

მაშასადამე, წონასწორობაში მყოფი სითხის კუთრი პოტენციური ენერგია განისაზღვრება პიეზომეტრული დაწნევით, ამიტომ სითხის ნებისმიერი წერტილისათვის არჩეული საფარდი სიბრტყის მიმართ სიდიდე მუდმივი იქნება:

$$E_э = z + \frac{p}{\gamma} = \text{const.} \qquad (4.28)$$

ამგვარად, კუთრი პოტენციური ენერგია 0-0 საფარდი სიბრტყის მიმართ შედგება მდებარეობის კუთრი პოტენციური ენერგიისა (გეომეტრიული სიმაღლე) და წნევის კუთრი პოტენციური ენერგიისაგან (პიეზომეტრული სიმაღლე).

§ 4.7. სითხის დონის ზედაპირი

თანაბარი წნევის ზედაპირებს სხვანაირად **დონის ზედაპირებს** უწოდებენ. ასეთი ზედაპირის განტოლებას, როგორც ვნახეთ, აქვს სახე (§ 4.4):

$$F_x dx + F_y dy + F_z dz = 0 . \qquad (4.14)$$

მოვიყვანოთ დონის ზედაპირების განსაზღვრის მაგალითები:

1. დონის ზედაპირები წონასწორობაში მყოფი სითხისათვის, როდესაც მასზე მოცულობითი ძალებიდან მოქმედებს მხოლოდ სიმძიმის ძალა. ჩავთვალოთ, რომ Oz ღერძი მიმართულია ვერტიკალურად ზემოთ და შედარებით მცირე ზედაპირისათვის სიმძიმის ძალები ურთიერთპარალელურია, მაშინ

$$F_x=0 ; F_y=0 ; F_z=-g.$$

თუ ამ მნიშვნელობას შევიტანთ (4.14) გამოსახულებაში, მივიღებთ $-gdz = 0$ ანუ dz=0.

აქედან

$$Z=\text{const.} \qquad (4.29)$$

მაშასადამე, განხილულ შემთხვევაში დონის ზედაპირები ჰორიზონტალური სიბრტყეებია.

2. სითხის ფარდობითი წონასწორობა. განვიხილოთ შემთხვევა, როდესაც ღია ცილინდრული ჭურჭელი და მასში მოთავსებული სითხე ბრუნავს ვერტიკალური ღერძის გარშემო მუდმივი კუთხური სიჩქარით (ნახ. 4.9) მოძრაობის დაწყებისას ჭურჭელი თან წარიტაცებს უშუალოდ ფსკერსა და კედლებთან მდებარე სითხის შრეებს, ხოლო მათგან დაცილებული სითხის ნაწილაკები თანდათანობით მოძრაობაში მოვლენ შიგა ხახუნის (სიბლანტის) გავლენით. დროის გარკვეული მონაკვეთის შემდეგ სითხის მთელი მასა დაიწყებს ბრუნვას ჭურჭელთან ერთად იმავე კუთხური სიჩქარით და ამ უკანასკნელის მიმართ იქნება ფარდობით უძრაობაში (წონასწორობაში).

განსახილველ შემთხვევაში სითხის თითოეულ ნაწილაკზე (მაგალითად, M ნაწილაკზე) მოცულობითი ძალებიდან იმოქმე-

დებს სიმძიმის ძალა (mg) და ინერციის ცენტრიდანული ძალა $\left(\frac{mu^2}{r} = \frac{m\omega^2 r^2}{r} = m\omega^2 r\right)$. სიმძიმისა და ინერციის ცენტრიდანული ძალების აჩქარების (F′და F′′) გეგმილები Ox, Oy და Oz ღერძებზე შესაბამისად ტოლი იქნება:

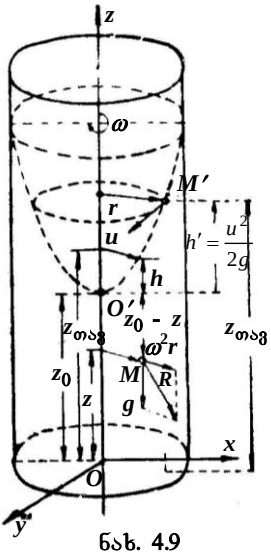
$$F'_x = 0;\ F'_y = 0;\ F'_z = -g;$$

$$F''_x = \omega^2 x;\ F''_y = \omega^2 y;\ F''_z = 0.$$

ჯამური აჩქარების გეგმილები მიიღება აღნიშნული ორი სახის აჩქარების გეგმილების შეკრებით:

$$F_x = F'_x + F''_x = \omega^2 x;\ F_y = F'_y + F''_y = \omega^2 y;$$

$$F_z = F'_z + F''_z = -g. \qquad (4.30)$$



ნახ. 4.9

უპირველეს ყოვლისა, გამოვიკვლიოთ ჭურჭელში სითხის თანაბარი წნევის ზედაპირების (დონის ზედაპირების) ფორმა; ამისათვის ვისარგებლოთ (4.14) განტოლებით. თუ მასში (4.30) გამოსახულებებიდან შევიტანთ F_x, F_y და F_z-ის მნიშვნელობებს, მივიღებთ:

$$\omega^2 x dx + \omega^2 y dy - g dz = 0,$$

საიდანაც ინტეგრირებით

$$\frac{1}{2}\omega^2\left(x^2 + y^2\right) - gz = C_0. \qquad (4.31)$$

ეს განტოლება გვიჩვენებს, რომ განსახილველ შემთხვევაში თანაბარი წნევის ზედაპირები **ბრუნვითი პარაბოლოიდებია**. C_0-თვის სხვადასხვა მნიშვნელობის მიცემით მიიღება ბრუნვითი პარაბოლოიდების ოჯახი. სითხის თავისუფალი ზედაპირის (როგორც თანაბარი წნევის ზედაპირის კერძო სახის) განტოლების მისაღებად სასაზღვრო პირობებიდან დავადგინოთ C_0-ის მნიშვნელობა. ამისათვის თავისუფალი ზედაპირის ორდინატები აღვნიშნოთ $z_{თავ.}$-ით და გავითვალისწინოთ, რომ მისი უდაბლესი O′ წერტილისათვის $z_{თავ.} = z_0$, x=0 და y=0, მაშინ გვექნება:

$$C_0 = gz_0.$$

თუ გავითვალისწინებთ იმასაც, რომ $x^2 + y^2 = z^2$, მაშინ

$$\frac{\omega^2 r^2}{2} = g\left(z_{თავ.} - z_0\right). \qquad (4.32)$$

აქედან გამომდინარე, რომ თავისუფალი ზედაპირის თითოეული წერტილი, მაგალითად M′, მდებარეობს O′ წერტილიდან

$$h' = z_{თავ.} - z_0 = \frac{\omega^2 r^2}{2g} = \frac{u^2}{2g} \qquad (4.33)$$

სიმაღლეზე, სადაც u=ωr არის ბრუნვის ღერძიდან r მანძილით დაცილებული ნაწილაკის წრფივი სიჩქარე.

ახლა გავარკვიოთ სითხეში წნევის განაწილების კანონი. (4.7) განტოლებაში შესაბამის მნიშვნელობათა ჩასმით და ინტეგრირებით გვექნება:

$$p = \rho\left[-gz + \omega^2\left(\frac{x^2 + y^2}{2}\right)\right] + C_1$$

ანუ

$$p = \rho\left(-gz + \frac{\omega^2 r^2}{2}\right) + C_1 .$$

C_1 მუდმივას განვსაზღვრავთ იმ პირობიდან, რომ სითხის თავისუფალ ზედაპირზე მდებარე წერტილებისათვის (ვთქვათ, O′ წერტილისათვის) წნევა p_0-ის ტოლია, ამასთან $z=z_0$, $r=0$ და მაშასადამე

$$C_1 = p_0 - \rho(-gz_0), \quad \text{ანუ} \quad C_1 = p_0 + \gamma z_0 .$$

C_1-ის ამ მნიშვნელობის ჩასმით p გამოსახულებაში მივიღებთ:

$$p = p_0 + \gamma(z_0 + z) + \rho\frac{\omega^2 r^2}{2}, \qquad (4.34)$$

სადაც z არის სითხის ნებისმიერი წერტილის კოორდინატი.

(4.33) გამოსახულებიდან

$$\frac{\omega^2 r^2}{2} = gh',$$

ამიტომ (4.34) განტოლება შეიძლება ასე ჩაიწეროს:

$$p = p_o + \gamma(z_o - z) + \gamma h'$$

ანუ

$$p = p_o + \gamma h, \qquad (4.35)$$

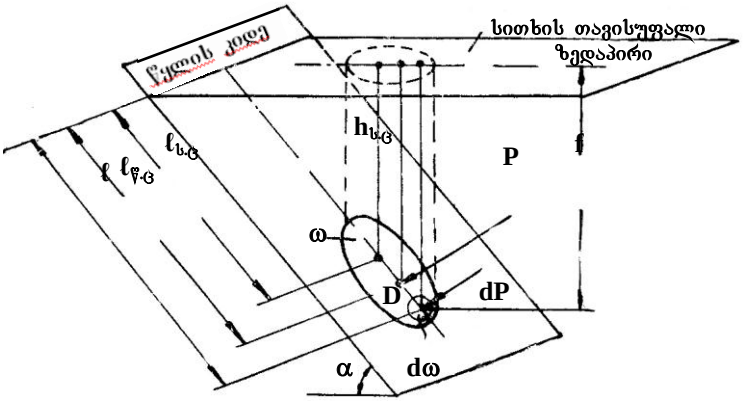
სადაც h არის ნაწილაკის ჩაძირვის სიღრმე სითხის თავისუფალი პარაბოლოიდური ზედაპირიდან.

მიღებული გამოსახულება გვიჩვენებს, რომ ფარდობით წონასწორობაში მყოფ სითხეში წნევა განაწილებულია ჰიდროსტატიკური კანონით.

§ 4.8. ნებისმიერად ორიენტირებულ ბრტყელ ზედაპირზე მოქმედი სითხის წნევის ძალა. წნევის ცენტრი

1. ჰიდროსტატიკური წნევის ძალის სიდიდე. წარმოვიდგინოთ ღია ჭურჭელი, რომელიც შევსებულია სითხით და რომლის ერთი კედელი ჰორიზონტისადმი დახრილია რაიმე α კუთხით (ნახ. 4.10). დახრილ კედელზე გამოვყოთ ვერტიკალური სიმეტრიის სიბრტყის მქონე ω ფართობი და გამოვთვალოთ მასზე მოქმედი სრული ჰიდროსტატიკური წნევის ძალა. ამისათვის, განვიხილოთ ω ზედაპირის უსასრულოდ მცირე dω ელემენტი, რომელიც სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან ჩაძირულია h სიღრმეზე. თუ dω ფართობის საზღვრებში სრულ (აბსოლუტურ) წნევას აღვნიშნავთ p_{sr}-ით, მაშინ მასზე მოქმედი ელემენტარული წნევის ძალა

$$dP_{sr} = p_{sr}d\omega = (p_o + \gamma h)d\omega. \qquad (4.36)$$



ნახ. 4.10

დახრილი ზედაპირის ω ფართობი შეიძლება განხილულ იქნეს, როგორც ელემენტარული dω ფართობების ჯამი, რომელთაგან თითოეულზე იმოქმედებს შესაბამისი ელემენტარული dP ძალა. იმის გამო, რომ ეს ძალები მოქმედების ზედაპირის მართობულია და, მაშასადამე, ურთიერთპარალელურიც, მთლიანად ω ფართობზე მოქმედი სრული წნევის ძალა გამოითვლება, როგორც ყველა ელემენტარული ძალის ინტეგრალური ჯამი.

$$P_{სრ} = \int_{\omega} p_{სრ} d\omega = \int_{\omega} (p_0 + \gamma h) d\omega = p_0 \omega + \gamma \int_{\omega} h d\omega. \qquad (4.37)$$

(4.10) ნახაზიდან ჩანს, რომ $h = \ell \sin\alpha$, ამიტომ

$$\int_{\omega} h d\omega = \sin\alpha \int_{\omega} l d\omega.$$

მაგრამ $\int_{\omega} l d\omega$ არის ω ფართობის სტატიკური მომენტი წყლის კიდის (წყლის კიდე არის სითხის თავისუფალი ზედაპირისა და დახრილი ზედაპირის გადაკვეთის წირი) მიმართ, რომელიც ფართობისა და მისი სიმძიმის ცენტრის (C) წყლის კიდემდე დაცილების მანძილის ($l_{ს.ც}$) ნამრავლის ტოლია:

$$\int_{\omega} h d\omega = \sin\alpha \int_{\omega} l d\omega = \sin\alpha l_{ს.ც} \omega = h_{ს.ც} \omega,$$

სადაც $h_{ს.ც}$ არის ω ფართობის სიმძიმის ცენტრის (C) ჩაძირვის სიღრმე სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან.

აღნიშნულის გათვალისწინებით, (4.37) გამოსახულება ასე გადაიწერება:

$$P_{სრ} = (p_o + \gamma h_{ს.ც}) \omega. \qquad (4.38)$$

მაშასადამე, სრული წნევის ძალა ნებისმიერად ორიენტირებულ ბრტყელ ზედაპირზე სველი ზედაპირის ფართობისა და სიმძიმის ცენტრში მოქმედ სრული ჰიდროსტატიკური წნევის ნამრავლის ტოლია.

ჭარბი (მანომეტრული) წნევის კერძო შემთხვევისათვის, როდესაც $p_0 = p_{ატ}$, შესაბამისად, გვექნება:

$$P_{ჭარ} = \gamma h_{ს.ც} \omega \ . \qquad (4.39)$$

ამგვარად, ჭარბი წნევის ძალა ბრტყელ ზედაპირზე სველი ფართობისა და მისი სიმძიმის ცენტრში მოქმედი ჭარბი ჰიდროსტატიკური წნევის ნამრავლის ტოლია.

2. წნევის ცენტრი. ზედაპირზე მოქმედი ჭარბი წნევის ძალის სიდიდისა და მიმართულების გარდა უნდა დადგინდეს მისი მოდების წერტილის (D) მდებარეობაც. ამ წერტილს ჭარბი წნევის ცენტრი ანუ, უბრალოდ, **წნევის ცენტრი ეწოდება.**

როგორც აღვნიშნეთ, განსახილველ ω ფართობს აქვს ვერტიკალური სიმეტრიის სიბრტყე, რის გამოც წნევის ცენტრი მოთავსებული იქნება სიმეტრიის ღერძზე და მისი მდებარეობის დასადგენად საკმარისია განვსაზღვროთ D წერტილის დაცილება სველი ზედაპირის გაყოლებით ($l_{წნ.ც}$) წყლის კიდემდე. ამისათვის ვისარგებლოთ მომენტთა განტოლებით, რომლის თანახმად

ტოლქმედი ძალის მომენტი ნებისმიერი ღერძის მიმართ (ჩვენს შემთხვევაში წყლის კიდის მიმართ) ტოლია შემდგენი ძალების მომენტების ჯამისა იმავე ღერძის მიმართ

$$P_{\text{ჭარ}} l_{\text{წნც}} = \int_{\omega} l dP_{\text{ჭარ}} .$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ $P_{\text{ჭარ}} = \gamma h_{\text{ც}} \omega$ და $dP_{\text{War}} = \gamma h d\omega =$ $= \gamma l \sin\alpha d\omega$, მაშინ მომენტთა განტოლება ასე გადაიწერება:

$$\gamma h_{\text{ც}} \omega l_{\text{წნც}} = \gamma \sin\alpha \int_{\omega} l^2 d\omega = \gamma \sin\alpha I_{\text{წჟკ}} , \qquad (4.40)$$

სადაც $I_{\text{წჟკ}} = \int_{\omega} l^2 d\omega$ არის სველი ზედაპირის ფართობის ინერციის მომენტი წყლის კიდის მიმართ.

(4.40) გამოსახულებიდან

$$l_{\text{წნც}} = \frac{l_{\text{წჟკ}} \sin\alpha}{\omega l_{\text{ც}}} = \frac{I_{\text{წჟკ}}}{\omega l_{\text{ც}}} . \qquad (4.41)$$

მაგრამ ω ფართობის ინერციის მომენტი მისი სიმძიმის ცენტრზე გამავალი ცენტრალური ღერძის პარალელური ღერძის მიმართ ($I_{\text{წჟკ}}$) შეიძლება ასე გამოვსახოთ:

$$I_{\text{წჟკ}} = I_0 + \omega l^2_{\text{ც}} ,$$

სადაც I_0 არის ω ფართობის ინერციის მომენტი ცენტრალური ღერძის მიმართ. მაშინ (4.41) გამოსახულება ასეთ სახეს მიიღებს:

$$l_{\text{წნც}} = l_{\text{ც}} + \frac{I_0}{\omega l_{\text{ც}}} . \qquad (4.42)$$

მაშასადამე, წნევის ცენტრი ყოველთვის მდებარეობს ω ფართობის სიმძიმის ცენტრის ქვემოთ $I_0/\omega l_{\text{ც}}$ მანძილზე; ამ სიდიდეს ხშირად **ექსცენტრისიტეტს უწოდებენ.**

§ 4.9. ჰიდროსტატიკური წნევის ეპიურა

პრაქტიკული ამოცანების გადაწყვეტისას ხშირად საჭირო ხდება სრული და ჭარბი ჰიდროსტატიკური წნევების ეპიურის აგება. მათემატიკური თვალსაზრისით, ჰიდროსტატიკის ძირითადი განტოლება $P_{\text{სრ(აბს)}} = p_o + \gamma h$ წარმოადგენს წრფის განტოლებას თავისუფალი p_0 წევრით და γ კუთხური კოეფიციენტით.

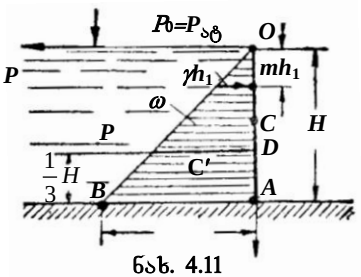
თუ $p_o > p_{\text{ატ}}$, მსგავსი სახე და შინაარსი გააჩნია აგრეთვე ჭარბი წნევის განტოლებასაც

$$P_{ჭარ} = \left(p_o + p_{ატ}\right)\gamma h,$$

სადაც $p_o = p_{ატ}$ განტოლების თავისუფალი წევრია.

თუ $p_o = p_{ატ}$, მაშინ $P_{ჭარ} = \gamma h$. განტოლება გამოისახება კოორდინატთა სათავეში გამავალი წრფით.

ავიღოთ მართკუთხედის ფორმის OA და b სიგანის ბრტყელი ვერტიკალური ზედაპირი (კედელი) და განვიხილოთ მასზე მოქმედი ჭარბი წნევა, როცა $p_o = p_{ატ}$ (ნახ. 4.11). კოორდინატთა სათავე ავირჩიოთ სითხის თავისუფალი ზედაპირისა და ვერტიკალური ბრტყელი კედლის გადაკვეთის O წერტილში, ხოლო p და h ღერძები მივმართოთ ისე, როგორც ეს ნახაზზეა ნაჩვენები; მაშინ თავისუფალი ზედაპირიდან h_1 სიღრმით ჩაძირული და კედლის ზედაპირზე მდებარე m წერტილში ჭარბი (შემდეგში ჭარბ ჰიდროსტატიკურ წნევას აღვნიშნავთ p-თი, ინდექსის გარეშე) წნევა იქნება:



ნახ. 4.11

$$P_{ჭარ} = \gamma h_1 \ . \qquad (4.43)$$

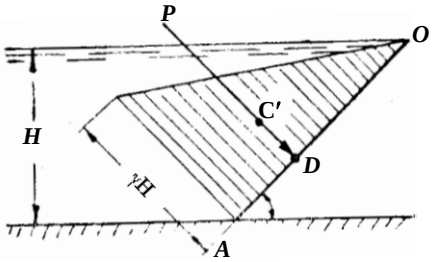
წარმოვიდგინოთ, რომ m წერტილი გადაადგილდება კედლის გაყოლებაზე O სათავიდან A წერტილამდე. ამ დროს ზემოთ აღნიშნულის საფუძველზე და (4.43) გამოსახულების თანახმად, ჰიდროსტატიკური წნევის ცვლილება მოხდება წრფივი კანონით, O წერტილისათვის, როცა h=0-ს, p=0; A წერტილისათვის, როცა h=H-ს, p=γH.

A წერტილიდან ზედაპირის მართობულად გადავზომოთ γH მონაკვეთი (ჰიდროსტატიკური წნევა ყოველთვის ზედაპირის მართობულად მოქმედებს) და მიღებული B წერტილი შევაერთოთ O-თან სწორი ხაზით; მივიღებთ OAB მართკუთხა სამკუთხედს, რომელსაც **ჭარბი ჰიდროსტატიკური წნევის ეპიურას** უწოდებენ. ჰორიზონტალური წრფეების მონაკვეთები OA ვერტიკალსა და OB დახრილს შორის გრაფიკულად გამოსახავს ჭარბი ჰიდროსტატიკური წნევის სიდიდეებს სათანადო წერტილებში.

OAB სამკუთხედის ფართობი გამრავლებული b სიგრძეზე მოგვცემს კედელზე მოქმედი ჭარბი ჰიდროსტასტიკური წნევის ძალის სიდიდეს:

$$P = \omega b = \frac{\gamma H^2}{2} b\,. \qquad (4.44)$$

ეს ძალა OA ზედაპირის მართობულია და გადის C′ სიმძიმის ცენტრზე. მაშასადამე, ძალის ცენტრი (D) მოთავსებული იქნება ფსკერიდან $\frac{1}{3}H$ მანძილზე.



ნახ. 4.12

მართკუთხედის ფორმის ბრტყელი დახრილი კედლის შემთხვევაში ჭარბი ჰიდროსტატიკური წნევის ეპიურას ექნება (4.12) ნახაზზე ნაჩვენები სახე. წნევის ძალა გამოითვლება ფორმულით:

$$P = \omega b = \frac{\gamma HOA}{2} b\,. \qquad (4.45)$$

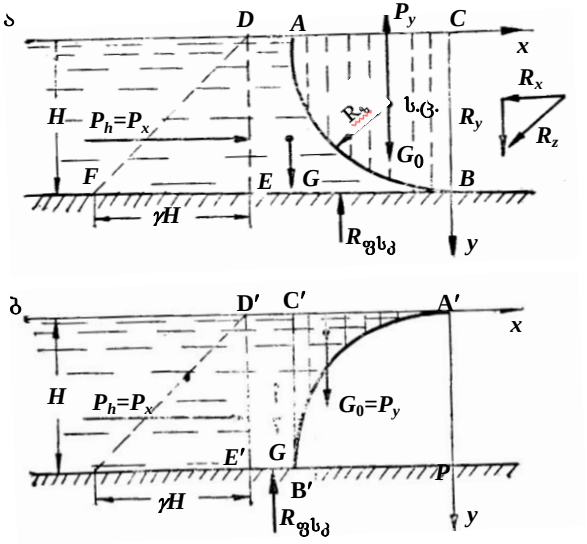
§ 4.10. სითხის წნევის ძალის განსაზღვრა მრუდწირულ (ცილინდრულ) ზედაპირებზე

ბრტყელ კედლებზე წნევის ძალის სიდიდე განისაზღვრება ელემენტარულ $d\omega$ ფართობებზე მოქმედი ელემენტარული dP ძალების შეჯამებით. ამასთან, სხვადასხვა ელემენტარული ძალა, მათი პარალელობისა და ერთნაირი მიმართულების გამო, დაიყვანება ერთ ტოლქმედზე.

ნებისმიერი ფორმის მრუდწირული ზედაპირის შემთხვევაში სითხის წნევის ელემენტარული ძალები, რომლებიც ზედაპირის შესაბამის წერტილებში მართობულად მოქმედებს, ერთმანეთის პარალელური არ არის. ზოგად შემთხვევაში, ისინი სივრცეში ადგენს ნებისმიერად ორიენტირებულ ძალთა სისტემას და შეიძლება არ გადაიკვეთოს ერთ წერტილში, ე.ი. არ ჰქონდეს ტოლქმედი.

ქვემოთ განვიხილავთ მრუდწირული ზედაპირების მხოლოდ უმარტივეს შემთხვევებს – ცილინდრულ ზედაპირებს, როდესაც მათზე მოქმედი ელემენტარული წნევის ძალები ერთ ტოლქმედზე დაიყვანება; ამასთან მხედველობაში გვექნება, რომ სითხის თავისუფალ ზედაპირზე მოქმედი წნევა ატმოსფერულის ტოლია და განვსაზღვრავთ მხოლოდ ჭარბი ჰიდროსტისტიკური წნევის ძალას (P).

(4.13) ნახაზზე ნაჩვენებია ნახაზის სიბრტყის მართობული AB და A′B′ ცილინდრული ზედაპირები. ჯერ განვიხილოთ AB ზედაპირი, რომელიც არ განიცდის ზემოდან სითხის დაწოლას (ნახ. 4.13, ა). ზედაპირის მსახველის სიგრძე აღვნიშნოთ b-ით, ხოლო მასზე მოქმედი ჰიდროსტატიკური წნევის ძალის ჰორიზონტალური და ვერტიკალური შემდგენები, შესაბამისად, P_x-ით და P_y-ით.



ნახ. 4.13

აღნიშნული შემდგენების მოსაძებნად გავატაროთ DE ვერტიკალური სიბრტყე და განვიხილოთ მის მიერ გამოყოფილი სითხის ABED მოცულობის წონასწორობა. ამ მოცულობაზე იმოქმედებს საკუთარი სიმძიმის G ძალა, ჰიდროსტატიკური წნევის P_R ძალა და ფსკერისა და ცილინდრული ზედაპირის $R_{ფსკ}$ და $R_ზ$ რეაქციის ძალები. მაშინ ABED მოცულობის წონასწორობის განტოლებებს x და y ღერძებისათვის შემდეგი სახე ექნება:

$$R_h + R_x = 0\,;\; G + R_y - R_{ფსკ} = 0\,,$$

სადაც

$$R_x = -P_h\,;\; R_y = R_{ფსკ} - G.$$

ამ გამოსახულებაში R_x და R_y, შესაბამისად, AB ზედაპირის რეაქციის ძალის ($R_ზ$) ჰორიზონტალური და ვერტიკალური შემდგენებია. რადგან არ ვიცით მათი მიმართულებები, ისინი გამოსახულებებში შეგვყავს „+“ ნიშნით. მაგრამ $P_x = -R_x$; $P_y = -R_y$, ამიტომ

$$P_x = P_h\ , \qquad 4.46)$$

$$R_y = -\left(R_{ფსკ} - G\right). \qquad (4.47)$$

4.13, ა ნახაზიდან ადვილად განისაზღვრება $R_{ფსკ}$ და G ძალების მნიშვნელობები

$$R_{ფსკ} = ფართ.(CADEB)b\gamma; G = ფართ.(ADEB)b\gamma\ ;$$

მაშინ (4.47) გამოსახულებიდან

$$P_y = -\left[ფართ.(CADEB) - ფართ.(ADEB)\right]b\gamma$$

ანუ

$$P_y = -\left[ფართ.(CAB)\right]\gamma h = W_{წნსხ}\gamma = -G_0\ , \qquad (4.48)$$

სადაც CAB ფართობი არის ე.წ. „წნევის სხეულის“ განივკვეთის ფართობი (4.13,ა ნახაზზე ის დაშტრიხულია);

$G_0 = W_{წნსხ}$ – წნევის სხეულის“ მოცულობის მქონე სითხის წონა.

(4.46) და (4.48) გამოსახულების საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ შემდეგი:

1. სითხის ჭარბი წნევის ძალის (P) **ჰორიზონტალური შემდგენი** (P_x) ცილინდრული ზედაპირის ვერტიკალურ გეგმილზე b სიგანისა და DE სიმაღლის სწორკუთხედის ფორმის ბრტყელ ვერტიკალურ ნაკვეთზე მოქმედი წნევის ძალის ტოლია. ამის გამო, $P_x = P_h$ ძალა შეიძლება გამოვსახოთ ჰიდროსტატიკური წნევის DEF სამკუთხედით.

$$P_x = \frac{\gamma H^2}{2} b$$

2. ჭარბი წნევის ძალის **ვერტიკალური შემდგენი** (P_y) მინუს ნიშნით აღებული „წნევის სხეულის“ წონის ტოლია.

როდესაც ცილინდრული ზედაპირი განიცდის ზემოდან სითხის დაწოლას (ნახ. 4.13, ბ), ჰორიზონტალური შემდგენი გამოითვლება წინა შემთხვევის ანალოგიურად, ხოლო ვერტიკალური შემდგენი

$$P_y = +G_o\ . \qquad (4.49)$$

ჰორიზონტალურ და ვერტიკალურ შემდგენთა გეომეტრიული შეკრებით მივიღებთ ცილინდრულ ზედაპირზე მოქმედი წნევის ძალის სიდიდეს

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_x^2} \ . \qquad (4.50)$$

წნევის ძალის მიმართულება განისაზღვრება ჰორიზონტთან მისი დახრის კუთხით, რომელიც გავიგოთ შემდეგი თანაფარდობებიდან:

$$\cos\alpha = \frac{P_x}{P}, \ \text{ან} \ \cos\alpha = \frac{P_y}{P} \ . \qquad (4.51)$$

როგორც ვნახეთ, ვერტიკალური შემდგენის დასადგენად საჭირო ხდება „წნევის სხეულის“ აგება. მის ასაგებად ცილინდრული ზედაპირის ფსკერთან გადაკვეთის წერტილიდან უნდა აღვმართოთ ვერტიკალი სითხის თავისუფალი ზედაპირის ან მისი გაგრძელების გადაკვეთამდე. მიიღება ნაკვეთი, ე.წ. „წნევის სხეულის“ განივკვეთი, რომელიც შემოსაზღვრულია აღნიშნული ვერტიკალით, მრუდწირული ზედაპირით და სითხის თავისუფალი ზედაპირით (ან მისი გაგრძელებით); პრიზმას, რომელსაც ფუძედ აქვს ასეთი ფორმა, ხოლო სიმაღლედ მრუდწირული ზედაპირის b მსახველი, ეწოდება „წნევის სხეული“. თუ „წნევის სხეული„ შევსებული აღმოჩნდება სითხით (4.13,ბ), მაშინ ეს უკანასკნელი მოქმედებს მრუდწირულ ზედაპირზე და დადებითი ვერტიკალური P_y შემდგენი მიმართული იქნება ქვემოთ; თუ „წნევის სხეული“ სითხით არ არის შევსებული (ნახ. 4.13,ა), მაშინ ის ფიქტიურია და უარყოფითი ვერტიკალური P_y შემდგენი მიმართულია ზემოთ.

თავი V. ჰიდროდინამიკის საფუძვლები

§ 5.1. ჰიდროდინამიკის საგანი

ჰიდროდინამიკა არის ჰიდრავლიკის ნაწილი, რომელიც შეისწავლის სითხის მოძრაობის კანონებს და აგრეთვე სითხესა და მყარ სხეულებს შორის მექანიკური ურთიერთობების საკითხებს. ჰიდროდინამიკაში ბევრი ამოცანა წყდება იდეალური სითხის მოდელის განხილვის საფუძველზე, ხოლო შემდეგ – მიღებული შედეგებისა და დასკვნების გავრცელება რეალურ სითხეზე ხდება ცდით დადგენილი შესწორების კოეფიციენტების გამოყენებით.

სითხის მოძრაობის შესწავლის საწყის პირობა თვით თხევადი გარემოს ბუნების ცოდნაა. ჰიდრავლიკა სითხეს განიხილავს არა როგორც მოლეკულებისაგან შედგენილ მატე-

რიალურ სხეულს, არამედ **სივრცის მთლიანად შემავსებელ უწყვეტ გარემოს** (სიცარიელეთ გარეშე), რაც მნიშვნელოვნად ამარტივებს სითხის მოძრაობის შესწავლის მეთოდიკას და შესაძლებლობას გვაძლევს განვიხილოთ მისი სიჩქარე, წნევა და ტემპერატურა, როგორც უწყვეტად ცვლადი სიდიდეები ნაკადის მთელ არეში, ე.ი. როგორც იმ სივრცის კოორდინატების ფუნქციები, რომელშიც იმყოფება სითხე. აღნიშნულის გათვალისწინებით, სითხის მოძრაობა შეიძლება განვიხილოთ, როგორც მთლიანი მატერიალური გარემოს უწყვეტი და თანამიმდევრული დეფორმაციის პროცესი.

სითხის მოძრაობის კანონების შესწავლისას ფრიად მნიშვნელოვანია დადგინდეს განსხვავება **„სივრცის წერტილისა“** და **„სითხის ნაწილაკის“** ცნებებს შორის. სივრცის წერტილი არის გეომეტრიული ცნება, რომლის მდებარეობაც სივრცეში განისაზღვრება x,y და z კოორდინატებით; სითხის ნაწილაკი არის უსასრულოდ მცირე მასისა და მოცულობის მქონე ფიზიკური სიდიდე. მაშასადამე, სითხის ნაწილაკი შეიძლება განვიხილოთ, როგორც სივრცის წერტილი, რომელსაც გააჩნია სითხის ყველა ფიზიკური თვისება.

ჰიდროდინამიკის ამოცანაა მოძრაობის ძირითად მახასიათებლებს შორის თანაფარდობის დადგენა. როგორც წესი, სითხეზე მოქმედი გარე ძალები წინასწარ ცნობილია; საძიებელია ჰიდროდინამიკური წნევა (p) და სითხის ნაწილაკის მოძრაობის სიჩქარე. ნაწილაკის მოძრაობის სრული სიჩქარე (ე.წ. ადგილობრივი ანუ ნამდვილი სიჩქარე) აღვნიშნოთ u-თი, ხოლო მისი შემდგენები კოორდინატთა ღერძებზე (სიჩქარის კომპონენტები), შესაბამისად, u_x, u_y, u_z-ით. რადგანაც u, p და მათი კომპონენტები კოორდინატებისა და დროის ფუნქციაა, ამიტომ ჰიდროდინამიკური ამოცანის ამოხსნა დაიყვანება შემდეგ უწყვეტ ფუნქციათა მოძებნამდე:

$$\left.\begin{aligned} u_x &= \int_1(x,y,z,t);\\ u_y &= \int_2(x,y,z,t);\\ u_z &= \int_3(x,y,z,t);\\ p &= \int_4(x,y,z,t). \end{aligned}\right\} \qquad (5.1)$$

შევნიშნავთ, რომ ბლანტი სითხის მოძრაობისას ჰიდროდინამიკური წნევა (p) დამოკიდებულია „მოძრაობის ზედაპირის“ ორიენტაციაზე, ე.ი. ჰიდროსტატიკური წნევისაგან განსხვავებით, $p_x \neq p_y \neq p_z$. თუმცა სითხის მოძრაობის ანალიზის დროს სარგებლობენ ჰიპოთეზით

$$p = \frac{1}{3}\left(p_x + p_y + p_z\right), \tag{5.2}$$

სადაც p_x, p_y და p_z არის ნორმალური ძაბვები განსახილველ წერტილში, რომლებიც მიეკუთვნება ნებისმიერად გატარებული სამ ორთოგონალური „მოქმედების ზედაპირს“, ხოლო (5.2) ფორმულით გამოთვლილ P-ს მნიშვნელობას მიაწერენ ჰიდროსტატიკური წნევის თვისებებს.

საძიებელ სიდიდედ შეიძლება ჩაგვეთვალა სითხის ρ სიმკვრივეც, რომელიც აგრეთვე კოორდინატებისა და დროის ფუნქციაა. მაგრამ ვითვალისწინებთ, რომ ჰიდრავლიკა ძირითადად იხილავს წვეთოვან, ე.ი. პრაქტიკულად უკუმშველ სითხეებს, რის გამოც ρ შეიძლება მივიღოთ მუდმივ სიდიდედ (მხოლოდ ზოგიერთი საკითხის განხილვისას მივიჩნევთ ρ-ს ცვლად სიდიდედ).

§ 5.2. სითხის მოძრაობის აღწერის მეთოდები

სითხის მოძრაობა განსაზღვრულია მხოლოდ მაშინ, როდესაც ცნობილია მისი ყოველი ნაწილაკის მოძრაობა, ე.ი. როცა თითოეული ნაწილაკის მდებარეობა მოცემულია, როგორც კოორდინატებისა და დროის ფუნქცია.

ვთქვათ, დროის საწყის t_0 მომენტში ნაწილაკების მდებარეობა განსაზღვრულია a,b,c საწყისი კოორდინატებით $[A_1(a_1,b_1,c_1)$ $A_2(a_2,b_2,c_2)\ldots$ $A_n(a_n,b_n,c_n)]$. დროის შემდეგ t მომენტისათვის ნაწილაკები შეიცვლის მდებარეობას სივრცეში და მათი კოორდინატები იქნება: x,y,z. ამასთან, მოძრაობა ითვლება განსაზღვრულად, თუ ყოველი ნაწილაკისათვის (საწყისი a,b,c კოორდინატებით) მოცემულია მათი ცვლადი x,y,z კოორდინატები, როგორც დროის ფუნქცია:

$$\left.\begin{aligned} x &= \int_1(a,b,c,t);\\ y &= \int_2(a,b,c,t);\\ z &= \int_3(a,b,c,t). \end{aligned}\right\} \tag{5.3}$$

ეს განტოლებები გამოსახავს ნაწილაკების ტრაექტორიათა ოჯახს პარამეტრული სახით; ამასთან, a,b და c თითოეული ტრაექტორიის განმსაზღვრელ პარამეტრებს წარმოადგენს და ცნობილია, როგორც ლაგრანჟის ცვლადები.

(5.3) განტოლებები მთლიანად განსაზღვრავს ნაკადის კინემატიკას, რადგანაც მათი საშუალებით (ავაგებთ რა ნაკადის ყველა ნაწილაკის მოძრაობის ტრაექტორიას) განისაზღვრება

სითხის ნაწილაკების, როგორც ელემენტარულ გადაადგილებათა სიდიდე. u სიჩქარე და ω აჩქარება ნაკადის ნებისმიერ წერტილში, დროის ნებისმიერ მომენტში

$$u_x = \frac{\partial x}{\partial t}, u_y = \frac{\partial y}{\partial t}, u_z = \frac{\partial z}{\partial t}. \tag{5.4}$$

$$\omega_x = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}, \omega_y = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, \omega_z = \frac{\partial^2 z}{\partial t^2}. \tag{5.5}$$

მოძრაობის აღწერის ეს ხერხი პირველად ლ. ეილერმა ჩამოაყალიბა. მაგრამ ჰიდროდინამიკაში ის ლაგრანჟის სახელით არის ცნობილი, რადგანაც მან წარმატებით გამოიყენა ეს მეთოდი წყლის ზედაპირზე ტალღების გავრცელების თეორიაში.

სხვადასხვა სახის თეორიული და პრაქტიკული ამოცანის გადასაწყვეტად საჭიროა ვიცოდეთ სითხის ნაწილაკების კინემატიკური და დინამიკური მახასიათებლების ცვლილება დროის მიხედვით სივრცის მოცემულ (ფიქსირებულ) წერტილებში (ლ. ეილერის მეთოდი).

მოძრავი სითხის მიერ დაკავებული უძრავი სივრცის სხვადასხვა წერტილში და დროის განსხვავებულ მომენტში ნაწილაკების სიჩქარე სხვადასხვა იქნება. ამიტომ, განსახილველი სივრცე შეიძლება დავახასიათოთ, როგორც დროის მიხედვით უწყვეტად ცვლადი სიჩქარეების ველი. ვიპოვოთ ამ ველის ცვლილებების კანონი, ნიშნავს გამოვსახოთ $u(u_x,u_y,u_z)$ სიჩქარით t დროისა და უძრავი სივრცის წერტილების x,y,z კოორდინატების ფუნქციის სახით:

$$\left.\begin{aligned} u_x &= \int_1(x, y, z, t); \\ u_y &= \int_2(x, y, z, t); \\ u_z &= \int_3(x, y, z, t). \end{aligned}\right\} \tag{5.6}$$

x,y,z და t სიდიდეებს ეილერის ცვლადები ეწოდება.

თუ მოძრავი სითხის მიერ დაკავებული უძრავი სივრცის ყოველ წერტილში სიჩქარეები დროის მიხედვით იცვლება, მაშინ სითხის მოძრაობას **დაუმყარებელი (არასტაციონარული)** ეწოდება. ამასთან სიჩქარე, რომელიც მოცემულ წერტილში დროის მიხედვით იცვლება, განიცდის ცვლილებას აგრეთვე ნაწილაკის ერთი მდებარეობიდან მეორეში გადაადგილების დროსაც. მაშასადამე, დაუმყარებელი მოძრაობის შემთხვევაში სიჩქარეები სივრცის წერტილთა კოორდინატებისა და დროის ფუნქციაა და განისაზღვრება (5.6) განტოლებით.

დაუმყარებელი მოძრაობის მარტივი მაგალითია სითხის გამოდინება რეზერვუარის კედლის ხვრეტიდან ცვლადი დაწნევის დროს.

თუ მოძრავი სითხის მიერ დაკავებული უძრავი სივრცის ყოველ წერტილში სიჩქარეები დროის მიხედვით არ იცვლება, მაშინ სითხის მოძრაობას **დამყარებული (სტაციონარული)** ეწოდება. დამყარებული მოძრაობის შემთხვევაში (5.6) განტოლებები ასეთ სახეს ღებულობს:

$$\left.\begin{aligned} u_x &= \int_1(x,y,z);\\ u_y &= \int_2(x,y,z);\\ u_z &= \int_3(x,y,z). \end{aligned}\right\} \tag{5.7}$$

დამყარებული მოძრაობის შემთხვევაში დაცული უნდა იყოს პირობა:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = \frac{\partial u_y}{\partial t} = \frac{\partial u_z}{\partial t} = 0\,. \tag{5.8}$$

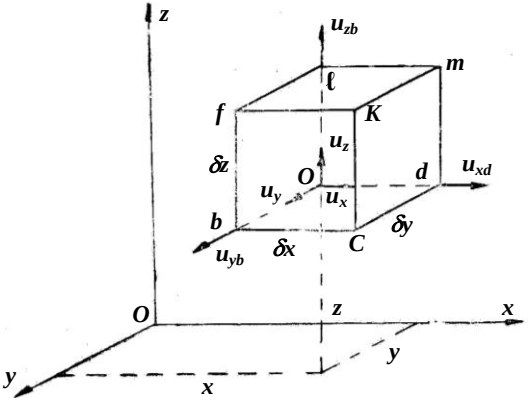
შევნიშნავთ, რომ u სიჩქარის კერძო წარმოებულის ნულთან ტოლობა $\left(\frac{\partial u}{\partial t} = 0\right)$ არ არის საკმარისი იმისათვის, რომ მოძრაობა იყოს დამყარებული, რადგანაც $\frac{\partial u}{\partial t}$ კერძო წარმოებული გამოსახავს მხოლოდ სიჩქარის მოდულის ცვლილებას დროის მიხედვით და თუ $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$, ეს ნიშნავს, რომ u სიჩქარე სიდიდით უცვლელია, ხოლო მიმართულებით შეიძლება იცვლებოდეს, ე.ი. მოძრაობა შეიძლება იყოს დაუმყარებელი. იმისათვის, რომ u სიჩქარე მუდმივი იყოს როგორც სიდიდით, ისე მიმართულებით საჭიროა (5.8) პირობის შესრულება.

§ 5.3. სითხის უსასრულოდ მცირე ნაწილაკის მოძრაობა. ცნება გრიგალური და არაგრიგალური მოძრაობის შესახებ

სითხის მოძრაობის შესწავლის საკითხი დაკავშირებულია უსასრულოდ მცირე ნაწილაკის მოძრაობის ცნებასთან. სითხის ნაწილაკების მოძრაობა მყარი ნაწილაკების (ნივთიერი წერტილის) მოძრაობისაგან იმით განსხვავდება, რომ ამ უკანასკნელის ფორმა მოძრაობისას უცვლელი რჩება, სითხის ნაწილაკები კი - ინარჩუნებს მოცულობას, მაგრამ განიცდის **დეფორმაციას.**

სითხის ელემენტარული მოცულობა, ზოგად შემთხვევაში, შეიძლება დაიშალოს, **გადატანით** და **ბრუნვით** მოძრაობებთან ერთად, სითხეებისათვის დამახასიათებელ **დეფორმაციულ** მოძრაობად (ეს უკანასკნელი მოცულობის, ფორმის ცვლილებასთან არის დაკავშირებული). დეფორმაციული მოძრაობა გულისხმობს სითხის ელემენტარული მოცულობის წრფივი ზომებისა და მათ შორის მოთავსებული კუთხეების ცვლილებას.

განვიხილოთ მოძრავი სითხის პარალელეპიპედის ფორმის ელემენტარული მოცულობა მცირე, მაგრამ სასრული ზომების $\delta x, \delta y$ და δz წიბოებით (ნახ. 5.1). ვთქვათ, a(x,y,z) წერტილში ადგილობრივი სიჩქარის კომპონენტებია u_x, u_y და u_z. სიჩქარეთა ფუნქციის უწყვეტობის გამო, სიჩქარის კომპონენტებს პარალელეპიპედის სხვა წვეროებში ექნება განსხვავებული მნიშვნელობები. მაგალითისათვის განვიხილოთ xoy სიბრტყესთან მდებარე abcd წახნაგი; თუ სიჩქარის კომპონენტებს, რომლებიც კოორდინატების უწყვეტი ფუნქციაა, გავშლით ტეილორის მწკრივის სახით და უგულებელვყოფთ მეორე რიგის უსასრულოდ მცირე სიდიდეებს, მივიღებთ სიჩქარის კომპონენტების მნიშვნელობებს Ox და Oy ღერძების მიმართულებით წახნაგის დანარჩენ წვეროებში, ე.ი. b, c და d წერტილებში (ნახ. 5.2).



ნახ. 5.1

b წერტილისათვის:

$$u_{xb} = u_x + \frac{\partial u_x}{\partial y}\delta y\,, \quad u_{yb} = u_y + \frac{\partial u_y}{\partial y}\delta y;$$

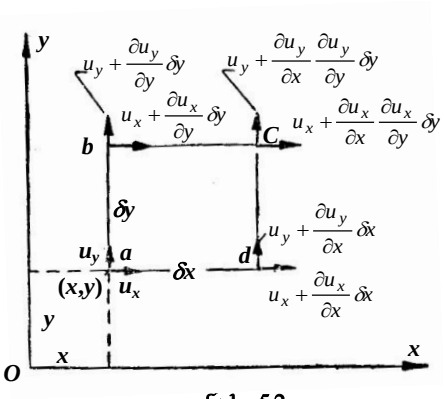
c წერტილისათვის

$$u_{xc} = u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x}\delta x + \frac{\partial u_x}{\partial y}\delta y \;;\; u_{yc} = u_y + \frac{\partial u_y}{\partial x}\delta x + \frac{\partial u_y}{\partial y}\delta y;$$

d წერტილისათვის

$$u_{xd} = u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x}\delta x \;;\; u_{yd} = u_y + \frac{\partial u_y}{\partial x}\delta x.$$

სიჩქარის ასეთი კომპონენტების არსებობა განაპირობებს abcd წახნაგის არა მარტო გადაადგილებას სივრცეში, არამედ ერთდროულად მისი ფორმის ცვლილებასაც. წახნაგის ჯამური მოძრაობა შეიძლება დავიყვანოთ მოძრაობის შემდეგ ელემენტარულ ფორმებზე (ნახ. 5.3):



ნახ. 5.2

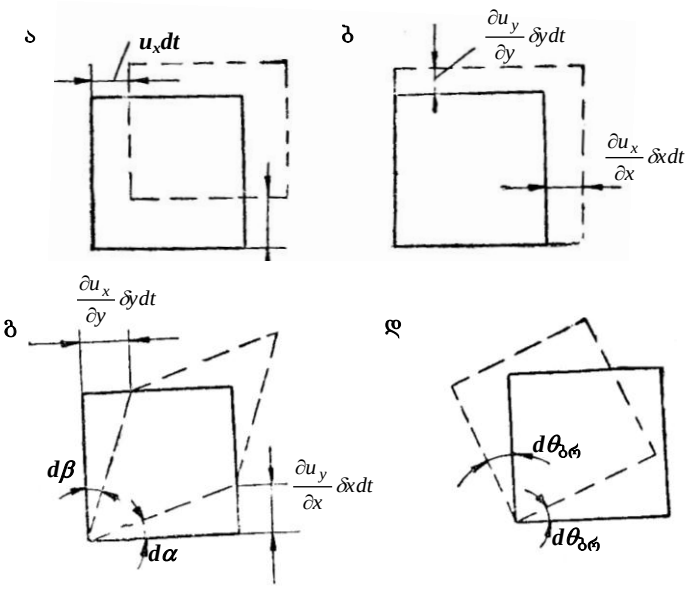
ა) წახნაგის გადაადგილება Ox და Oy ღერძების მიმართულებით (ნახ. 5.3,ა). ამ შემთხვევაში განსახილველი ელემენტი ასრულებს გადატანით მოძრაობას და მყარი სხეულის მსგავსად არ იცვლის ფორმას. dt დროის განმავლობაში δx და δy წიბოები გადაადგილდება შესაბამისად $u_x dt$ და $u_y dt$ მანძილზე და წახნაგი დაიკავებს 5.3,ა ნახაზზე წყვეტილით ნაჩვენებ მდებარეობას.

ბ) წახნაგის გვერდების თითოეული წყვილის სიგრძის ცვლილება (წრფივი დეფორმაცია) (ნახ. 5.3,ბ). წრფივი დეფორმაციის სიდიდე განისაზღვრება მოპირდაპირე წიბოების თითოეული წყვილის მიერ dt დროში გავლილი $\frac{\partial u_x}{\partial x}\delta x dt$ და $\frac{\partial u_y}{\partial y}\delta y dt$ მანძილების სხვაობით.

გ) წახნაგის კუთხეების სიდიდის ცვლილება (კუთხური დეფორმაცია) (ნახ. 5.3, გ). ამ სახის დეფორმაცია განპირობებულია კუთხეების გამრუდებით (დაცერებით); კერძოდ, a(x,y,z) წერტილთან მდებარე მართი კუთხის ცვლილება განისაზღვრება δx და δy გვერდების მობრუნებით, შესაბამისად, dα და dβ კუთხეებით. უსასრულოდ მცირე dt დროის განმავლობაში dα და

dβ ნაზარდები შეიძლება ჩავთვალოთ მათი ტანგენსების ტოლად, ამიტომ

$$d\alpha = \frac{\frac{\partial u_y}{\partial x}\delta x dt}{\delta x}\ ;\ d\beta = \frac{\frac{\partial u_x}{\partial y}\delta y dt}{\delta y}.$$



ნახ. 5.3

კუთხური დეფორმაციის სრული სიდიდე წარმოადგენს ამ ორი კუთხის ჯამს:

$$d\alpha + d\beta = \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y}\right)dt\ . \qquad (a)$$

შევნიშნავთ, რომ კუთხური დეფორმაცია, რომელიც გამოწვეულია წახნაგის თითოეული წიბოს მობრუნებით ტოლია:

$$d\theta = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y}\right)dt.$$

დ) წახნაგის მობრუნება ამა თუ იმ მიმართულებით (ნახ. 5.2,დ). ამ შემთხვევაში განსახილველი ელემენტი, ფორმის შეუცვლელად, მყარი სხეულის მსგავსად, შემობრუნდება $d\theta$ კუთხით, რომელიც ადვილად გამოითვლება კუთხური დეფორმაციის საშუალებით:

$$d\theta_{\text{br}} = d\alpha - d\theta = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y}\right)dt.$$

ბრუნვის კუთხური სიჩქარე (განსახილველ შემთხვევაში OZ ღერძის გარშემო) ტოლი იქნება:

$$\omega_z = \frac{d\theta_{\text{ბრ}}}{dt} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y}\right). \qquad \text{(b)}$$

თუ შევადგენთ ანალოგიურ გამოსახულებებს კოორდინატთა სისტემის დანარჩენი ღერძებისათვის, მაშინ ზემოაღნიშნულის საფუძველზე შეგვიძლია ჩამოვაყალიბოთ შემდეგი დებულებები:

1. წრფივი დეფორმაციის სიჩქარე (წრფივი დეფორმაცია - $\frac{\partial u_x}{\partial x}dx$; $\frac{\partial u_y}{\partial y}dy$; $\frac{\partial u_z}{\partial z}dz$) – რომლითაც ხდება მოპირდაპირე წახნაგების გაწევა;

2. კუთხური დეფორმაციის სიჩქარე (კუთხური დეფორმაცია) – ახასიათებს პარალელურ წახნაგთა ფარდობითი ძვრის სიჩქარეს. (a) ტოლობიდან გვექნება

$$\left.\begin{aligned}\theta_x &= \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z};\\ \theta_y &= \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x};\\ \theta_z &= \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y}.\end{aligned}\right\} \qquad (5.9)$$

ინდექსი θ-სთან გვიჩვენებს, რომ განიხილება კუთხური დეფორმაციის სიჩქარე მოცემული საკოორდინატო ღერძის მართობულ სიბრტყეში;

3. (b) ტოლობის მიხედვით შეგვიძლია შევადგინოთ კუთხური სიჩქარის კომპონენტების გამოსათვლელი დამოკიდებულებები:

$$\left.\begin{aligned}\omega_x &= \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_z}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial z}\right);\\ \omega_y &= \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_x}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial x}\right);\\ \omega_z &= \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y}\right)\end{aligned}\right\} \qquad (5.10)$$

კუთხური სიჩქარე გამოითვლება ფორმულით:

$$\omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2}; \qquad (5.11)$$

4. სითხის ელემენტარული ნაწილაკის მოძრაობა შედგება გადატანითი, ბრუნვითი და დეფორმაციული მოძრაობებისაგან. მოძრაობის ჯამური სიჩქარე

$$\bar{u} = \bar{u}_{გად} + \bar{u}_{ბრ} + \bar{u}_{def}. \qquad (5.12)$$

სითხის მოძრაობას, რომლის დროსაც ხდება ნაწილაკების ბრუნვა საკუთარი ღერძის გარშემო, გრიგალური მოძრაობა ეწოდება.

მოძრაობას, რომლის დროსაც სითხის ნაწილაკთა ბრუნვა არ ხდება (ω=0), არაგრიგალური ეწოდება. ამ დროს $\omega_x = \omega_y = \omega_z = 0$, ე.ი

$$\frac{\partial u_z}{\partial y} = \frac{\partial u_y}{\partial z} \;\; ; \;\; \frac{\partial u_x}{\partial z} = \frac{\partial u_z}{\partial x} ; \;\; \frac{\partial u_y}{\partial x} = \frac{\partial u_x}{\partial y}. \qquad (5.13)$$

არაგრიგალურ მოძრაობას, ჩვეულებრივ, პოტენციურს უწოდებენ (მხედველობაში უნდა ვიქონიოთ, რომ პოტენციური მოძრაობისას სითხის ელემენტარული მოცულობები სასრული (და არა უსასრულოდ მცირე) გადაადგილებისას შეიძლება გარკვეული კუთხით შემობრუნეს (ე.ი. შეასრულოს)). (5.13) პირობების შესრულება შესაძლებელია მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ სიჩქარის u_x, u_y, და u_z კომპონენტები არის რაიმე φ(x,y,z) ფუნქციის კერძო წარმოებულები შესაბამისი კოორდინატებით, ე.ი.

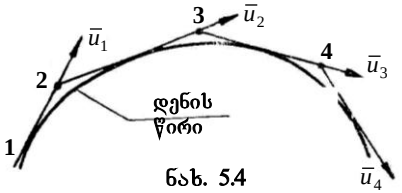
$$u_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \; u_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \;\; u_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \qquad (5.14)$$

$\Phi(x, y, z)$ ფუნქციას სიჩქარის პოტენციალი ეწოდება.

§ 5.4. დენის წირი. დენის მილაკი. ელემენტარული ჭავლი

განვიხილოთ მოძრავი სითხით დაკავებული უძრავი სივრცე და დავუშვათ, რომ ამ სივრცის პირველ წერტილში (ნახ. 5.4) დროის მოცემული t მომენტში ნაწილაკის მოძრაობის ადგილობრივი სიჩქარის ვექტორი არის $\bar{u}_1$, რომელიც გამოსახავს განსახილველ წერტილში ნამდვილი სიჩქარის სიდიდეს და მიმართულებას. ამ ვექტორზე პირველი წერტილიდან უსასრულოდ მცირე მანძილით დაცილებული მეორე წერტილში დროის იმავე მომენტში სიჩქარის ვექტორი იქნება $\bar{u}_2$, ანალოგიურად შეიძლება გავატაროთ $\bar{u}_3$ $\bar{u}_4$ და ა.შ. ვექტორები. ყველა ამ ვექტორის

მომვლები (წერტილთა უსასრულოდ დიდი რაოდენობის შემთხვევაში) ზღვარში მოგვცემს რაღაც სივრცულ მრუდს, რომელსაც დენის წირი ეწოდება. ეს უკანასკნელი ისეთი წირია, რომლის ყოველ წერტილში დროის მოცემული t მომენტისათვის ნაწილაკის ადგილობრივ სიჩქარეს ამ წირის მხების მიმართულება აქვს.



ნახ. 5.4

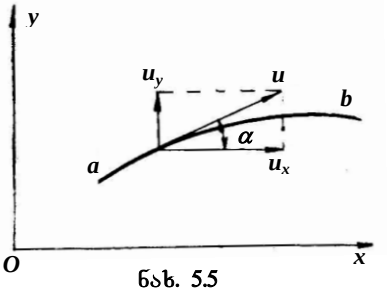
დამყარებული მოძრაობისას დენის წირი და მასზე განლაგებული სითხის ნაწილაკების მოძრაობის ტრაექტორია ერთმანეთს თანხვდება, რადგანაც სიჩქარის სიდიდე და მიმართულება სითხის მიერ დაკავებული სივრცის სხვადასხვა წერტილში დროის მიხედვით არ იცვლება. შევნიშნავთ, რომ მოძრაობის ტრაექტორია ასახავს სითხის რომელიმე კონკრეტული ნაწილაკის მოძრაობის კვალს. ეილერის მეთოდით სითხის მოძრაობის გამოკვლევისას მოძრაობის გეომეტრიული მახასიათებელს წარმოადგენს არა ტრაექტორია, როგორც ეს ლაგრანჟის მეთოდისათვის არის დამახასიათებელი, არამედ დენის წირი. დაუმყარებელი მოძრაობისას დენის წირი, რომელიც დროის მიხედვით (განუწყვეტლივ) იცვლის ფორმას და რომელიც დროის ყოველ მომენტში სხვადასხვა ნაწილაკისაგან შედგება, არ თანხვდება სითხის ნაწილაკის ტრაექტორიას, რადგანაც ერთ დენის წირზე განლაგებული სითხის ნაწილაკების სიჩქარის სიდიდე და მიმართულება დროის მიხედვით იცვლება და დროის შემდგომ მომენტში ისინი სხვადასხვა დენის წირზე აღმოჩნდება. მაგრამ დენის წირი დაუმყარებელი მოძრაობის შემთხვევაში შეიძლება წარმოადგენდეს სითხის ნაწილაკების ტრაექტორიას, თუ u სიჩქარეები დროის მიხედვით იცვლის სიდიდეს, მიმართულებით – უცვლელი რჩება.

დენის წირის განტოლების შესადგენად დავუშვათ, რომ დროის მოცემულ მომენტში დენის წირს აქვს ab წირის სახე (ნახ. 5.5), მისი განტოლება ასე ჩაიწერება: $y = f(x)$, სადაც x და y მოცემულ წირზე მდებარე წერტილთა კოორდინატებია.

ნახაზიდან გვაქვს

$$\frac{u_y}{U_x} = tg\alpha ,$$

სადაც α არის დენის წირის მხების მიერ აბსცისთა Ox ღერძთან შედგენილი კუთხე.



ნახ. 5.5

$y = f(x)$ ფუნქციის გაწარმოებით მივიღებთ

$$\frac{dy}{dx} = \frac{df(x)}{dx} = tg\alpha.$$

ამიტომ

$$tg\alpha = \frac{u_y}{u_x} = \frac{dy}{dx}$$

ანუ

$$\frac{dx}{u_x} = \frac{dy}{u_y}, \text{ ან } \frac{dx}{f_1(x,y,z,t)} = \frac{dy}{f_2(x,y,z,t)}. \tag{5.15}$$

ეს უკანასკნელი დენის წირის დიფერენციალური განტოლებაა. სივრცული მოძრაობისას დენის წირის განტოლება ასე ჩაიწერება:

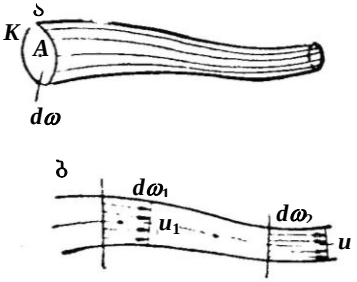
$$\frac{dx}{u_x} = \frac{dy}{u_y} = \frac{dz}{u_z} \tag{5.16}$$

ანუ

$$\frac{dx}{f_1(x,y,z,t)} = \frac{dy}{f_2(x,y,z,t)} = \frac{dz}{f_3(x,y,z,t)}, \tag{5.16}'$$

სადაც t არის პარამეტრი, რომლისთვისაც სხვადასხვა მნიშვნელობის მინიჭებით შეიძლება დროის ყოველი მომენტისათვის დენის წირის განსაზღვრა.

მოძრავ სითხეში A წერტილთან გამოვყოთ K კონტურით შემოსაზღვრული უსასრულოდ მცირე dω ფართობი და ამ კონტურის ყოველ წერტილში გავატაროთ დენის წირები (ნახ. 5.6,ა). მილისებრ ზედაპირს, რომელიც წარმოიქმნება ჩაკეტილი K კონტურის წერტილებზე dω ფართობის მართობულად გამავალი **დენის წირებით**, ეწოდება **დენის მილაკი**, ხოლო მასში მოძრავი სითხის მასის ნაწილს – **ელემენტარული ჭავლი**.



ნახ. 5.6

დამყარებული მოძრაობისას ელემენტარული ჭავლი ხასიათდება შემდეგი თვისებებით:

1. ჭავლის ფორმა და მდებარე-

ობა დროის მიხედვით არ იცვლება, ვინაიდან დროში უცვლელი რჩება ჭავლის შემდგენი დენის წირები;

2. იმის გამო, რომ ჭავლის გვერდითი ზედაპირი წარმოქმნილია დენის წირებით, რომლებიც ამავე დროს სითხის ნაწილაკების ტრაექტორიებს წარმოადგენს, არ ხდება სითხის გადინება გვერდითი ზედაპირებიდან; ჭავლი მოთავსებულია წყალგაუმტარ მილაკში, რომლის კედელსაც სისქე არ გააჩნია;

3. dω ელემენტარული ფართობის სიმცირის გამო, ადგილობრივი u სიჩქარეები ჭავლის განივკვეთის ყველა წერტილში ერთნაირია; ჭავლის გასწვრივ კი სიჩქარეები, როგორც ჭავლის განივკვეთები, ზოგად შემთხვევაში, შეიძლება იცვლებოდეს (ნახ. 5.5,ბ).

სითხის რაოდენობას, რომელიც ჭავლის ნებისმიერ განივკვეთში დროის ერთეულში გაედინება, ელემენტარული ჭავლის ხარჯი ეწოდება.

$$dQ = ud\omega\,, \tag{5.17}$$

სადაც u არის სიჩქარე ჭავლის კვეთში ანუ ადგილობრივი სიჩქარე.

შევნიშნავთ, რომ ელემენტარული ჭავლის ყველა კვეთში დროის მოცემულ მომენტში ხარჯი ერთნაირია:

$$dQ = u_1 d\omega_1 = u_2 d\omega_2 = \ldots = u_i d\omega_i\,,$$

ე.ი

$$dQ = ud\omega = cons. \tag{5.17}'$$

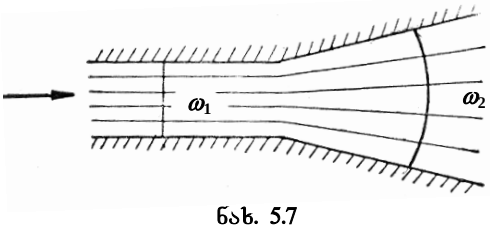
ეს განტოლება ელემენტარული ჭავლის უწყვეტობის განტოლებას წარმოადგენს.

§ 5.5. სითხის ნაკადი, ცოცხალი კვეთი, ხარჯი

სითხის ნაკადი არის ელემენტარული ჭავლების უსასრულოდ დიდი რაოდენობის ერთობლიობა. ნაკადის განივკვეთს, რომელიც გატარებულია თითოეული დენის წირის მართობულად და ნაკადის შიგნით ძევს, **ცოცხალი კვეთი ეწოდება**, ხოლო ამ კვეთის ფართობს – ცოცხალი კვეთის ფართობი და აღინიშნება ω-თი. დენის წირების პარალელურობის შემთხვევაში ცოცხალი კვეთი ბრტყელია. თუ დენის წირები ერთმანეთის პარალელური არ არიან, მაშინ ცოცხალი კვეთი ბრტყელი არ იქნება (ნახ. 5.7).

სითხის მოცულობას, რომელიც დროის ერთეულში ნაკადის ცოცხალ კვეთში გაედინება, სითხის ხარჯი (ნაკადის ხარჯი) ეწოდება და Q-თი აღინიშნება. იგი ელემენტარული ჭავლების ხარჯების ჯამის ტოლია.

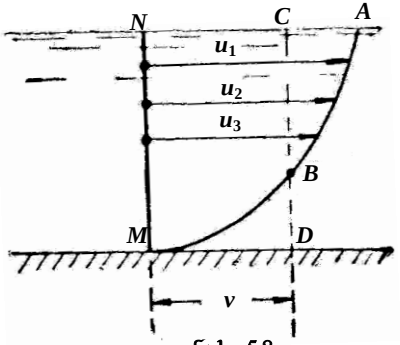
$$Q = \int_{\omega} dQ = \int_{\omega} ud\omega\,. \tag{5.18}$$



ნახ. 5.7

ინტეგრალი აიღება ცოცხალი კვეთის მთელ ω ფართობზე.

იმის გამო, რომ ცალკეული ელემენტარული ჭავლებისათვის ადგილობრივი სიჩქარეები, ზოგად შემთხვევაში, სხვადასხვაა, ამიტომ ნაკადის ცოცხალი კვეთის სხვადასხვა წერტილში სიჩქარე სხვადასხვა იქნება. ნაკადის ცოცხალ კვეთში ან მის გარკვეულ ვერტიკალზე u ადგილობრივი სიჩქარის განაწილების კანონის გრაფიკულ გამოსახულებას **სიჩქარეთა ეპიურა** ეწოდება (ნახ. 5.8).



ნახ. 5.8

ხშირად ცოცხალ კვეთში ადგილობრივ სიჩქარეთა განაწილების თეორიული დამოკიდებულების დადგენა შეუძლებელია, რის გამოც ასეთ შემთხვევაში (5.18) გამოსახულების ინტეგრირება ვერ ხერხდება. ბევრი პრაქტიკული ამოცანის გადასაწყვეტად საჭიროა ვიცოდეთ Q ხარჯი და არ არის აუცილებელი u ადგილობრივი სიჩქარის ცოდნა კვეთის ყოველ წერტილში. ამიტომ, გაანგარიშებათა გასამარტივებლად მოცემული ცოცხალი კვეთისათვის შემოაქვთ საშუალო სიჩქარის ცნება.

ნაკადის საშუალო სიჩქარე არის ფიქტიური (პირობითი, წარმოსახვითი), ბრტყელი ცოცხალი კვეთის ყველა წერტილისათვის ერთნაირი სიჩქარე, რომლის დროსაც ხარჯი ისეთივეა, როგორიც კვეთში ადგილობრივ სიჩქარეთა ნამდვილი განაწილებისას. საშუალო სიჩქარე აღინიშნება v-ით და გამოითვლება თანაფარდობით:

$$v = \frac{Q}{\omega} \quad \text{ან} \quad v = \frac{\int u d\omega}{\omega}. \tag{5.19}$$

აქედან $$Q = \omega v. \qquad (5.20)$$

თუ დავუშვებთ, რომ უკუმშველი სითხის ნაკადი უწყვეტად ავსებს მის მიერ დაკავებულ სივრცეს და ნაკადის შემომსაზღვრელი გვერდითი ზედაპირიდან არ ხდება სითხის გადინება და მოდინება, მაშინ დამყარებული მოძრაობის შემთხვევაში ნაკადის ცოცხალი კვეთებისათვის ადგილი ექნება ტოლობას:

$$Q = \omega_1 v_1 = \omega_2 v_2 = \ldots \omega_i v_i = const. \qquad (5.20)'$$

მიღებულ გამოსახულებას ხარჯის მუდმივობის ან ნაკადის უწყვეტობის ჰიდრავლიკურ განტოლებას უწოდებენ. (5.20´) განტოლებიდან მივიღებთ:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1}. \qquad (5.20)''$$

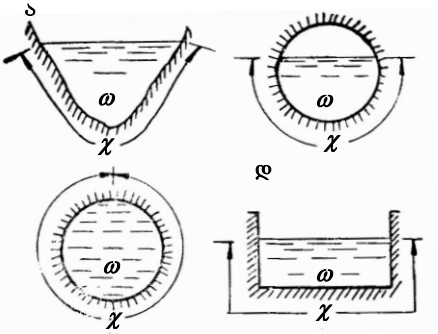
ე.ი. საშუალო სიჩქარეები შესაბამისი ცოცხალი კვეთების ფართობების უკუპროპორციულია.

ხარჯი იზომება $მ^3/წმ$-ობით, აგრეთვე ლ/წმ-ობით (1 $მ^3/წმ$=1000ლ/წმ).

განვიხილოთ b სიგანის სწორკუთხა განივკვეთის მქონე წყალსადინარი და ჩავთვალოთ, რომ მისი რომელიმე ბრტყელი ცოცხალი კვეთის ნებისმიერ MN ვერტიკალზე სიჩქარეთა განაწილების ეპიურას აქვს NBMN ფიგურის სახე (ნახ. 5.7) აღვნიშნოთ მისი ფართობი q-ით; რიცხობრივად ის გამოსახავს წყალსადინარის ერთეულ სიგანეში გამავალ ხარჯს და მას **კუთრ ხარჯს** უწოდებენ. მაშინ qb ნამრავლი მოგვცემს ნაკადის ხარჯის სიდიდეს

$$Q = qb. \qquad (5.21)$$

(5.7) ნახაზზე გავატაროთ CD წირი ისე, რომ მიღებული CDMN სწორკუთხედის ფართობი ABMN ფიგურის ფართობის ტოლი აღმოჩნდეს. ამ სწორკუთხედის სიგანე ვერტიკალზე საშუალო სიჩქარის ($\bar{u}_3$) მნიშვნელობა იქნება, რომელიც განსახილველი შემთხვევისათვის (სიჩქარეთა ეპიურები ერთი და იგივე ბრტყელი კვეთის სხვადასხვა ვერტიკალზე ერთნაირია) ნაკადის საშუალო სიჩქარესაც (v) წარმოადგენს, სინამდვილეში სიჩქარეთა ეპიურები ერთი



ნახ. 5.9

და იგივე ბრტყელი კვეთის სხვადასხვა ვერტიკალზე ერთნაირი არ არის (წყალსადინარის ნაპირებთან მოახლოებისას სიჩქარეები მცირდება). ამიტომ, მთელი ცოცხალი კვეთისათვის აგებული სიჩქარეთა "ეპიურა" იქნება რაიმე სივრცული სხეული, რომლის მოცულობაც რიცხობრივად Q ხარჯის ტოლია.

სველი პერიმეტრი (χ) ეწოდება კალაპოტის განივკვეთის იმ ნაწილის პერიმეტრს, რომელიც სითხის ნაკადით სველდება (ნახ. 5.9).

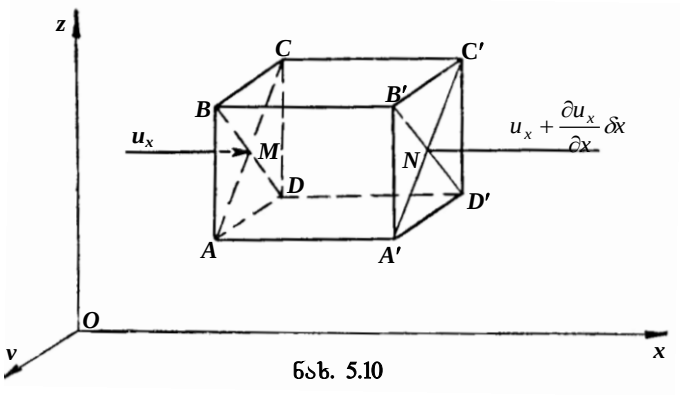
ჰიდრავლიკური რადიუსი (R) ეწოდება ცოცხალი კვეთის ფართობის (ω) ფარდობას სველ პერიმეტრთან:

$$R = \frac{\omega}{\chi}. \qquad (5.22)$$

ჰიდრავლიკური რადიუსი მიახლოებით ახასიათებს ნაკადის ცოცხალი კვეთის ფორმას და მას რაიმე განსაკუთრებული ფიზიკური აზრი არ გააჩნია.

§ 5.6. მოძრავი სითხის უწყვეტობის დიფერენციალური განტოლება

განვიხილოთ **უკუმშველი, ერთგვაროვანი** (ρ=const) სითხის ნაკადი, რომელიც უწყვეტად ავსებს მის მიერ დაკავებულ სივრცეს. ასეთ გარემოში გამოვყოთ უძრავი ელემენტარული პარალელეპიპედი კოორდინატთა ღერძების პარალელური $\delta x, \delta y, \delta z$ წიბოებით (ნახ. 5.10) და გამოვიკვლიოთ მასში გვერდითი წახნაგებიდან სითხის შედინების და გადინების პირობები.



ნახ. 5.10

დავუშვათ, რომ ABCD წახნაგის სიმძიმის ცენტრში (M წერტილში) სიჩქარე u-ს ტოლია, ხოლო მისი გეგმილებია (კომპონენტებია, შემდგენებია) u_x, u_y, u_z. თუ გავიხსენებთ, რომ u სიჩქარე და, მაშასადამე, მისი შემდგენებიც, კოორდინატების უწყვეტი ფუნქციაა $u = f(x, y, z)$, მაშინ $A'B'C'D'$ წახნაგის სიმძიმის ცენტრში (N წერტილში), რომელიც M წერტილიდან დაცილებულია δx მანძილით, სიჩქარის შემდგენი Ox ღერძზე $\left(u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x}\delta x\right)$ სიდიდის ტოლი იქნება. $\frac{\partial u_x}{\partial x}$ კერძო წარმოებული (აიღება კერძო წარმოებული, რადგანაც M-დან N წერტილში გადაადგილებისას იცვლება მხოლოდ x კოორდინატი) გამოსახავს u_x კომპონენტის ცვლილებას ერთეულ მანძილზე Ox ღერძის გასწვრივ, ამიტომ $\left(\frac{\partial u_x}{\partial x}\delta x\right)$ ნამრავლი მოგვცემს u_x-ის ცვლილებას მთელ $\delta x = MN$ მანძილზე. ფრჩხილებში მოთავსებულ გამოსახულებაში u_x-ს ემატება ეს ცვლილება, რადგანაც განიხილება M წერტილიდან N წერტილისაკენ მოძრაობა Ox ღერძის დადებითი მიმართულებით. იმის გამო, რომ ელემენტარული პარალელეპიპედის წახნაგების ფართობები მეორე რიგის უსასრულოდ მცირე სიდიდეებია, ამიტომ u_x და $\left(u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x}\delta x\right)$ სიჩქარეები შეიძლება მივიჩვიოთ სათანადო წახნაგების ყველა წერტილისათვის მუდმივ საშუალო სიჩქარეებად. მაშინ სითხის მასა, რომელიც შეედინება პარალელეპიპედში ABCD წახნაგიდან და გამოედინება $A'B'C'D'$ წახნაგიდან dt დროის განმავლობაში, შესაბამისად, $\rho\delta y\delta z u_x dt$ და $\rho, \delta y, \delta z\left(u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x}\delta x\right)$dt სიდიდეების ტოლი იქნება. მათი სხვაობა მოგვცემს პარალელეპიპედში სითხის მასის ცვლილებას Ox ღერძის მიმართულებით dt დროის განმავლობაში

$$\delta M_x = \rho\delta y\delta z\left(u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x}\delta x\right)dt - \rho\delta y\delta z u_x dt = \rho\frac{\partial u_x}{\partial x}\delta x\delta y\delta z dt.$$

ანალოგიურად მივიღებთ მასის ცვლილებათა შესაბამისი სიდიდეებს Oy და Oz ღერძების გასწვრივ

$$\delta M_y = \rho \frac{\partial u_y}{\partial y} \delta x \delta y \delta z dt \; ; \quad \delta M_z = \rho \frac{\partial u_z}{\partial z} \delta x \delta y \delta z dt .$$

სითხის მასის ცვლილებათა მიღებული მნიშვნელობების ჯამი მოგვცემს მასის საერთო δM ცვლილებას, რომელიც უკუმშველი სითხის უწყვეტი გარემოსათვის ნულის ტოლი უნდა იყოს:

$$\delta M = \delta M_x + \delta M_y + \delta M_z = 0,$$

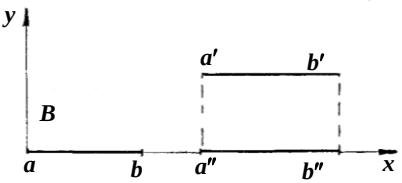
ანუ

$$\rho \frac{\partial u_x}{\partial x} \delta x \delta y \delta z dt + \rho \frac{\partial u_y}{\partial y} \delta x \delta y \delta z dt + \rho \frac{\partial u_z}{\partial z} \delta x \delta y \delta z dt = 0.$$

საიდანაც

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0. \qquad (5.23)$$

(5.23) გამოსახულება არის **უკუმშველი, ერთგვაროვანი სითხის უწყვეტობის დიფერენციალური** განტოლება. $\frac{\partial u_x}{\partial x}, \frac{\partial u_y}{\partial y}, \frac{\partial u_z}{\partial z}$ კერძო წარმოებულებს გრძივს ან პირდაპირს უწოდებენ; თითოეული მათგანი აღებულია იმ კოორდინატით, რომლის შესაბამის ღერძზე დაგეგმილებულია სიჩქარე. მათი ფიზიკური არსის გასარკვევად განვიხილოთ $\frac{\partial u_x}{\partial x}$ წარმოებული. Ox ღერძზე ავიღოთ ელემენტარული δx სიგრძის ab მონაკვეთი, რომელიც ორ a და b ნაწილაკს აერთებს (ნახ. 5.11). ეს მონაკვეთი Ox ღერძის გასწვრივ გადაადგილებისას dt დროის შემდეგ დაიკავებს a′b′ მდებარეობას. ადვილი შესამჩნევია, რომ აღებული მონაკვეთის სიგრძის ცვლილება (განხილება მონაკვეთის Ox ღერძზე გეგმილის ცვლილება) ტოლი იქნება dt დროის განმავლობაში Ox ღერძის მიმართულებით a და b წერტილების მიერ განვლილი მანძილების სხვაობისა. a წერტილი dt დროში გაივლის $u_x dt$ მანძილს, ხოლო b წერტილი $\left(u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x} \delta x\right)$ dt მანძილს. მაშასადამე, მანძილების სხვაობა იქნება:



ნახ. 5.11

$$\delta l = \left(u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x} \delta x\right) dt - u_x dt = \frac{\partial u_x}{\partial x} \delta x dt \; .$$

δl არის ab მონაკვეთის სიგრძის აბსოლუტური ცვლილება dt დროის განმავლობაში. დროის ერთეულში ეს ცვლილება $\frac{\delta l}{dt} = \frac{\partial u_u}{\partial x}\delta x$ სიდიდის ტოლია. მონაკვეთის სიგრძის ფარდობითი ცვლილება, ე.ი. ცვლილება ერთეულ მანძილზე Ox ღერძის გასწვრივ იქნება:

$$\frac{\left(\frac{\delta l}{dt}\right)}{\delta x} = \frac{\frac{\partial u_x}{\partial x}\delta x}{\delta x} = \frac{\partial u_x}{\delta z}.$$

მაშასადამე, $\frac{\partial u_x}{\partial x}$ კერძო წარმოებული გამოსახავს ab მონაკვეთის ფარდობითი დაგრძელების (ან დამოკლების) სიჩქარეს, ე.ი. მონაკვეთის ფარდობითი წრფივი დეფორმაციის სიჩქარეს Ox ღერძის გასწვრივ. ადვილად დავრწმუნდებით, რომ $\frac{\partial u_y}{\partial y}$ და $\frac{\partial u_z}{\partial z}$ წარმოებულებიც გამოსახავს ფარდობითი წრფივი დეფორმაციების სიჩქარეს, შესაბამისად, Oy და Oz ღერძების მიმართ.

მაშასადამე, სითხის უწყვეტობის დიფერენციალური განტოლება გვიჩვენებს, რომ ელემენტარული პარალელეპიპედის წიბოების ფარდობით წრფივ დეფორმაციათა სიჩქარეების ჯამი ნულის ტოლია. ე.ი. სხვანაირად, სითხის მოძრაობა ისე ხდება, რომ მოცემული მასა ყოველთვის ერთი და იგივე მოცულობას იკავებს.

§ 5.7. გრიგალური მოძრაობა

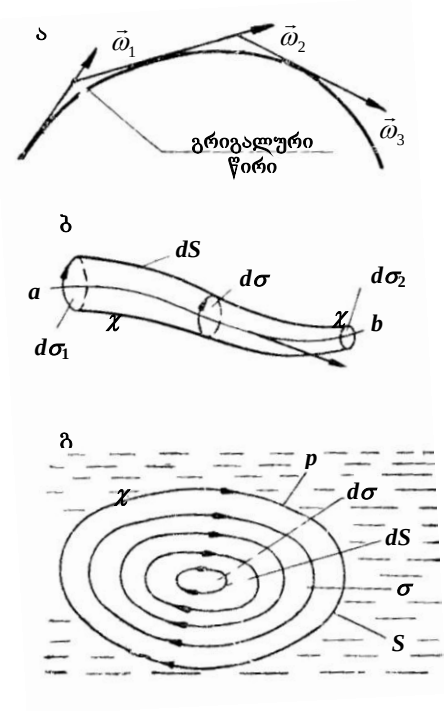
როგორც ადრე აღვნიშნეთ, გრიგალური ეწოდება ისეთ მოძრაობას, რომლის დროსაც სითხის ნაწილაკები ბრუნავს თავიანთი მყისი ღერძების გარშემო რაიმე ω კუთხური სიჩქარით; ე.ი. გრიგალური მოძრაობისას $\omega \neq 0$, იმის გასარკვევად არის, თუ არა მოძრაობა გრიგალური, საჭიროა (5.10) განტოლებებით გამოვთვალოთ გრიგალის კომპონენტები $(\omega_x, \omega_y, \omega)_z$ და თუ ერთი მათგანიც კი ნულისაგან განსხვავებული აღმოჩნდება, მაშინ მოძრაობა იქნება გრიგალური.

სითხის ნაწილაკების ბრუნვის კუთხური სიჩქარის ვექტორს გრიგალი ეწოდება. დენის წირის მსგავსად, რომელიც წრფივ სიჩქარეთა ველს ახასიათებს, გრიგალური წირი (გრიგალწირი) ახასიათებს კუთხურ სიჩქარეთა ველს. გრიგალური ეწოდება

ისეთ წირს, რომლის ყოველ წერტილში, დროის მოცემულ მომენტში სითხის ნაწილაკის კუთხური სიჩქარის ω ვექტორს ამ წერტილში გავლებული მხების მიმართულება აქვს (ნახ. 5.12, ა). გრიგალური წირის დიფერენციალური განტოლება ღენის წირის განტოლების ანალოგიურია

$$\frac{d_x}{\omega_x(x,y,z,t)} = \frac{d_y}{\omega_y(x,y,z,t)} = \frac{d_z}{\omega_z(x,y,z,t)}. \qquad (5.24)$$

სასრულოდ მცირე $d\sigma$ ფართობის შემომსაზღვრელი ჩაკეტილი კონტურის წერტილებზე გამავალი გრიგალური წირების სისტემით შექმნილ მილისებრ ზედაპირს ეწოდება ელემენტარული **გრიგალური მილაკი**, ხოლო მის შიგნით მოთავსებული სითხის ნაწილაკთა ერთობლიობას, რომელიც "საერთო ღერძის" (გრიგალური ab წირის) ირგვლივ ბრუნავს, როგორც მყარი სხეული, ელემენტარული **გრიგალური ზონარი** (ნახ. 5.12,ბ).



ნახ. 5.12

თუ გავიხსენებთ, რომ ω კუთხური სიჩქარის ვექტორი მართობულია სათანადო ბრუნვის სიბრტყისა ($\vec{\omega} \perp d\sigma$), მაშინ დავასკვნათ, რომ გრიგალური წირი მასზე განლაგებული ნაწილაკების ბრუნვის მყისი ღერძია. შევნიშნავთ, რომ ეს უკანასკნელი შეიძლება თვითონ განიცდიდეს გადატანით მოძრაობას და იცვლიდეს ფორმას.

თუ გრიგალური მოძრაობის არეში ავიღებთ სასრული სიდიდის კონტურს და მისი ყველა წერტილიდან, დროის მოცემულ მომენტში, კონტურით შემოსაზღვრული ფართობის მართობულად გავატარებთ გრიგალურ წირებს, მაშინ მივიღებთ მილისებრ ზედაპირს, რომელსაც **სასრული სიდიდის გრიგალური მილი ეწოდება**. მის მიერ შემოსაზღვრული შიგა არე

წარმოადგენს **სასრული ზომის გრიგალურ ზონარს** (ნახ. 5.12,გ). ნახაზზე ნაჩვენებია ელემენტარული გრიგალური ზონარის განივკვეთი $(d\sigma)$ და გრიგალური მილაკის ზედაპირი (dS). თუ გრიგალური ზონარის ბრუნვის გავლენა გავრცელდება მის შემომფარგვლელ გარემოზე, მივიღებთ სასრული ზომის გრიგალურ მილს σ კვეთით და S ზედაპირით (p გრიგალური მოძრაობის საზღვარია).

§ 5.8. პოტენციური (არაგრიგალური) მოძრაობა

პოტენციური (არაგრიგალური) ეწოდება ისეთ მოძრაობას, რომლის დროსაც ნაწილაკის ბრუნვის კუთხური სიჩქარე ω=0-ს, ეს მოითხოვს გრიგალის სამივე კომპონენტის ცალ-ცალკე ნულთან ტოლობას – $\omega_x = \omega_y = \omega_z = 0$ ანუ

$$\frac{\partial u_z}{\partial y} = \frac{\partial u_y}{\partial z}; \frac{\partial u_x}{\partial z} = \frac{\partial u_z}{\partial x}; \frac{\partial u_y}{\partial x} = \frac{\partial u_x}{\partial y}. \qquad (5.13)$$

არაგრიგალურ მოძრაობას პოტენციურს უწოდებენ იმიტომ, რომ (5.13) პირობის შესრულება შესაძლებელია მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ u_x, u_y და u_z სიჩქარის კომპონენტები წარმოადგენს რაიმე $\varphi(x, y, z)$ ფუნქციას ე.წ. **სიჩქარის პოტენციალის**, კერძო წარმოებულებს შესაბამისი კოორდინატებით, ე.ი.

$$u_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; u_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y}; u_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \qquad (5.14)$$

მოძრაობას, რომლისთვისაც არსებობს $\varphi(x, y, z)$ ფუნქცია, ე.ი **სიჩქარის პოტენციალი, პოტენციური მოძრაობა** ეწოდება.

მართლაც, (5.14) გამოსახულებაში მაგალითად, u_y და u_x გავადიფერენციალოთ, შესაბამისად, x-ით და y-ით.

$$\frac{\partial u_y}{\partial x} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}; \frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}.$$

მათი გამოკლებით მივიღებთ (5.13) სისტემის მესამე განტოლებას

$$\frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} = 0 \quad \text{ანუ} \quad \frac{\partial u_y}{\partial x} = \frac{\partial u_x}{\partial y}.$$

რაც იგივეა, რომ $\omega_z = 0$. ანალოგიურად შეიძლება ვაჩვენოთ, რომ სიჩქარის პოტენციალის არსებობისას $\omega_x = \omega_y = 0$.

შევნიშნავთ, რომ კოორდინატების ნებისმიერი ფუნქცია ყოველთვის როდია სიჩქარის პოტენციალი. ეს უკანასკნელი, უპირველეს ყოვლისა, უნდა იყოს უწყვეტი და იძლეოდეს დიფერენცირების საშუალებას.

ვაჩვენოთ, რომ სიჩქარის პოტენციალს აქვს კიდევ ერთი თვისება, ამისათვის უკუმშველი სითხის უწყვეტობის (5.23) დიფერენციალურ განტოლებაში ჩავსვათ სიჩქარის კომპონენტების მნიშვნელობები (5.14) გამოსახულებებიდან, მივიღებთ:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0. \qquad (5.25)$$

ეს განტოლება გვიჩვენებს, რომ პოტენციური ფუნქციის მეორე რიგის კერძო წარმოებულების ჯამი კოორდინატებით ნულის ტოლია. (5.25) განტოლებას ლაპლასის განტოლება ეწოდება, ხოლო φ ფუნქციას, რომელიც ამ პირობას აკმაყოფილებს, ჰარმონიული ფუნქცია. მაშასადამე, პოტენციურ მოძრაობას განსაზღვრავს მხოლოდ ჰარმონიული ფუნქცია.

ლაპლასის განტოლების შემოტანა ფორმალურად ამარტივებს სითხის ნაკადის გამოკვლევის ამოცანას, რადგანაც მივყავართ φ ერთი ფუნქციის განსაზღვრის ამოცანამდე (u_x, u_y და u_z სამი ფუნქციის ნაცვლად). φ-ის მიხედვით ვპოულობთ u_x, u_y და u_z-ს, როგორც მის კერძო წარმოებულებს. თუმცა ხშირად ლაპლასის განტოლების ამოხსნა უფრო რთული ამოცანაა, ვიდრე u_x, u_y და u_z ფუნქციების უშუალო განსაზღვრა. ზედაპირს, რომლის ყოველი წერტილისათვის სიჩქარის პოტენციალის მნიშვნელობა მუდმივია, **თანაბარი პოტენციალის** ზედაპირი ანუ **ეკვიპოტენციური** ზედაპირი ეწოდება. მისი განტოლება ასეთი სახით ჩაიწერება:

$$\varphi(x, y, z) = C. \qquad (5.26)$$

ამასთან, მუდმივას სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის მიიღება ერთმანეთის პარალელური ეკვიპოტენციური ზედაპირების ოჯახი.

§ 5.9. იდეალური სითხის მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებები (ლ. ეილერის განტოლებები)

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ჰიდროდინამიკის ერთ-ერთ ძირითად ამოცანას შეადგენს მოძრაობის ძირითად მახასიათებლებს შორის თანაფარდობის დადგენა. როგორც წესი, სითხეზე მოქმედი გარე ძალები წინასწარ ცნობილია; საძიებელია ჰიდრომექანიკური წნევა (ჰიდროსტატიკურ და ჰიდროდინამიკურ

წნევებს ზოგადად ჰიდრომექანიკურ წნევას უწოდებენ) p და სითხის ნაწილაკის მოძრაობის სიჩქარე $u(u_x, u_y, u_z)$, რომლებიც, ზოგად შემთხვევაში, კოორდინატებისა და დროის უწყვეტი ფუნქციებია. ამ ამოცანის გადასაწყვეტად საჭიროა ისეთი განტოლებები, რომლებიც კავშირს დაამყარებს სითხის ნაწილაკის მოძრაობის სიჩქარეს, აჩქარებასა და მასზე მოქმედ ძალებს შორის. ასეთ განტოლებებს ჰიდრავლიკაში წარმოადგენს იდეალური სითხის მოძრაობის ძირითადი დიფერენციალური განტოლებები.

განვიხილოთ მოძრავ იდეალურ სითხეში გამოყოფილი ელემენტარული პარალელეპიპედი $\delta x, \delta y, \delta z$ წიბოებით და სიმძიმის ცენტრით K წერტილში (ნახ. 4.4). u_x, u_y და u_z აღვნიშნოთ K წერტილის გადაადგილების სიჩქარის კომპონენტები, ხოლო p-თი – ჰიდროდინამიკური წნევა მასში. როგორც ცნობილია, იდეალური სითხის მოძრაობა არ ხასიათდება მხები ძაბვების გამომწვევი შიგა ხახუნით. ამიტომ, მსგავსი სითხის ნაკადში, როგორც **უძრავ სითხეში**, ჰიდროდინამიკური წნევის ძალებს აქვს მხოლოდ ნორმალური შემდგენი. ეს საშუალებას გვაძლევს მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებათა გამოყვანისას ვისარგებლოთ სითხის წონასწორობის დიფერენციალური განტოლებებით (4.6), რისთვისაც დალამბერის პრინციპის თანახმად, ამ განტოლებებში დამატებით შევიტანოთ სითხის ერთეულ მასაზე მოქმედი ინერციის ძალის გეგმილები:

$$j_x = -\frac{du_x}{dt}; \; j_y = -\frac{du_y}{dt}; \; j_z = -\frac{du_z}{dt}. \tag{5.27}$$

მინუს ნიშანი (3.27) გამოსახულებებში გვიჩვენებს, რომ ინერციის ძალა მიმართულია გადატანითი მოძრაობის აჩქარების საწინააღმდეგოდ. მაშასადამე, გვექნება:

$$\left.\begin{aligned} F_x - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{du_x}{dt} = 0; \\ F_y - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} - \frac{du_y}{dt} = 0; \\ F_z - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{du_z}{dt} = 0, \end{aligned}\right\} \tag{5.28}$$

ანუ

$$\left.\begin{aligned} F_x - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{du_x}{dt} \\ F_y - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{du_y}{dt} \\ F_z - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{du_z}{dt} \end{aligned}\right\} \qquad (5.29)$$

მივიღეთ **იდეალური სითხის მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებები (ეილერის განტოლებები),** რომლებიც ამყარებს კავშირს მოცემული ძალებისა და სიჩქარეების გეგმილებს შორის, ჰიდროდინამიკურ წნევასა და სითხის სიმკვრივეს შორის.

(5.29) განტოლებათა სისტემის ინტეგრირებისათვის აუცილებელია მისი გარდაქმნა იმის გათვალისწინებით, რომ u_x, u_y და u_z სიჩქარის კომპონენტების, x, y, z კოორდინატებისა და t დროის ფუნქციაა, ხოლო du_x, du_y და du_z - მათი სრული დიფერენციალები, ე.ი.

$$\left.\begin{aligned} du_x &= \frac{\partial u_x}{\partial t}dt + \frac{\partial u_x}{\partial x}dx + \frac{\partial u_x}{\partial y}dy + \frac{\partial u_x}{\partial z}dz; \\ du_y &= \frac{\partial u_y}{\partial t}dt + \frac{\partial u_y}{\partial x}dx + \frac{\partial u_y}{\partial y}dy + \frac{\partial u_y}{\partial z}dz; \\ du_z &= \frac{\partial u_z}{\partial t}dt + \frac{\partial u_z}{\partial x}dx + \frac{\partial u_z}{\partial y}dy + \frac{\partial u_z}{\partial z}dz. \end{aligned}\right\} \qquad (5.30)$$

მხედველობაში მივიღებთ, რომ $\frac{dx}{dt} = u_x, \frac{dy}{dt} = u_y, \frac{dz}{dt} = u_z$ და du_x, du_y, du_z, -ის მნიშვნელობები (5.30)-დან შევიტანოთ (5.29) სისტემაში, მაშინ

$$\left.\begin{aligned} F_x - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial u_x}{\partial t} + \frac{\partial u_x}{\partial x}u_x + \frac{\partial u_x}{\partial y}u_y + \frac{\partial u_x}{\partial z}u_z; \\ F_y - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial u_y}{\partial t} + \frac{\partial u_y}{\partial x}u_x + \frac{\partial u_y}{\partial y}u_y + \frac{\partial u_y}{\partial z}u_z \\ F_z - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{\partial u_z}{\partial t} + \frac{\partial u_z}{\partial x}u_x + \frac{\partial u_z}{\partial y}u_y + \frac{\partial u_z}{\partial z}u_z. \end{aligned}\right\} \qquad (5.31)$$

(5.31) **განტოლებებს უწოდებენ ეილერის განტოლებებს გაშლილი ფორმით**. მასში, ზოგად შემთხვევაში, ოთხი უცნობია: u_x, u_y, u_z, ρ. მაშასადამე, სისტემის ამოსახსნელად აუცილებელია კიდევ ერთი განტოლება, კერძოდ, სითხის უწყვეტობის განტოლება:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0. \qquad (5.23)$$

(5.31) სისტემის მარჯვენა ნაწილში სიჩქარის კომპონენტების ცხრა კერძო წარმოებულია კოორდინატებით (და არა დროით). როგორც ადრე აღვნიშნეთ, სამს $\left(\frac{\partial u_x}{\partial x}, \frac{\partial u_y}{\partial y}, \frac{\partial u_z}{\partial z}\right)$ გრძივს ან პირდაპირ კერძო წარმოებულს უწოდებენ, ხოლო დანარჩენ ექვსს – **ირიბს ან განივს.** თითოეული მათგანი წარმოადგენს უსასრულოდ მცირე მონაკვეთის ბრუნვის კუთხურ სიჩქარეს შესაბამისი ღერძის მიმართ. მაგალითად, კერძო წარმოებული $\frac{\partial u_z}{\partial x}$ გამოსახავს უსასრულოდ მცირე მონაკვეთის ბრუნვის კუთხურ სიჩქარეს Oy ღერძის მიმართ.

სითხის ნაწილაკის აჩქარება $\frac{du}{dt}$ ვექტორული სიდიდეა. მისი გეგმილები კოორდინატთა ღერძებზე, შესაბამისად, იქნება $\frac{du_x}{dt}, \frac{du_y}{dt}$ და $\frac{du_z}{dt}$. (5.29) და (5.31) სისტემების შედარებით მივიღებთ:

$$\left.\begin{aligned}
\frac{du_x}{dt} &= \frac{\partial u_x}{\partial t} + \frac{\partial u_x}{\partial x}u_x + \frac{\partial u_x}{\partial y}u_y + \frac{\partial u_x}{\partial z}u_z;\\
\frac{du_y}{dt} &= \frac{\partial u_y}{\partial t} + \frac{\partial u_y}{\partial x}u_x + \frac{\partial u_y}{\partial y}u_y + \frac{\partial u_y}{\partial z}u_z;\\
\frac{du_z}{dt} &= \frac{\partial u_z}{\partial t} + \frac{\partial u_z}{\partial x}u_x + \frac{\partial u_z}{\partial y}u_y + \frac{\partial u_z}{\partial z}u_z.
\end{aligned}\right\} \qquad (5.32)$$

პირველი შესაკრებები გამოსახულებათა მარჯვენა ნაწილში კერძო წარმოებულები დროით $-\frac{\partial u_x}{dt}, \frac{\partial u_y}{\partial t}, \frac{\partial u_z}{\partial t}$ განსაზღვრავს ნამდვილი სიჩქარის ცვლილებას დროის მიხედვით სითხის მოცემულ წერტილში. ამიტომ, მათ **ლოკალური აჩქარების** შემდგენებს

უწოდებენ. ცხადია, დამყარებული მოძრაობის შემთხვევაში ლოკალური აჩქარება ნულის ტოლია, დანარჩენი შესაკრებები $\frac{\partial u_x}{\partial x}u_x, \frac{\partial u_x}{\partial y}u_y, \frac{\partial u_x}{\partial z}u_z, \ldots$, რომლებიც ცნობილია **კონვექციური აჩქარების** შემდგენების სახელწოდებით, განსაზღვრავს სითხის ნაწილაკის აჩქარებას, გამოწვეულს სიჩქარეთა ველში მისი მდებარეობის შეცვლით. კონვექციური აჩქარება ახასიათებს სიჩქარეთა ველის არაერთგვაროვნებას დროის მოცემულ მომენტში.

ლოკალურ და კონვექციურ აჩქარებათა შემდგენების ჯამებს $\left(\frac{du_x}{dt}, \frac{du_y}{dt}, \frac{du_z}{dt},\right)$ **სუბსტანციურ (მატერიალურ)** ან **სრული აჩქარების** შემდგენებს უწოდებენ.

§ 5.10. ეილერ-გრომეკას განტოლებები

ეილერის განტოლებები (5.31) მართებულია სითხის როგორც არაგრიგალური (პოტენციური), ისე გრიგალური მოძრაობისათვის. მაგრამ ეს განტოლებები გარეგნული ფორმით ვერ ასახავს მათი გამოყენების შესაძლებლობას გრიგალური მოძრაობის შემთხვევისათვის. ამიტომ მიზანშეწონილია მათი ისე გარდაქმნა, რომ განტოლებებში გამოჩნდეს სითხის ნაწილაკების ბრუნვითი მოძრაობის კუთხური სიჩქარის კომპონენტები.

ამისათვის ავიღოთ (5.31) სისტემის პირველი განტოლება:

$$F_x - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial u_x}{\partial t} + \frac{\partial u_x}{\partial x}u_x + \frac{\partial u_x}{\partial y}u_y + \frac{\partial u_x}{\partial z}u_z$$

და მასში შევიტანოთ $\frac{\partial u_x}{\partial y}$ და $\frac{\partial u_x}{\partial z}$-ის მნიშვნელობები (5.10) ფორმულებიდან

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{\partial u_y}{\partial x} - 2\omega_z; \frac{\partial u_x}{\partial z} = \frac{\partial u_z}{\partial x} + 2\omega_y.$$

მაშინ

$$F_x - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial u_x}{\partial t} + \left(\frac{\partial u_x}{\partial x}u_x + \frac{\partial u_y}{\partial x}u_y + \frac{\partial u_z}{\partial x}u_z\right) + 2\left(\omega_y u_z - \omega_z u_y\right);$$

გარდავქმნათ ფრჩხილებში მოთავსებული გამოსახულება

$$\frac{\partial u_x}{\partial x}u_x + \frac{\partial u_y}{\partial x}u_y + \frac{\partial u_z}{\partial x}u_z = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{u_x^2}{2} + \frac{u_y^2}{2} + \frac{u_z^2}{2}\right) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{u^2}{2}\right).$$

გვექნება

$$F_x - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial u_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{u^2}{2}\right) + 2\left(\omega_y u_z - \omega_z u_y\right).$$

თუ ჩავატარებთ ანალოგიურ გარდაქმნებს (5.31) სისტემის დანარჩენი ორი განტოლების მიმართაც, საბოლოოდ მივიღებთ

$$\left.\begin{aligned} F_x - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial u_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{u^2}{2}\right) + 2\left(\omega_y u_z - \omega_z u_y\right); \\ F_x - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial u_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{u^2}{2}\right) + 2\left(\omega_z u_x - \omega_x u_z\right); \\ F_x - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{\partial u_z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{u^2}{2}\right) + 2\left(\omega_x u_y - \omega_y u_x\right). \end{aligned}\right\} \qquad (5.33)$$

ეილერის განტოლებები ასეთი ფორმით მოცემულია ი.გრომეკას მიერ (1881).

გავიხსენოთ, რომ მასური (მოცულობითი) ძალის აჩქარების გეგმილები Fx, Fy და Fz შეგვიძლია წარმოვადგინოთ U(x,y,z) ძალური (პოტენციური) ფუნქციის კერძო წარმოებულების სახით (ძალებს, რომლებიც გამოსახულია U(x,y,z) ფუნქციით ეწოდება პოტენციალის მქონე ძალები) შესაბამისი კოორდინატებით

$$F_x = \frac{\partial U}{\partial x}; F_y = \frac{\partial U}{\partial y}; F_z = \frac{\partial U}{\partial z}. \qquad (4.9)$$

ამ მნიშვნელობების შეტანით (5.33) სისტემაში მივიღებთ:

$$\frac{\partial U}{\partial x} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{u^2}{2}\right) = \frac{\partial u_x}{\partial t} + 2\left(\omega_y u_z - \omega_z u_y\right);$$

$$\frac{\partial U}{\partial y} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{u^2}{2}\right) = \frac{\partial u_y}{\partial t} + 2\left(\omega_z u_x - \omega_x u_z\right);$$

$$\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{u^2}{2}\right) = \frac{\partial u_z}{\partial t} + 2\left(\omega_x u_y - \omega_y u_x\right),$$

საიდანაც

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}\left(U - \frac{p}{\rho} - \frac{u^2}{2}\right) &= \frac{\partial u_x}{\partial t} + 2\left(\omega_y u_z - \omega_z u_y\right); \\ \frac{\partial}{\partial y}\left(U - \frac{p}{\rho} - \frac{u^2}{2}\right) &= \frac{\partial u_y}{\partial t} + 2\left(\omega_z u_x - \omega_x u_z\right); \\ \frac{\partial}{\partial z}\left(U - \frac{p}{\rho} - \frac{u^2}{2}\right) &= \frac{\partial u_z}{\partial t} + 2\left(\omega_x u_y - \omega_y u_x\right). \end{aligned}\right\} \qquad (5.34)$$

ასეთია ეილერ-გრომეკას განტოლებები გრიგალის კომპონენტებში, როდესაც სითხეზე მოქმედებს პოტენციალის მქონე მოცულობითი ძალები. ეს განტოლებები მიუთითებს გრიგალური კომპონენტების არსებობაზე ან არარსებობაზე და საშუალებას იძლევა, დავადგინოთ განსხვავება სითხის გრიგალურ და არაგრიგალურ მოძრაობათა თავისებურებებს შორის.

§ 5.11. ბერნულის განტოლება იდეალური სითხის ელემენტარული ჭავლისათვის დამყარებული მოძრაობის შემთხვევაში. მისი გეომეტრიული და ენერგეტიკული ინტერპრეტაცია

ეილერის განტოლებები იდეალური სითხის დამყარებული მოძრაობისათვის (5.29) გავამრავლოთ dx, dy, dz-ზე და მიღებული შედეგები შევკრიბოთ:

$$\left(Fxdx + Fydy + Fzdz\right) - \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p}{\partial x}dx + \frac{\partial p}{\partial y}dy + \frac{\partial p}{\partial z}dz + \right) = \frac{du_x}{dt}dx +$$

$$+ \frac{du_y}{dt}dy + \frac{du_z}{dt}dz.$$

გავიხსენოთ, რომ $\frac{dx}{dt} = u_x; \frac{dy}{dt} = u_y; \frac{dz}{dt} = u_z$, ხოლო ფრჩხილებში მოთავსებული გამოსახულებები შესაბამისად U(x,y,z) პოტენციური ფუნქციისა და წნევის სრული დიფერენციალებია (4.3), მაშინ

$$dU - \frac{1}{\rho}dp = u_x du_x + u_y du_y + u_z du_z$$

ანუ

$$dU - \frac{1}{\rho}dp = d\left(\frac{u_x^2}{2}\right) + d\left(\frac{u_y^2}{2}\right) + d\left(\frac{u_y^2}{2}\right)$$

და

$$dU - \frac{1}{\rho}dp = d\left(\frac{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}{2}\right).$$

მაგრამ, როგორც ცნობილია, $u^2 = u_x^2 + u_y^2 + u_z^2$, ამიტომ წინა გამოსახულებიდან მივიღებთ:

$$dU - \frac{1}{\rho}dp = d\left(\frac{u^2}{2}\right),$$

საიდანაც

$$d\left(U-\frac{p}{\rho}-\frac{u^2}{2}\right)=o.$$

ინტეგრირებით გვექნება

$$U-\frac{p}{\rho}-\frac{u^2}{2}=const$$

ანუ

$$-U+\frac{p}{\rho}+\frac{u^2}{2}=const\ . \qquad (5.35)$$

(5.35) გამოსახულება ცნობილია **ბერნულის ინტეგრალის** ან **ბერნულის განტოლების** სახელწოდებით და, როგორც მოგვიანებით ვნახავთ, გამოსახავს კუთრი მექანიკური ენერგიის (პოტენციურისა და კინეტიკურის ჯამის) მუდმივობის კანონს მოძრავი იდეალური სითხისათვის.

იმისათვის, რომ (5.35) განტოლებას პრაქტიკაში გამოსაყენებელი მარტივი სახე მივცეთ, საჭიროა განისაზღვროს U პოტენციური ფუნქციის მნიშვნელობა.

საინჟინრო პრაქტიკაში მოცულობითი ძალებიდან სითხეზე მოქმედებს მხოლოდ სიმძიმის ძალა. ამიტომ

Fx=0; Fy=0; Fz=-g; (4.15)

მაშინ (4.8) გამოსახულებიდან გვექნება

dU=gdz da U=-gz+C.

ამ უკანასკნელის გათვალისწინებით ბერნულის განტოლება (5.35) ასეთ სახეს მიიღებს:

$$gz+\frac{p}{\rho}+\frac{u^2}{2}=const$$

ანუ

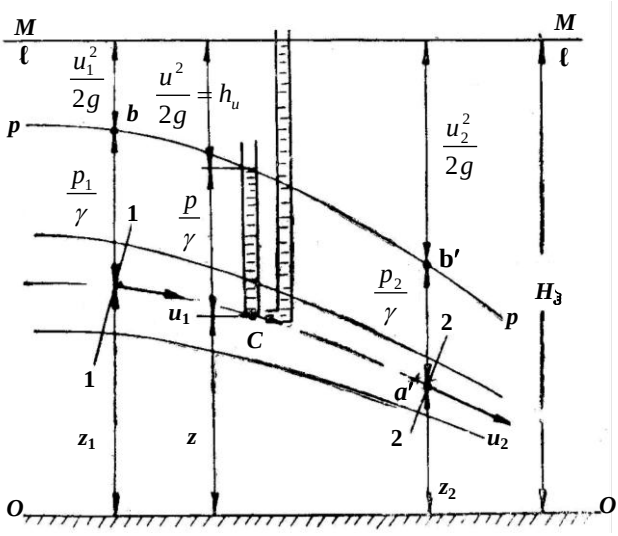
$$z+\frac{p}{\gamma}+\frac{u^2}{2g}=const, \qquad (5.36)$$

სადაც $\gamma = \rho g$ (§ 3.1).

(5.36) განტოლება მართებულია იდეალური სითხის ერთსა და იმავე დენის წირზე მდებარე ნაწილაკებისათვის ადვილად შეიძლება დავამტკიცოთ, რომ აღნიშნული განტოლება მართებულია არაბლანტი სითხის მთელი მასისათვის პოტენციური და ხრახნული მოძრაობის შემთხვევაში. ხრახნული მოძრაობისას დენის წირი და გრიგალური წირი ერთმანეთს თანხვდება. მაშასადამე, სითხის ნაწილაკები მოძრაობს დენის წირების

გასწვრივ და ბრუნავს მათ გარშემო), როდესაც მოცულობითი ძალებიდან სითხეზე მოქმედებს მხოლოდ სიმძიმის ძალა.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ (§5.4), ელემენტარული ჭავლის განივკვეთი ხასიათდება უსასრულოდ მცირე ზომით. ამის გამო, ჭავლის განივკვეთის ყველა წერტილში ადგილობრივი u სიჩქარეები და p ჰიდროდინამიკური წნევები, ისევე, როგორც ამ წერტილთა ნიშნულები, შერჩეული ჰორიზონტალური O-O საფარდი (ათვლის) სიბრტყის მიმართ ერთნაირია (ნახ. 5.13) მაშინ ბერნულის განტოლება (5.36) მართებული იქნება არა მხოლოდ დენის წირისათვის, არამედ მის გარშემო გამოყოფილი ელემენტარული ჭავლისათვის.



ნახ. 5.13

ჭავლის სიგრძეზე ნებისმიერად შერჩეული ორი კვეთისათვის (1-1 და 2-2) ბერნულის განტოლებას ექნება ასეთი სახე:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g}. \qquad (5.37)$$

ბერნულის განტოლების გეომეტრიული არსი. ბერნულის განტოლების ყველა წევრს სიგრძის განზომილება აქვს. Z სიდიდე წარმოადგენს ელემენტარული ჭავლის კვეთის სიმძიმის ცენტრის (c) მდებარეობის გეომეტრიულ სიმაღლეს O-O საფარდი სიბრტყის მიმართ და მას **გეომეტრიულ სიმაღლეს ანუ**

გეომეტრიულ დაწნევას უწოდებენ. მეორე წევრი $\frac{p}{\gamma}$ არის სიმაღლე, რომელიც იზომება პიეზომეტრით (П) და შეესაბამება p ჰიდროდინამიკურ წნევას კვეთის სიმძიმის ცენტრში; მას **პიეზომეტრულ სიმაღლეს ან პიეზომეტრულ დაწნევას** უწოდებენ. მესამე წევრსაც ($\frac{u^2}{2g}$) ასევე სიგრძის განზომილება აქვს და წარმოადგენს ე.წ. **სიჩქარით სიმაღლეს** ან **სიჩქარით დაწნევას**. თეორიული მექანიკიდან ცნობილია, რომ $h_u = \frac{u^2}{2g}$ არის ისეთი სიმაღლე, რა სიმაღლიდანაც უნდა ჩამოვარდეს სხეული, რათა დაცემის მომენტში მისი სიჩქარე u-ს ტოლი იყოს. $\frac{u^2}{2g}$ სიდიდეს ზომავენ ხელსაწყოთი, რომელსაც პიტოს მილაკს უწოდებენ. ეს უკანასკნელი არის 90^0-ით ბოლომოხრილი D მილაკი (ნახ. 5.13), რომლის შესასვლელი კვეთის დიამეტრი ნაკლებია თვით მილაკის დიამეტრზე. სითხის რაიმე C წერტილში ადგილობრივი u სიჩქარის გასაზომად პიტოს მილაკის მოხრილ ბოლოს ათავსებენ დინების შემხვედრად ისე, რომ შესასვლელი კვეთი ორიენტირებული იყოს სიჩქარის u ვექტორის მართებულად. სითხის დონე პიტოს D მილაკში $h_u = \frac{u^2}{2g}$ სიდიდით მაღლა დგება, ვიდრე П პიეზომეტრში. $h_u = \frac{u^2}{2g}$ გამოსახულებიდან გამოითვლება u სიჩქარე (რეალური სითხეებისათვის u-ს გამოსათვლელ ფორმულას აქვს სახე: $u = \varphi\sqrt{2gh_u}$, სადაც φ არის ტარირების კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს მილაკის კონსტრუქციულ თავისებურებებს, სითხის სიბლანტეს და ნაკადის სტრუქტურულ ცვლილებას მასში მილაკის მოთავსების შედეგად):

$$u = \sqrt{2gh_u}.$$

ბერნულის განტოლების გეომეტრიული არსის გამოსარკვევად 1-1 და 2-2 კვეთების სიმძიმის a და b ცენტრებიდან ვერტიკალურად ზემოთ გადავზომოთ $\frac{p_1}{\gamma}$ და $\frac{p_2}{\gamma}$ პიეზომეტრულ სიმაღლეთა შესაბამისი ab და a´b´ მონაკვეთები, ხოლო b და b´

წერტილებიდან $\frac{u_1^2}{2g}$ და $\frac{u_2^2}{2g}$ სიჩქარით დაწნევათა შესაბამისი მონაკვეთები (ნახ. 3.20).

(5.37) განტოლების მიხედვით სამი სიმაღლის ჯამი $\left(z+\frac{p}{\gamma}+\frac{u^2}{2g}\right)$ ელემენტარული ჭავლის მთელ სიგრძეზე მუდმივია. ამიტომ, ამ ჯამის შესაბამისი მონაკვეთის ზედა (წვერო) ნებისმიერი კვეთისათვის მოთავსდება 0-0 საფარდი სიბრტყიდან ერთი და იგივე $H_{ჰდ}$ სიმაღლეზე M-M ჰორიზონტალურ სიბრტყეში $H_{ჰდ}$. დაწნევას სრულ ანუ **ჰიდროდინამიკურ დაწნევას** უწოდებენ, ხოლო M-M სიბრტყეს – სრული ანუ **ჰიდროდინამიკური დაწნევის სიბრტყეს**. პიეზომეტრებში სითხის დონეების შემაერთებელ p-p წირს პიეზომეტრული წირი ეწოდება, ხოლო M-M წირს-**სრული დაწნევის წირი**. პიეზომეტრული წირი გამოსახავს გეომეტრიულ და პიეზომეტრულ დაწნევათა ჯამის ცვლილებას ელემენტარული ჭავლის გასწვრივ.

მაშასადამე, ბერნულის განტოლება იდეალური სითხის ელემენტარული ჭავლისათვის წარმოადგენს სრული დაწნევის მუდმივობის განტოლებასაც:

$$H_{ჰდ} = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{u^2}{2g} = const. \qquad (5.38)$$

ბერნულის განტოლების ენერგეტიკული არსი. ბერნულის განტოლება გამოსახავს ენერგიის შენახვის კანონს იდეალური სითხის ელემენტარული ჭავლისათვის. ადვილია იმის დამტკიცება, რომ (5.37) განტოლების თითოეული წევრი წარმოადგენს სითხის კუთრი მექანიკური ენერგიის სხვადასხვა ფორმას.

წარმოვიდგინოთ, რომ C წერტილში (ნახ. 5.13) ელემენტარული ჭავლის ფარგლებში თავმოყრილია სითხის უსასრულოდ მცირე ნაწილაკი dm მასით. მისი პოტენციური ენერგია ($dЭ_з$) 0-0 საფარდი სიბრტყის მიმართ განისაზღვრება არა მარტო მდებარეობის z სიმაღლით, არამედ $\frac{p}{\gamma}$ პიეზომეტრული სიმაღლითაც (§4.6). ასე, რომ C წერტილში dm მასის პოტენციური ენერგია იქნება:

$$d∃_p = gdm\left(z+\frac{p}{\gamma}\right) = gdmz + gdm\frac{p}{\gamma}.$$

რაც შეეხება ერთეული წონის მქონე სითხის პოტენციურ ანუ კუთრ პოტენციურ ენერგიას, ის გამოითვლება ფორმულით:

$$d\mathrm{E}_{\mathrm{p}} = \frac{d\exists_{\mathrm{p}}}{gdm} = z + \frac{p}{\gamma}. \qquad (5.39)$$

ამასთან, მიღებულ ტოლობაში **Z გამოსახავს მდებარეობის კუთრ პოტენციურ ენერგიას, ხოლო $\frac{p}{\gamma}$-წნევის კუთრ პოტენციურ ენერგიას.**

u სიჩქარით მოძრავ სითხის უსასრულოდ მცირე ნაწილაკს გააჩნია $d\exists_{კ} = \frac{dmu^2}{2}$ კინეტიკური ენერგია. მისი **კუთრი კინეტიკური ენერგია,** ე.ი. ერთეული წონის მქონე სითხის კინეტიკური ენერგია ტოლი იქნება:

$$d\mathrm{E}_{\mathrm{k}} = \frac{d\exists_{\mathrm{k}}}{gdm} = \frac{dm\frac{u^2}{2}}{gdm} = \frac{u^2}{2g}. \qquad (5.40)$$

სრული კუთრი მექანიკური ენერგია შედგება ჯამისაგან:

$$d\mathrm{E} = d\mathrm{E}_{პ} + d\mathrm{E}_{კ} = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{u^2}{2g}. \qquad (5.41)$$

ამგვარად, მივიღეთ (5.37) განტოლებაში შემავალი გამოსახულება, რომელიც ჭავლის ყველა კვეთისათვის მუდმივი სიდიდეა, რადგანაც 1-1 და 2-2 კვეთები ნებისმიერადაა აღებული ჭავლის სიგრძეზე. აქედან დავასკვნით, რომ იდეალური სითხის ელემენტარული ჭავლის სრული კუთრი მექანიკური ენერგია ჭავლის მთელ სიგრძეზე ნებისმიერად შერჩეული ჰორიზონტალური სიბრტყის (საფარდი სიბრტყის) მიმართ მუდმივი სიდიდეა.

ბერნულის განტოლების ენერგეტიკული არსის განხილვისას ხშირად სრული დაწნევის M-M სიბრტყეს (წირს) აღნიშნავენ e-e-ით (ნახ. 5.13) და მას **კუთრი ენერგიის სიბრტყეს ან წირს** უწოდებენ.

ბერნულის განტოლება ჰიდრავლიკის ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი განტოლებაა. ის ამყარებს დამოკიდებულებას წერტილის მდებარეობას (z), წნევასა (p) და სიჩქარეს (u) შორის. ჭავლის სიგრძეზე ნებისმიერად აღებული ორი კვეთისათვის, სხვადასხვა კვეთში z ნიშნულის მუდმივობისას, ბერნულის განტოლებიდან გამომდინარეობს მოძრავი სითხის ფრიად მნიშვნელოვანი თვისება: **სიჩქარის გაზრდით წნევა მცირდება, ხოლო სიჩქარის შემცირებით წნევა იზრდება.**

§ 5.12. რეალური (ბლანტი) სითხის მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებები (ნავიე-სტოქსის განტოლებები)

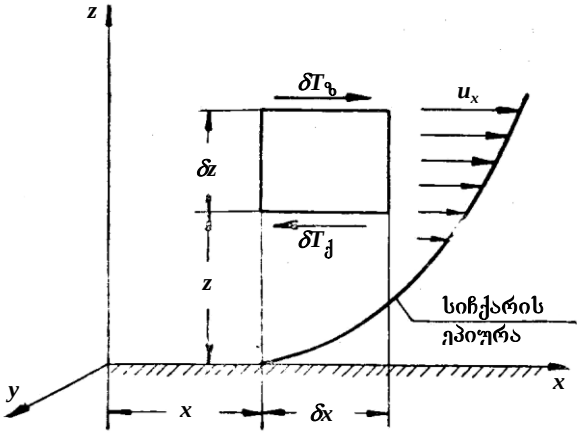
რეალური (ბლანტი) სითხის მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებათა მისაღებად იდეალური სითხის მოძრაობისათვის შედგენილ დიფერენციალურ განტოლებებში (ეილერის განტოლებებში) საჭიროა გავითვალისწინოთ სიბლანტით განპირობებული შიგა ხახუნის ძალები. შევნიშნავთ, რომ ეილერის განტოლებებში შემავალ ერთეულ მასაზე მოქმედი მოცულობითი ძალები (მოცულობითი ძალების აჩქარებები) უცვლელი დარჩება, ხოლო ზედაპირული ძალებიდან, წნევის ძალების გარდა, რომლებიც ნორმალური ძაბვის სახით შედის განტოლებებში, თავს იჩენს სითხის სიბლანტით გამოწვეული ძალებიც, შესაბამისი მხები ძაბვების სახით.

ბლანტი სითხის მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებების გამოყვანა რთული და შრომატევადი პროცესია; იგი სრულად არის მოცემული ჰიდრომექანიკის კურსში. ამიტომ აქ განვიხილავთ ამოცანის გადაწყვეტის მარტივ გზას, თუმცა ეს საბოლოო შედეგზე გავლენას არ ახდენს. ამ მიზნით მოძრავ სითხეში გამოვყოთ ელემენტარული პარალელეპიპედი $\delta x, \delta y, \delta z$ წიბოებით და სიმარტივისათვის გამოვიკვლიოთ ამ მოცულობის ერთგანზომილებიანი მოძრაობა Ox ღერძის გასწვრივ (ნახ. 5.14), ამასთან ვიგულისხმოთ, რომ u_x სიჩქარე იცვლება მხოლოდ Oz ღერძის მიმართულებით.

დავუშვათ, რომ $x0y$ სიბრტყე არის მყარი უძრავი ზედაპირი, რომელიც ამუხრუჭებს სითხის მოძრაობას და u_x სიჩქარის მნიშვნელობა იცვლება ნულიდან (ამ ზედაპირზე) რაღაც მნიშვნელობამდე, სიჩქარეთა განაწილების ეპიურის შესაბამისად (ნახ. 5.14). სიჩქარეთა სხვაობის არსებობის გამო, პარალელეპიპედის ჰორიზონტარულ წახნაგებზე წარმოიქმნება ხახუნის ელემენტარული ძალები. თუ ქვედა წახნაგზე მოქმედი მხები ძაბვის მნიშვნელობას აღვნიშნავთ τ-თი, მაშინ ზედა წახნაგზე იმოქმედებს $\tau + \frac{d\tau}{dz}\delta z$ მხები ძაბვა, სადაც $\frac{d\tau}{dz}$ სიდიდე არის τ-ს ცვლილება ერთეულ მანძილზე $0z$ ღერძის მიმართულებით. ხოლო $\frac{d\tau}{dz}\delta z - \tau$-ს ცვლილება δz მანძილზე იმავე მიმართულებით. მაშასადამე, ელემენტარული პარალელეპიპედის ქვედა და

ზედა წახნაგებზე მოქმედი ხახუნის ძალები, შესაბამისად, ასე გამოისახება:

$$\delta T_q = \tau \delta x \delta y; \delta T_z = \left(\tau + \frac{d\tau}{dz} \delta z \right) \delta x \delta y.$$



ნახ. 5.14

მათგან პირველი ($\delta T_ქ$ ძალა) მიმართულია სითხის მოძრაობის საწინააღმდეგოდ, ხოლო მეორე ($\delta T_ზ$) – მოძრაობის მიმართულებით.

ამგვარად, აღნიშნული ძალების $0x$ ღერძზე გეგმილების ჯამი იქნება:

$$\delta T_x = \left(\tau + \frac{d\tau}{dz} \delta z \right) \delta x \delta y - \tau \delta x \delta y = \frac{d\tau}{dz} \delta x \delta y \delta z.$$

მაგრამ შიგა ხახუნის ძაბვა, რომელიც სითხის სიბლანტით არის განპირობებული, აბსოლუტური მნიშვნელობით ტოლია (3.1):

$$\tau = \mu \frac{du_x}{dz},$$

სადაც სიბლანტის დინამიკური კოეფიციენტი (μ) გარკვეულ პირობებში მყოფი მოცემული სითხისათვის შეიძლება მუდმივ სიდიდედ მივიჩნიოთ.

ამიტომ

$$\delta T_x = \frac{d\tau}{dz} \delta x \delta y \delta z = \frac{d}{dz} \left(\mu \frac{du_x}{dz} \right) \delta x \delta y \delta z = \mu \frac{d^2 u_x}{dz^2} \delta x \delta y \delta z.$$

იმის გამო, რომ ეილერის განტოლებებში შემავალი ყველა ძალა ერთეულ მასაზე მოქმედია, საჭიროა მიღებული გამოსახულება გავყოთ პარალელეპიპედის მასაზე, $\delta m = \rho \delta x \delta y \delta z$ და გავითვალისწინოთ, რომ $\frac{\mu}{\rho} = \nu$, სადაც ν არის სიბლანტის კინემატიკური კოეფიციენტი. მაშინ

$$\frac{\delta T_x}{\delta m} = \frac{\mu}{\rho}\frac{d^2 u_x}{dz^2} = \nu \frac{d^2 u_x}{dz^2}. \qquad (5.42)$$

თუ ერთგანზომილებიანი მოძრაობიდან გადავალთ სივრცულ მოძრაობაზე, როდესაც სიჩქარის u_x, u_y, u_z კომპონენტები x, y და z კოორდინატების ფუნქციებია, ერთეულ მასაზე მოქმედი ბლანტი წინაღობის ძალის გეგმილს $0x$ ღერძზე ასეთი სახე ექნება:

$$\nu\left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2}\right).$$

ამგვარად, თუ იდეალური სითხის მოძრაობისათვის შედგენილ დიფერენციალურ განტოლებაში (5.29) გავითვალისწინებთ ბლანტი წინაღობის შემდგენებს დანარჩენი ორი ღერძისთვის, მივიღებთ **რეალური (ბლანტი) სითხის მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებებს:**

$$\left.\begin{aligned}
Fx - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \nu\left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2}\right) &= \frac{du_x}{dt};\\
Fy - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \nu\left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2}\right) &= \frac{du_y}{dt};\\
Fz - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + \nu\left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2}\right) &= \frac{du_z}{dt}.
\end{aligned}\right\} \qquad (5.43)$$

მიღებულ გამოსახულებებს ნავიე-სტოქსის (ეს განტოლებები პირველად 1822 წელს მიღებულ იქნა ფრანგი მეცნიერის ნავიეს მიერ, ხოლო 1845 წელს ინგლისელმა სტოქსმა მოგვცა მათი გამოყვანის უფრო სრულყოფილი მეთოდი) განტოლებებს უწოდებენ. ისინი ი შვიათად გამოიყენება პრაქტიკაში, რადგან რეალურ ნაკადებში ხახუნის ძალების განაწილების გათვალისწინება დიდ სირთულეებთან არის დაკავშირებული.

§ 5.13. ბერნულის განტოლება რეალური სითხის ელემენტარული ჭავლისათვის დამყარებული მოძრაობის შემთხვევაში

იდეალური სითხის ელემენტარული ჭავლისათვის ბერნულის განტოლების განხილვისას აღვნიშნეთ, რომ სრული კუთრი მექანიკური ენერგია (ან სრული დაწნევა) ჭავლის ნებისმიერი კვეთისათვის მუდმივი სიდიდეა. ამასთან, ერთი კვეთიდან მეორეზე გადასვლისას ხდება მხოლოდ კუთრი პოტენციური ენერგიის, $Z = \frac{p}{\gamma}$, ამა თუ იმ ნაწილის გადასვლა კინეტიკურში $(\frac{u^2}{2g})$ და პირიქით.

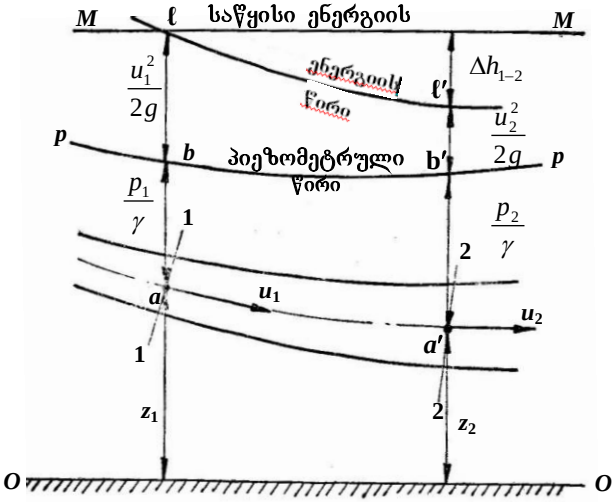
ბლანტი სითხის მოძრაობისას სითხის კუთრი მექანიკური ენერგიის (სრული დაწნევის) საერთო მარაგი არ შეიძლება მუდმივი დარჩეს. იგი აუცილებლად უნდა შემცირდეს მოძრაობის მიმართულებით, რადგან მექანიკური ენერგიის (დაწნევის) ნაწილი სითხის სიბლანტით (შიგა ხახუნით) განპირობებულ წინაღობათა გადალახვაზე იხარჯება.

გავითვალისწინოთ, რომ ბერნულის განტოლების ყველა წევრს აქვს სიგრძის განზომილება და წინაღობათა გადალახვაზე დახარჯული კუთრი მექანიკური ენერგიის (სრული დაწნევის) ნაწილი Δh_{1-2} სიმბოლოთი აღვნიშნოთ. მაშინ ბერნულის განტოლებას რეალური სითხის ელემენტარული ჭავლის ორი კვეთისათვის ასეთი სახე ექნება:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g} + \Delta h_{1-2}\,. \qquad (5.44)$$

როგორც ვხედავთ, Δh_{1-2} წევრი წარმოადგენს სითხის კუთრი მექანიკური ენერგიის (დაწნევის) დანაკარგს განსახილველ 1-1 და 2-2 კვეთებს შორის (ნახ. 5.15) სხვანაირად, ენერგეტიკული თვალსაზრისით, Δh_{1-2} გამოსახავს ერთეული წონის მქონე ბლანტ სითხეზე მოქმედი ყველა სახის წინაღობის ძალის მუშაობას ერთი კვეთიდან მეორეზე სითხის გადაადგილებისას.

აღნიშნულის გამო, რეალური და იდეალური სითხის ჭავლისათვის აგებული ენერგიის წირები (სრული დაწნევის წირები) ერთმანეთისაგან განსხვავებული იქნება, რადგან რეალური სითხის შემთხვევაში კუთრი მექანიკური ენერგია (სრული დაწნევა) ჭავლის გასწვრივ კლებულობს, ამიტომ მისი მნიშვნე-



ნახ. 5.15

ლობათა ცვლილება ჭავლის სიგრძეზე გამოისახება არა ჰორიზონტალური წრფით, როგორც ეს იდეალური სითხის ელემენტარული ჭავლისათვის გვქონდა, არამედ რაიმე e-e′ წირით (ნახ. 5.15). კერძო შემთხვევაში, როდესაც ჭავლის კვეთი სიგრძეზე არ იცვლება, კუთრი ენერგიის (სრული დაწნევის) დანაკარგი საწყისი კვეთიდან (1-1 კვეთიდან) ათვლილი მანძილის (სრული დაწნევის) პროპორციული იქნება და კუთრი ენერგიის ცვლილება დახრილი წრფივით გამოისახება.

§ 5.14. ჰიდროდინამიკური წნევის განაწილება სითხის დამყარებული მდოვრედ ცვალებადი მოძრაობის შემთხვევაში

სითხის ნაკადში დენის წირები შეიძლება იყოს წრფივიც და მრუდწირულიც, ერთმანეთის პარალელურიც და არაპარალელურიც. ეს გარემოება გავლენას ახდენს ნაკადის ცოცხალ კვეთში ჰიდროდინამიკური წნევის განაწილების ხასიათზე და რამდენადმე ზღუდავს ნაკადისათვის ბერნულის განტოლების გამოყენების შესაძლებლობას.

ამასთან დაკავშირებით, ჰიდრავლიკაში შემოაქვთ ე.წ. **მდოვრედ ცვალებადი** მოძრაობის ცნება. ასეთი მოძრაობისას დენის

წირების სიმრუდეს და მათი გაშლის კუთხეს უგულებელვყოფთ, რის გამოც შეგვიძლია ცოცხალი კვეთები ბრტყელ კვეთებად მივიჩნიოთ. ე.ი. ვთვლით, რომ მდოვრედ ცვალებადი მოძრაობის შემთხვევაში დენის წირები ერთმანეთის პარალელური ან თითქმის პარალელურია, ხოლო მათი სიმრუდე უმნიშვნელოა. შევნიშნავთ, რომ მოძრაობას, რომლის დროსაც დენის წირები ერთმანეთის მიმართ მკაცრად პარალელურია, **პარალელურ-ჭავლურს ან სწვრივჭავლურს** უწოდებენ.

განვიხილოთ მდოვრედ ცვალებადი ნაკადი და დავუშვათ, რომ დენის წირები მიმართულია 0x კოორდინატთა ღერძის პარალელურად. მაშინ ნაკადის განივკვეთი, რომელიც განსახილველ შემთხვევაში თანხვდება ცოცხალ კვეთს, შეუთავსდება y0z სიბრტყეს. რადგანაც 0y და 0z ღერძების მიმართ მოძრაობა არ ხდება, ამიტომ სიჩქარეთა და აჩქარებების ველი ნაკადის ცოცხალ კვეთში გამოისახება შემდეგი ტოლობებით:

$$u_x \approx u; u_y = 0; u_z = 0; \frac{du_y}{dt} = 0; \frac{du_z}{dt} = 0.$$

აღნიშნულის გათვალისწინებით, ეილერის განტოლებები (5.29) ასეთ სახეს მიიღებს:

$$\left.\begin{aligned} Fx - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{du_x}{dt}; \\ Fy - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} &= 0; \\ Fz - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} &= 0. \end{aligned}\right\}. \qquad (5.45)$$

როგორც ვხედავთ, სისტემის ბოლო ორი განტოლება წონასწორობის დიფერენციალური განტოლებაა y და z ღერძების მიმართ, რაც საშუალებას გვაძლევს გავაკეთოთ შემდეგი მნიშვნელოვანი დასკვნა: მდოვრედ ცვალებადი დამყარებული მოძრაობისას ნაკადის ცოცხალ კვეთში ჰიდროდინამიკური წნევის განაწილება ექვემდებარება ჰიდროსტატიკის ძირითად კანონს. მაშასადამე, y0z სიბრტყის პარალელური ყოველი ცოცხალი კვეთისათვის

$$z + \frac{p}{\gamma} = const\ . \qquad (5.46)$$

სხვადასხვა ცოცხალი კვეთისათვის მუდმივას მნიშვნელობა (5.46) გამოსახულებაში სხვადასხვა იქნება.

§ 5.15. კინეტიკური ენერგიისა და მოძრაობის რაოდენობის კოეფიციენტები რეალური სითხის ნაკადისათვის

კინეტიკური ენერგიის კოეფიციენტი (კორიოლისის კოეფიციენტი), მდოვრედ ცვალებადი დამყარებული მოძრაობის შემთხვევაში, ნაკადის **ცოცხალ კვეთში** გამავალი სითხის კუთრი მექანიკური ენერგია ტოლია:

$$E = E_{ჯ} + E_{ჯ(u)}. \tag{5.47}$$

სადაც $E_{ჯ}$ არის კუთრი პოტენციური ენერგია;

$E_{ჯ(u)}$ - კუთრი კინეტიკური ენერგია.

კუთრი პოტენციური ენერგია ($E_{ჯ}$) მდოვრედ ცვალებადი ნაკადისათვის ისევე განისაზღვრება, როგორც ელემენტარული ჭავლისათვის, $E_{ჯ} = z + \frac{p}{\gamma}$, მხოლოდ იმ განსხვავებით, რომ ნაკადის შემთხვევაში z არის ცოცხალი კვეთის ნებისმიერი წერტილის ნიშნული, ხოლო p – ჰიდროდინამიკური წნევა იმავე წერტილში (ელემენტარული ჭავლისათვის, მისი კვეთის უსასრულოდ მცირე ზომების გამო, ასეთი შენიშვნის გაკეთების საჭიროება არ არსებობს). რაც შეეხება განსახილველი ცოცხალი კვეთის კინეტიკურ ენრგიას ($E_{ჯ(u)}$), მისი გამოთვლა რამდენადმე რთულდება. საქმე იმაშია, რომ ელემენტარული ჭავლის კვეთის ფარგლებში ყველა ნაწილაკს ერთი და იგივე u სიჩქარე აქვს, და, ამდენად, კუთრი კინეტიკური ენერგიაც ადვილად გამოითვლება, $dE_{ჯ(u)} = \frac{u^2}{2g}$ ნაკადი კი, როგორც ვიცით, უამრავი ელემენტარული ჭავლის ერთობლიობაა და ამიტომ მისი ცოცხალი კვეთის ფართობი (ω) ყველა ელემენტალური ჭავლის განივკვეთის ფართობთა ($d\omega$) ჯამის ტოლდიდია. მაგრამ ნაკადის ცოცხალი კვეთის ფარგლებში სხვადასხვა ჭავლს სხვადასხვა ადგილობრივი u სიჩქარე აქვს. მაშასადამე, ნაკადის ცოცხალ კვეთში გამავალი სითხის კუთრი კინეტიკური ენერგიის საპოვნელად საჭიროა, გამოვთვალოთ ცალკეული ელემენტარული ჭავლის კუთრი კინეტიკური ენერგია და მიღებული შედეგები შევკრიბოთ.

ელემენტარული ჭავლის განივკვეთის ფართობი აღვნიშნოთ $d\omega$-ით, ხოლო სიჩქარე აღებულ კვეთში – u-ით. მაშინ დროის ერთეულში ჭავლის კვეთში გაივლის $dm = \rho dQ = \rho u d\omega$ მასის მქონე

სითხე და მისი კინეტიკური ენერგია $d\exists_{ჯ(u)} = \frac{dmu^2}{2} = \rho u d\omega \frac{u^2}{2}$ სიდიდის ტოლი იქნება.

ნაკადის ცოცხალი კვეთისათვის კინეტიკური ენერგიის მნიშვნელობა გამოითვლება ფორმულით:

$$\exists_{ჯ(u)} = \int_{\omega} d\exists_{ჯ(u)} = \int_{\omega} \rho u d\omega \frac{u^2}{2} = \frac{\rho}{2} \int_{\omega} u^3 d\omega . \qquad (5.48)$$

თუ ამ უკანასკნელს გავყოფთ ცოცხალ კვეთში დროის ერთეულში გამავალი სითხის $G = mg = (\rho Q)g = \rho g Q$ წონაზე, მივიღებთ კუთრი კინეტიკური ენერგიის საძიებელ მნიშვნელობას:

$$E_{ჯ(u)} = \frac{\exists_{ჯ(u)}}{G} = \frac{\rho / 2 \int_{\omega} u^3 d\omega}{\rho g Q} = \frac{1}{2gQ} \int_{\omega} u^3 d\omega . \qquad (5.49)$$

(5.49) გამოსახულების პრაქტიკულად გამოყენებისათვის უნდა ვიცოდეთ ცოცხალ კვეთში $u = f(x, y, z)$ ადგილობრივ სიჩქარეთა განაწილების სრული სურათი, რაც, ხშირ შემთხვევაში, არ ხერხდება. ამიტომ, დაისვა საკითხი კუთრი კინეტიკური ენერგიის გამოთვლის შესახებ არა ადგილობრივი სიჩქარეების, არამედ ნაკადის $v = \frac{Q}{\omega}$ საშუალო სიჩქარის საშუალებით.

ამასთან დაკავშირებით, ნაკადის ცოცხალ კვეთში სითხის ყველა ნაწილაკს გააჩნია ერთი და იგივე v საშუალო სიჩქარე. მაშინ ცოცხალ კვეთში დროის ერთეულში გამავალი $m = \rho Q$ მასის კინეტიკური ენერგია $\exists_{ჯ(v)} = \frac{mv^2}{2} = \frac{\rho Q v^2}{2}$ ტოლი იქნება. თუ მას გავყოფთ სითხის $G = \rho g Q$ წონით ხარჯზე, მივიღებთ საშუალო სიჩქარით განსაზღვრულ კუთრ კინეტიკურ ენერგიას:

$$\mathrm{E}_{ჯ(v)} = \frac{\exists_{ჯ(v)}}{G} = \frac{\rho Q \frac{v^2}{2}}{\rho g Q} = \frac{v^2}{2g} . \qquad (5.50)$$

გამოვთვალოთ ფარდობა

$$\alpha = \frac{\mathrm{E}_{ჯ(u)}}{\mathrm{E}_{ჯ(v)}} = \frac{\frac{1}{2gQ} \int_{\omega} u^3 d\omega}{v^2 / 2g} = \frac{\int_{\omega} u^3 d\omega}{v^3 \omega} . \qquad (5.51)$$

უგანზომილებო α კოეფიციენტს **კინეტიკური ენერგიის** ან კორიოლისის კოეფიციენტს უწოდებენ. იგი გამოისახება

ცოცხალ კვეთში დროის ერთეულში გამავალი სითხის მასის ნამდვილი კინეტიკური ენერგიის ფარდობით ისეთ კინეტიკურ ენერგიასთან, რომელიც პირობითად გამოთვლილია იმ დაშვებით, რომ სიჩქარე ცოცხალი კვეთის ყველა წერტილში საშუალო სიჩქარის ტოლია.

(5.50) და (5.51) გამოსახულებებიდან ჩანს, რომ კუთრი კინეტიკური ენერგია შეიძლება გამოვთვალოთ საშუალო სიჩქარით, თუ გვეცოდინება α კოეფიციენტი

$$E_{კ(v)} = \alpha E_{კ(v)} = \frac{\alpha v^2}{2g}. \qquad (5.52)$$

α კოეფიციენტის მნიშვნელობის დასადგენად (5.51) გამოსახულებას მივცეთ სხვა სახე. ამისათვის დავუშვათ, რომ ადგილობრივი u სიჩქარე v საშუალო სიჩქარისაგან განსხვავდება $\pm\Delta u$ სიდიდით, ე.ი $u = v \pm \Delta u$, მაშინ (5.51) გამოსახულებიდან გვექნება:

$$\alpha = \frac{\int_\omega u^2 d\omega}{v^3\omega} = \frac{1}{\omega}\int_\omega \left(\frac{u}{v}\right)^3 d\omega = \frac{1}{\omega}\int_\omega \left(\frac{u \pm \Delta u}{v}\right)^3 d\omega = \frac{1}{\omega}\int_\omega \left(1 \pm \frac{\Delta u}{v}\right)^3 d\omega$$
$$= \frac{1}{\omega}\int_\omega \left[1 + 3\left(\frac{\Delta u}{v}\right)^2 \pm 3\frac{\Delta u}{v} \pm \left(\frac{\Delta u}{v}\right)^3\right] d\omega. \qquad (5.53)$$

მიღებულ გამოსახულებაში $\int_\omega \left(\frac{\Delta u}{v}\right)^3 d\omega = \frac{1}{v^3}\int_\omega \Delta u^3 d\omega$ სიდიდე მის სიმცირის გამო შეიძლება უგულებელვყოთ. რაც შეეხება $\int_\omega \Delta u d\omega$ სიდიდეს, ის ყოველთვის ნულის ტოლია. მართლაც,

$$\int_\omega \Delta u d\omega = \int_\omega (u - v) d\omega = \int_\omega u d\omega - v\omega = Q - Q = 0.$$

აღნიშნულის გათვალისწინებით, (5.53) გამოსახულება ასეთ სახეს მიიღებს:

$$\alpha = \frac{1}{\omega}\int_\omega \left[1 + 3\left(\frac{\Delta u}{v}\right)^2\right] d\omega = 1 + 3\frac{\int_\omega \Delta u^2 d\omega}{v^2\omega}. \qquad (5.54)$$

როგორც ω (5.54) დამოკიდებულებიდან ჩანს, კორიოლისის კოეფიციენტი ყოველთვის 1-ზე მეტი სიდიდეა. $\alpha = 1$-ს მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როცა $\Delta u = 0$-ს, ე.ი. როცა ნაკადის განივკვეთში ადგილი აქვს სიჩქარეთა თანაბარ განაწილებას. ჩვეულებრივ,

ნაკადებში გვაქვს სიჩქარეთა არათანაბარი განაწილება, ამიტომ α ყოველთვის ერთზე მეტი მიიღება. ჰიდროტექნიკურ პრაქტიკაში დამყარებული მდოვრედ ცვალებადი დინებისათვის α -ს $1{,}05 \div 1{,}1$ -ის ტოლს იღებენ, თუმცა ის ზოგიერთ შემთხვევაში შეიძლება მნიშვნელოვნად მეტიც იყოს (§ 4.4′).

ამგვარად, კორიოლისის კოეფიციენტი ახასიათებს ნაკადის ცოცხალ კვეთში სიჩქარეთა განაწილების უთანაბრობას, რის გამოც მას **სიჩქარეთა განაწილების უთანაბრობის კოეფიციენტსაც** უწოდებენ.

მოძრაობის რაოდენობის კოეფიციენტი (ბუსინესკის კოეფიციენტი). ჰიდრავლიკის ზოგიერთი საკითხის შესწავლისას ხშირად აუცილებელია ვიცოდეთ მოცემულ ცოცხალ კვეთში, დროის ერთეულში გამავალი სითხის მოძრაობის რაოდენობა, რომელიც ცოცხალი კვეთის უსასრულოდ მცირე $d\omega$ ფართობებში გადინებული სითხის ელემენტარული მასების მოძრაობის რაოდენობათა ინტეგრალური ჯამის ტოლია,

$$(მ.რ)_u = \int_{\omega} udm = \int_{\omega} u \cdot \rho u d\omega = \rho \int_{\omega} u^2 d\omega . \qquad (5.55)$$

თუ ისევ, როგორც კორიოლისის კოეფიციენტის განსაზღვრისას, დავუშვებთ, რომ ნაკადის ცოცხალ კვეთში სითხის ყველა ნაწილაკს გააჩნია ერთი და იგივე v საშუალო სიჩქარე, მაშინ მოძრაობის რაოდენობის გამოსათვლელ დამოკიდებულებას ექნება შემდეგი სახე:

$$(მ.რ)_v = mv = \rho Q v = \rho \omega v \cdot v = \rho \omega v^2 . \qquad (5.56)$$

გამოვთვალოთ ფარდობა

$$\alpha' = \frac{(მ.რ)_u}{(მ.რ)_v} = \frac{\rho \int_{\omega} u^2 d\omega}{\rho \omega v^2} = \frac{\int_{\omega} u^2 d\omega}{v^2 \omega} . \qquad (5.57)$$

უგანზომილებო α' კოეფიციენტს მოძრაობის რაოდენობის ან ბუსინესკის კოეფიციენტს უწოდებენ. იგი ცოცხალ კვეთში დროის ერთეულში გამავალი სითხის მასის მოძრაობის ნამდვილი რაოდენობის ფარდობაა სითხის იმავე მასის მოძრაობის რაოდენობასთან, რომელიც პირობითად გამოთვლილია დაშვებით, რომ სიჩქარე ცოცხალი კვეთის ყველა წერტილში საშუალო სიჩქარის ტოლია.

(5.57) გამოსახულებიდან ჩანს, რომ ნამდვილი მოძრაობის რაოდენობა შეიძლება განვსაზღვროთ საშუალო სიჩქარით, თუ გვეცოდინება შემასწორებელი α' კოეფიციენტის მნიშვნელობა

$$(მ.რ)_u = \alpha'(მ.რ)_v = \alpha'\rho\omega v^2 . \qquad (5.58)$$

α' კოეფიციენტის მნიშვნელობის დასადგენად გავითვალისწინოთ, რომ $u = v \pm \Delta u$ და (3.76) გამოსახულებას მივცეთ ასეთი სახე:

$$\alpha' = \frac{\int_{\omega} u^2 d\omega}{v^2\omega} = \frac{1}{\omega}\int_{\omega}\left(\frac{u}{v}\right)^2 d\omega = \frac{1}{\omega}\int_{\omega}\left(\frac{v \pm \Delta u}{v}\right)^2 d\omega =$$

$$= \frac{1}{\omega}\int_{\omega}\left[1 \pm 2\frac{\Delta u}{v} + \left(\frac{\Delta u}{v}\right)^2\right] d\omega .$$

როგორც ზემოთ, დავამტკიცოთ, რომ $\int_{\omega} \Delta u d\omega = 0$, ამიტომ

$$\alpha' = 1 + \frac{\int_{\omega} \Delta u^2 d\omega}{v^2\omega} . \qquad (5.59)$$

(5.54) და (5.59) გამოსახულების შედარებიდან ჩანს, რომ α' კოეფიციენტი ასევე მეტია 1-ზე, მაგრამ ნაკლებია α კოეფიციენტზე. ჰიდროტექნიკურ პრაქტიკაში α'-ს 1,05-ის ტოლს იღებენ.

§ 5.16. ბერნულის განტოლება რეალური სითხის დამყარებული მდოვრედ ცვალებადი ნაკადისათვის. ჰიდრავლიკური და პიეზომეტრული ქანობი

განვიხილოთ რეალური სითხის დამყარებული მდოვრედ ცვალებადი ნაკადის ორი 1-1 და 2-2 კვეთი (ნახ. 5.16), კუთრი პოტენციური ენერგია განსახილველი ცოცხალი კვეთის ნებისმიერ წერტილში, როგორც წინა პარაგრაფში, იქნება ერთი და იგივე: $E_ჯ = z + \frac{p}{\gamma}$. რაც შეეხება კუთრ პოტენციურ ენერგიას, ის (5.52) გამოსახულების თანახმად, ტოლია: $E_{ჯ(u)} = \frac{\alpha v^2}{2g}$.

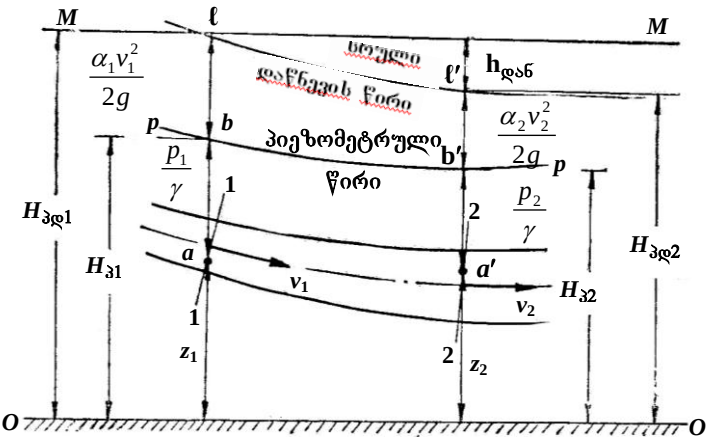
ამგვარად, ნაკადის კუთრი მექანიკური ენერგიის მნიშვნელობები 1-1 და 2-2 კვეთებში 0-0 საფარდი სიბრტყის მიმართ შესაბამისად იქნება:

$$E_{1-1} = E_{პ.1\text{-}1} E_{ჯ(u),1-1} = z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = H_{ჰდ.1-1} ;$$

$$E_{2-2} = E_{ჰ1\text{-}1} E_{ჰ(u),2-2} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} = H_{ჰდ,2-2}$$

მაგრამ, როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ბლანტი სითხის მოძრაობისას კუთრი მექანიკური ენერგიის ნაწილი იხარჯება განსახილველ კვეთებს შორის წინაღობის ძალების გადალახვაზე. ამიტომ, კუთრი ენერგია 2-2 კვეთში ნაკლები იქნება, ვიდრე 1-1 კვეთში ($E_{1-1} \succ E_{2-2}$) ამის გამო, ბერნულის განტოლება რეალური სითხის ნაკადის ორი კვეთისათვის ასე ჩაიწერება:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2.g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} = h_{დან} . \qquad (5.60)$$



ნახ. 5.16

სადაც $h_{დან}$ არის **კუთრი მექანიკური ენერგიის (დაწნევის) დანაკარგი** ორ განსახილველ კვეთს შორის. მას ხშირად, ტერმინოლოგიის გამარტივების მიზნით, **ენერგიის (დაწნევის) დანაკარგსაც** უწოდებენ.

გავარკვიოთ რეალური სითხის ნაკადისათვის ბერნულის განტოლების გეომეტრიული არსი.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ (§5.12), ბერნულის განტოლების ყველა წევრს სიგრძის განზომილება აქვს. ამ თვალსაზრისით, z_1 და z_2 არის ნაკადის ორ ცოცხალ კვეთში ნებისმიერი a და b წერტილების შესაბამისი მდებარეობის სიმაღლეები 0-0 საფარდი სიბრტყის მიმართ. მათ **გეომეტრიულ სიმაღლეებს** ან **გეომეტ-**

რიულ დაწნევებს უწოდებენ. ხაზს ვუსვამთ, რომ არ არის აუცილებელი, z_1 და z_2 კვეთის სიმძიმის ცენტრების ნიშნულები იყოს. ამის გამო $\frac{p_1}{\gamma}$ და $\frac{p_2}{\gamma}$ პიეზომეტრული სიმაღლეები ანუ პიეზომეტრული დაწნევები z_1 და z_2 ნიშნულებიდან აითვლება (ნახ. 5.16). პიეზომეტრული სიმაღლეების შესაბამისი მონაკვეთების ბოლოების შემაერთებელ p-p წირს პიეზომეტრულ წირს, ხოლო მის ქანობს პიეზომეტრულ ქანობს უწოდებენ:

$$i_{პ} = -\frac{dH_{პ}}{dl} = -\frac{d\left(z + \frac{p}{\gamma}\right)}{dl}, \qquad (5.61)$$

სადაც dl არის გზის უსასრულოდ მცირე მონაკვეთი მოძრაობის გასწვრივ.

(5.61) გამოსახულებაში "მინუს" ნიშანი დაწერილია იმ მიზნით, რომ p-p წირის უკუქანობიან უბანზე, რომლისათვის $\left(z + \frac{p}{\gamma}\right)$ ორწევრის მნიშვნელობა მოძრაობის მიმართულებით იზრდება, ე.ი. $d\left(z + \frac{p}{\gamma}\right) \succ 0$, $i_{პ}$ პიეზომეტრული ქანობი მივიღოთ უარყოფითი, ხოლო პირდაპირქანობიან უბანზე – დადებითი.

$\frac{\alpha_1 v_1^2}{2.g}$ და $\frac{\alpha_2 v_2^2}{2.g}$ სიდიდეები აღნიშნავს სიჩქარით სიმაღლეებს ანუ სიჩქარით დაწნევებს შესაბამისად 1-1 და 2-2 კვეთებში. პიეზომეტრული და სიჩქარით დაწნევების ჯამს სრულ ან ჰიდროდინამიკურ დაწნევას უწოდებენ:

$$H_{ჰდ} = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g}. \qquad (5.62)$$

ნაკადის მოძრაობის გასწვრივ ჰიდროდინამიკურ დაწნევათა ნიშნულების შემაერთებელ ee´ წირს **დაწნევის წირს**, ხოლო მის ქანობს **ჰიდრავლიკურ ქანობს** უწოდებენ. $h_{დან}$ სიდიდე ბერნულის განტოლებაში დაწნევის დანაკარგია, რომლის მნიშვნელობა ერთეულ სიგრძეზე ასევე იძლევა ჰიდრავლიკურ ქანობს. ამგვარად,

$$J = \frac{dH_{ჰდ}}{dl} = \frac{d\left(z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g}\right)}{dl}; \qquad (5.63)$$

$$J = \frac{dh_{დან}}{dl}. \qquad (5.64)$$

შევნიშნავთ, რომ **ჰიდრავლიკური ქანობი ყოველთვის დადებითია**. ამიტომ (3.82) გამოსახულებაში დაწერილია ნიშანი მინუსი, რადგანაც სრული დაწნევა ($H_{ჰდ}$) ნაკადის მოძრაობის მიმართულებით მცირდება და $dH_{ჰდ} \prec 0$. (5.64) გამოსახულება აღებულია პლუს ნიშნით იმ მოსაზრებით, რომ ნაკადის გასწვრივ სრული დაწნევის დანაკარგი ($h_{დან}$) იზრდება და $dh_{დან} \succ 0$.

ზოგად შემთხვევაში დაწნევა შეიძლება დაიკარგოს (5.62) გამოსახულებაში შემავალი ცალკეული ან ყველა წევრის ხარჯზე. მუდმივი კვეთის სადაწნეო მილსადენებში სიჩქარეც მუდმივია, რის გამოც დაწნევის დაკარგვა ხდება პიეზომეტრული დაწნევის $\left(H_პ = z + \frac{p}{\gamma}\right)$ შემცირების ხარჯზე, ხოლო მუდმივი კვეთის ღია კალაპოტებში – z ნიშნულის შემცირების შედეგად.

ბერნულის განტოლების **ენერგეტიკული არსი** განსაზღვრულ იქნა 5.12 პარაგრაფში.

ბერნულის განტოლების დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობის გამო ქვემოთ მოკლედ ჩამოთვლილია ის პირობები, რომელთა არსებობაც აუცილებელია მისი გამოყენებისათვის:

1. სითხე უნდა იყოს ერთგვაროვანი, უკუმშველი, ხოლო სითხის მოძრაობა – დამყარებული;
2. მოძრაობა კვეთებში, რომლისთვისაც შედგენილია ბერნულის განტოლება, უნდა იყოს მდოვრედ ცვალებადი (არა აქვს მნიშვნელობა, როგორი იქნება კვეთებს შორის მოძრაობა);
3. z და $\frac{p}{\gamma}$ სიდიდეები შეიძლება აღებულ იქნეს ცოცხალი კვეთის ნებისმიერ წერტილში, მაგრამ აუცილებლად ერთი და იმავე წერტილისათვის;
4. თუ ნაკადის ცოცხალ კვეთში ნაწილაკების ადგილობრივი სიჩქარის სიდიდეები დიდად არ განსხვავდება ერთმანეთისაგან, მაშინ კორიოლისის კოეფიციენტი შეიძლება დაახლოებით ერთის ტოლად მივიჩნიოთ.

თავი VI. ჰიდრავლიკური წინაღობები

§ 6.1. ზოგადი ცნობები ჰიდრავლიკური წინაღობებისა და დაწნევის დანაკარგების შესახებ

კუთრი მექანიკური ენერგიის (დაწნევის) დანაკარგი ანუ, როგორც მას ხშირად უწოდებენ, ჰიდრავლიკური დანაკარგი დამოკიდებულია კალაპოტის ფორმაზე, გეომეტრიულ ზომებზე, დინების სიჩქარეზე, სითხის სიბლანტესა და სხვა მრავალ ფაქტორზე. დაწნევის კარგვის მიზეზია სხვადასხვა სახის ჰიდრავლიკური წინაღობა, რომელთა მექანიზმი იმდენად რთულია, რომ ბევრ შემთხვევაში შეუძლებელი ხდება დაწნევის დანაკარგის გამოსათვლელი თეორიული დამოკიდებულების მიღება. ამიტომ, დაწნევის დანაკარგის სიდიდის განსაზღვრისას ხშირად სარგებლობენ ემპირიული და ნახევრად ემპირიული ფორმულებით. გამოთქმა – ჰიდრავლიკური წინაღობა გულისხმობს სიბლანტით განპირობებულ ხახუნის ძალებს, რომლებიც თავს იჩენს მხოლოდ რეალური სითხის მოძრაობის დროს. რაც მეტია ხახუნის ძალები, მით მეტია დაწნევის დანაკარგები ($h_{\text{დან}}$). ბუნებრივია ვგულისხმობთ, რომ ხახუნის ძალებსა და დაწნევის დანაკარგებს შორის არსებობს გარკვეული დამოკიდებულება.

ჰიდრავლიკური წინაღობა ხასიათდება სიბლანტის ან ინერციული ძალებით. მათგან პირველი დამოკიდებულია მოძრავი სითხის ნაწილაკებს შორის არსებულ შიგა ხახუნზე, ხოლო მეორე – სითხის თვისებაზე წინააღმდეგობა გაუწიოს თავისი მოძრაობის ცვლილებას. ჩვეულებრივ მოქმედებს ორივე მიზეზი, მხოლოდ ყოველ კონკრეტულ შემთხვევაში შეიძლება სჭარბობდეს ერთ-ერთი.

განასხვავებენ ჰიდრავლიკური წინაღობის ორ სახეს: **სიგრძეზე წინაღობას და ადგილობრივ წინაღობას**. სიგრძეზე წინაღობა მუდავნდება თანაბრად ან დაახლოებით თანაბრად ნაკადის მთელ სიგრძეზე, ადგილობრივი წინაღობა კი – მოკლე უბანზე, ნაკადის კონფიგურაციის მკვეთრი ცვლილების ადგილებში. შესაბამისად, დაწნევის დანაკარგსაც ყოფენ **დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგად** და **დაწნევის ადგილობრივ დანაკარგად**. ზოგად შემთხვევაში, ნაკადში ადგილი აქვს დაწნევის ორივე სახის დანაკარგს და მთლიანი დანაკარგის გამოსათვლელად ისინი უნდა შევკრიბოთ:

$$h_{\text{დან}} = \sum h_{\text{სიგ}} + \sum h_{\text{ადგ}} , \qquad (6.1)$$

სადაც $\sum h_{\text{სიგ}}$ არის დაწნევის სიგრძეზე სრული დანაკარგი ნაკადის განსახილველი უბნისათვის; $\sum h_{\text{ადგ}}$ – ყველა ადგილობრივი დანაკარგის ჯამი.

დასასრულ, თუ საკითხს ენერგეტიკული თვალსაზრისით მივუდგებით, შეიძლება ითქვას, რომ კუთრი მექანიკური ენერგიის ნაწილი ($h_{\text{დან}}$), წინაღობის ძალების მოქმედების შედეგად, გადადის თბურ ენერგიაში, სითხე თბება, ხოლო სითბო გარემოში გაიფანტება, ე.ი. ნაკადის კუთრი ენერგიის ეს ნაწილი უკანდაუბრუნებლად იკარგება.

§ 6.2. თანაბარი მოძრაობის ძირითადი განტოლება. დაწნევის დანაკარგის ზოგადი დამოკიდებულება თანაბარი მოძრაობისას

განვიხილოთ სითხის ნაკადის დამყარებული თანაბარი მოძრაობა – დაწნევითი (მოძრაობა მილსადენებში) ან უდაწნეო (ღია კალაპოტებში). ასეთ შემთხვევაში ყველა განივკვეთში საშუალო სიჩქარე ერთნაირია, ადგილობრივი წინაღობები არ არსებობს და, მაშასადამე, არ არსებობს არც დაწნევის ადგილობრივი კარგვები; გვაქვს მხოლოდ სიგრძეზე წინაღობით გამოწვეული დაწნევის დანაკარგი.

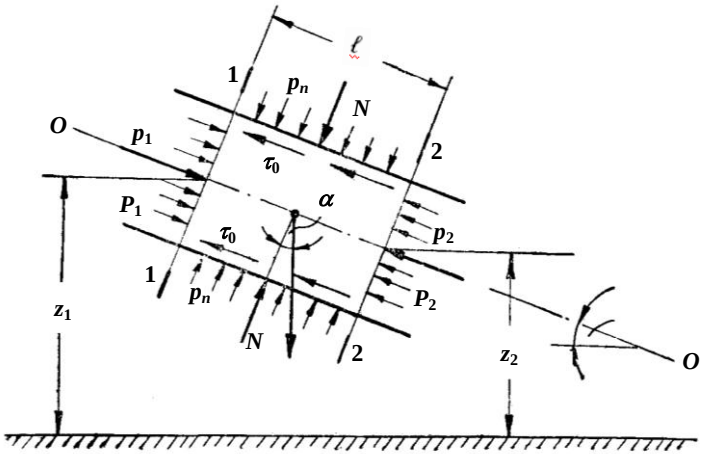
ნაკადში, რომლის ღერძიც ჰორიზონტისადმი α კუთხით არის დახრილი (ნახ. 6.1), 1-1 და 2-2 კვეთებით გამოვყოთ ℓ სიგრძის ნაკვეთური და განვიხილოთ მასზე გარე ძალების მოქმედება. თანაბარი მოძრაობისას გამოყოფილი ნაკვეთურის აჩქარება ნულის ტოლია და მოძრაობის გამომწვევი ძალები გაწონასწორებულია მოძრაობისადმი წინაღობის ძალებით, რადგან წარმოუდგენელია სითხის თანაბარი მოძრაობა მასზე მოქმედი ყველა გარე ძალის ურთიერთშეწონასწორების გარეშე. ამ პირობით ვისარგებლოთ თანაბარი მოძრაობის ძირითადი განტოლების გამოსაყვანად, სახელდობრ, გამოვიყენოთ დებულება: მოძრაობის გამომწვევი ყველა ძალის გეგმილების ჯამი ნებისმიერ ღერძზე ტოლი უნდა იყოს მოძრაობისადმი წინაღობის ძალების გეგმილების ჯამისა იმავე ღერძზე.

სითხის გამოყოფილ ნაკვეთურზე მოქმედი **გარე ძალებია**:

1. ნაკვეთურის **სიმძიმის ძალა** $G = \gamma\omega\ell$, სადაც ω არის კვეთის ფართობი;

2. 1-1 და 2-2 კვეთებში მოქმედი P_1 და P_2 **ჰიდროდინამიკური ძალები**. იმის გამო, რომ თანაბარი მოძრაობისას ჰიდროდინამიკური წნევა ნაკადის ბრტყელ ცოცხალ კვეთში განაწილებულია ჰიდროსტატიკის კანონით, ამიტომ P_1 და P_2 ძალები ტოლია ცოცხალი კვეთების სიმძიმის ცენტრებში მოქმედი p_1 და p_2 ჰიდროდინამიკური წნევების ნამრავლისა, შესაბამის, ω_1 და ω_2 ფართობებზე. მაგრამ გამოყოფილი ნაკვეთურისათვის $\omega_1 = \omega_2 = \omega$; მაშასადამე

$$P_1 = p_1\omega\,;\;\; P_2 = p_2\omega\,.$$



ნახ. 6.1

შევნიშნავთ, რომ P_1 და P_2 ძალები მოქმედებს ნაკადის 1-1 და 2-2 ცოცხალი კვეთების შიგა ნორმალის გასწვრივ და ამიტომ ისინი ურთიერთსაწინააღმდეგოდაა მიმართული;

3. ნაკვეთურის გვერდით ზედაპირზე მის მართობულად მოქმედი p_n **ჰიდროდინამიკური წნევის N ძალები**;

4. **მოძრაობისადმი წინაღობის (სიგრძეზე წინაღობის)** T ძალა. ეს უკანასკნელი განპირობებულია ნაკადისა და კალაპოტის შიგა ზედაპირს (საკონტაქტო ზედაპირს) შორის ხახუნით და აგრეთვე სითხის სხვადასხვა სიჩქარით მოძრავ მეზობელ ნაწილაკებს შორის შეჯიდულობით (ხახუნით). ზოგად შემთხვევაში, ამ მეორე ფაქტორის გათვალისწინება ფრიად რთულია, რის გამოც ვუშვებთ, რომ სითხის ყველა ნაწილაკი ერთი და იმავე

საშუალო სიჩქარით მოძრაობს და ამიტომ მოძრაობისადმი წინაღობის ძალას პირობითად მივიჩნევთ ნაკადისა და კალაპოტის შეხების ზედაპირის გასწვრივ, მოძრაობის საწინააღმდეგოდ მიმართულ ძალას. საკონტაქტო ზედაპირის ფართობის ერთეულზე მოქმედი ხახუნის ძალა (**მხები ძაბვა**) აღვნიშნოთ τ_0, მაშინ მოძრაობისადმი წინაღობის ძალა

$$T = \tau_0 \chi \ell ,$$

სადაც χ არის ნაკვეთურის ცოცხალი კვეთის სველი პერიმეტრი.

თანაბარი მოძრაობისას ნაკადის მახასიათებლები, მათ შორის τ_0 მხები ძაბვა არ იცვლება, თუმცა სველი პერიმეტრის სხვადასხვა წერტილში შეიძლება იყოს სხვადასხვა, ამიტომ განიხილება მისი საშუალო მნიშვნელობა, რომელშიც გათვალისწინებული უნდა იქნეს სითხის ნაწილაკებს შორის ხახუნიც.

შევადგინოთ ნაკადის *O-O* ღერძის მიმართ ყველა ზემოთ ჩამოთვლილი ძალის გეგმილების განტოლება. ამასთან მხედველობაში მივიღოთ, რომ ნაკვეთურის გვერდით ზედაპირზე მოქმედი ჰიდროდინამიკური წნევის *N* ძალების გეგმილები ნულის ტოლია. მაშინ

$$P_1 - P_2 + G\sin\alpha = T .$$

შევიტანოთ მასში თითოეული ძალის შესაბამისი მნიშვნელობა

$$p_1\omega - p_2\omega + \gamma\omega\ell\sin\alpha = \tau_0\chi l .$$

(6.1) ნახაზიდან ჩანს, რომ $\sin\alpha = \dfrac{z_1 - z_2}{\ell}$. ამიტომ, წინა გამოსახულება ასეთ სახეს მიიღებს:

$$p_1\omega - p_2\omega + \gamma\omega\ell\,\frac{z_1 - z_2}{\ell} = \tau_0\chi l .$$

გავიხსენოთ, რომ $\omega/\chi = R$ (სადაც R არის ჰიდრავლიკური რადიუსი) და მიღებული განტოლების თითოეული წევრი გავყოთ $\gamma\omega$-ზე, გვექნება:

$$\left(z_1 + \frac{P_1}{\gamma}\right) - \left(z_2 + \frac{P_2}{\gamma}\right) = \frac{\tau_0}{\gamma}\,\frac{\ell}{R}, \qquad (6.2)$$

მაგრამ სხვაობა (4.2) განტოლების მარცხენა მხარეს თანაბარი მოძრაობისას ($v = const$ და მაშასადამე, $v_1 = v_2$) გამოსახავს ნაკადის კუთრი ენერგიის (სრული დაწნევის) დანაკარგს სიგრძეზე ორ განსახილველ კვეთს შორის. ამიტომ

$$p_{\text{სიგ}} = \frac{\tau_0}{\gamma}\frac{\ell}{R}. \qquad (6.3)$$

(6.3) განტოლებას **სითხის დამყარებული თანაბარი მოძრაობის ძირითადი განტოლება** ეწოდება. იგი გამოსახავს დაწნევის დანაკარგს ნაკადის ℓ სიგრძეზე და ერთდროულად მართებულია როგორც დაწნევითი, ისე უდაწნეო მოძრაობისათვის.

(6.3) განტოლებიდან განვსაზღვროთ τ_0 და გავითვალისწინოთ, რომ თანაბარი მოძრაობისას ჰიდრავლიკური ქანობი[1] $I = h_{\text{სიგ}}/\ell$, მაშინ

$$\tau_0 = \gamma IR = \rho gIR \qquad (6.4)$$

ან

$$\tau_0/\rho = gRI. \qquad (6.5)$$

მივაქციოთ ყურადღება, რომ τ_0/ρ გამოსახულებას სიჩქარის კვადრატის განზომილება აქვს:

$$\left[\frac{\tau_0}{\rho}\right] = \frac{ML}{T^2L^2} : \frac{M}{L^3} = \frac{L^2}{T^2} = \left(\frac{L}{T}\right)^2.$$

ამიტომ შემოაქვთ აღნიშვნა

$$u_* = \sqrt{\tau_0/\rho} = \sqrt{gRI} \qquad (6.6)$$

და მას **დინამიკურ სიჩქარეს** ან **ხახუნის სიჩქარეს** უწოდებენ.

დინამიკური სიჩქარე შეესაბამება ხახუნის τ_0 მხებ ძაბვას ნაკადისა და კალაპოტის შეხების ზედაპირზე. ჰიდროდინამიკის ეს მნიშვნელოვანი ცნება ფართოდ გამოიყენება სხვადასხვა კინემატიკური მახასიათებლის ნორმირებისათვის – მათ მოსაცემად უგანზომილებო ფორმით.

ახლა დავუბრუნდეთ (6.4) განტოლებას და განვიხილოთ სითხის თანაბარი მოძრაობა r_0 რადიუსის წრიული კვეთის მილსადენში, რომლისთვისაც $R = \frac{r_0}{2}$. გამოვყოთ მილსადენის შიგნით $r < r_0$ რადიუსის მქონე ცილინდრი (ნახ. 6.2) და, ზემოაღნიშნულის ანალოგიურად, შევადგენოთ მისთვის წონასწორობის პირობა. ამ შემთხვევაში განტოლებაში τ_0 მხები ძაბვის ნაცვლად შევა სითხის მიმხებ ზედაპირებს შორის არსებული τ ძაბვა, რომელიც ტოლი იქნება:

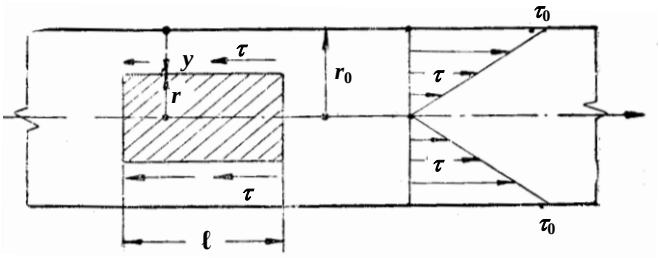
[1] თანაბარი მოძრაობისას ჰიდრავლიკური ქანობი პიეზომეტრული ქანობის ტოლია.

$$\tau = \gamma \frac{r}{2} I \,, \tag{6.7}$$

სადაც $\frac{r}{2}$ არის გამოყოფილი ცილინდრის ჰიდრავლიკური რადიუსი.

(6.4) განტოლებაში *R*-ის ნაცვლად ჩავსვათ მისი მნიშვნელობა $(R = r_2/2)$ და მიღებული გამოსახულება

$$\tau_0 = \gamma \frac{r_0}{2} I \tag{6.8}$$



ნახ. 6.2

გავყოთ წევრ-წევრად (6.7) ტოლობაზე, გვექნება:

$$\frac{\tau_0}{\tau} = \frac{r_0}{r} \quad \text{ანუ} \quad \tau = \tau_0 \frac{r}{r_0} \,. \tag{6.9}$$

r შევცვალოთ $r = r_0 - y$ სიდიდით, სადაც *y* არის მანძილი მილსადენის კედლიდან გამოყოფილი ცილინდრის ზედაპირამდე. მაშინ

$$\tau = \tau_0 = \frac{r_0 - y}{r_0} = \tau_0 \left(1 - \frac{y}{r_0}\right). \tag{6.10}$$

აქედან დავასკვნით, რომ **მხები ძაბვა მილსადენის განივკვეთში იცვლება წრფივი კანონით.** მილსადენის ღერძზე $(y = r_0)$ ის ნულის ტოლია, ხოლო მილსადენის კედელზე $(y = 0)$ აღწევს τ_0 მაქსიმალურ მნიშვნელობას (ნახ. 6.2).

ფრანგმა მეცნიერმა **შეზიმ** მრავალრიცხოვანი ექსპერიმენტის საფუძველზე დაადგინა, რომ τ_0/γ სიჩქარის კვადრატის პროპორციულია. პროპორციულობის კოეფიციენტი აღვნიშნოთ $\left(\frac{1}{c}\right)^2$ -

ით, მაშინ $\frac{\tau_0}{\gamma}=\left(\frac{1}{c}\right)^2 v^2$. თუ შევიტანთ ამ მნიშვნელობას (6.3) გამოსახულებაში, მივიღებთ:

$$h_{\text{ხიგ}}=\frac{v^2\ell}{c^2R}. \qquad (6.11)$$

გავითვალისწინოთ, რომ ჰიდრავლიკური ქანობი $I=h_{\text{ხიგ}}/\ell$ და (6.10) გამოსახულებიდან განვსაზღვროთ სითხის თანაბარი მოძრაობის v საშუალო სიჩქარე

$$v=c\sqrt{RI}. \qquad (6.12)$$

მივიღეთ **სითხის თანაბარი მოძრაობის ძირითადი განტოლება სხვა ფორმით.** მას, ჩვეულებრივ, **შეზის ფორმულას**, ხოლო c კოეფიციენტს – **შეზის კოეფიციენტს უწოდებენ**. მისი განზომილებაა $\frac{\text{მ}^{0.5}}{\text{წმ}}$. c კოეფიციენტის მნიშვნელობა დამოკიდებულია მრავალ ფაქტორზე: ჰიდრავლიკურ რადიუსზე, კალაპოტის ხორკლიანობაზე (სიმქისეზე), ფორმასა და პარამეტრებზე.

თუ ცნობილია საშუალო სიჩქარის ფორმულა, ადვილად განისაზღვრება ხარჯის სიდიდეც თანაბარი მოძრაობისას

$$Q=\omega v=\omega c\sqrt{RI}. \qquad (6.13)$$

პრაქტიკული გამოყენებისათვის სასურველია ემპირიული კოეფიციენტები უგანზომილებო იყოს. ამიტომ, შეზის კოეფიციენტს ხშირად ასეთი ფორმით გამოსახავენ:

$$c=\sqrt{8g/\lambda}, \qquad (6.14)$$

სადაც λ არის უგანზომილებო სიდიდე, რომელსაც **ჰიდრავლიკური ხახუნის** ან **სიგრძეზე ჰიდრავლიკური წინაღობის** კოეფიციენტი ეწოდება. ხშირად მას **დარსის კოეფიციენტსაც** უწოდებენ. c კოეფიციენტის გამოსახვა დარსის კოეფიციენტით საშუალებას იძლევა (6.11) ფორმულას მივცეთ პრაქტიკული გამოყენებისათვის ფრიად მოსახერხებელი სახე:

$$h_{\text{ხიგ}}=\lambda\frac{\ell}{4R}\frac{v^2}{2g}, \qquad (6.15)$$

ან თუ გავითვალისწინებთ, რომ წრიული კვეთის მილებისათვის $4R=d$, მივიღებთ ე.წ. დარსი-ვეისბახის ფორმულას მილსადენებში სითხის თანაბარი მოძრაობისას დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგის გამოსათვლელად:

$$h_{\text{სიგ}} = \lambda \frac{\ell}{d} \frac{v^2}{2g} . \qquad (6.16)$$

შევნიშნავთ, რომ (6.11) და (6.12) ფორმულები ფართოდ გამოიყენება უპირატესად ღია კალაპოტების, ხოლო (6.15) და (6.16) ფორმულები – სადაწნეო მილსადენების გასაანგარიშებლად.

შეზის ფორმულა ჩავწეროთ ასეთი სახით:

$$v = c\sqrt{RI} = \sqrt{8g/\lambda}\sqrt{RI} = \sqrt{8/\lambda}\sqrt{gRI} .$$

მაშინ (6.16) გამოსახულების გათვალისწინებით გვექნება:

$$v = \sqrt{8/\lambda}u , \qquad (6.17)$$

საიდანაც

$$\lambda = 8\left(\frac{u_*}{v}\right)^2 \quad \text{ანუ} \quad \frac{v}{u_*} = \frac{\sqrt{8}}{\sqrt{\lambda}} . \qquad (6.18)$$

ეს უკანაკნელი გამოსახულებები იძლევა დამოკიდებულებას საშუალო სიჩქარეს (v), დინამიკურ სიჩქარესა (u_*) და დარსის კოეფიციენტს შორის.

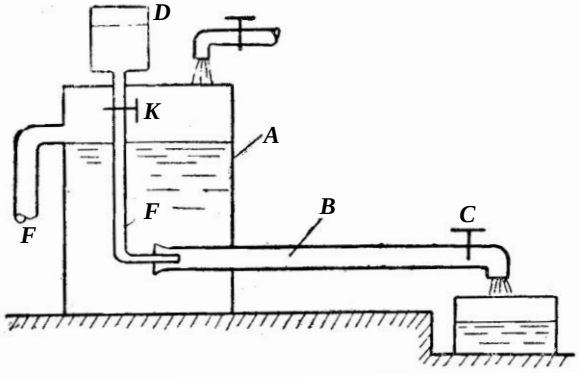
როგორც ვნახეთ, (6.11) და (6.16) ფორმულებით დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგის გამოსათვლელად საჭიროა ვიცოდეთ λ და c კოეფიციენტების მნიშვნელობები. ამასთან დაკავშირებულ საკითხებს მოგვიანებით განვიხილავთ.

6.3. რეალური სითხის მოძრაობის რეჟიმები. რეინოლდსის რიცხვითი და მისი კრიტიკული მნიშვნელობა

მრავალრიცხოვანმა ექსპერიმენტმა ცხადყო, რომ არსებობს სითხის მოძრაობის ორი რეჟიმი: **ლამინარული** და **ტურბულენტური**. 1883 წ. ინგლისელმა მეცნიერმა ო. რეინოლდსმა გამოაქვეყნა თავისი კვლევის შედეგები, რომლებშიც განზომილების ანალიზისა და ცდის მონაცემების განზოგადების საფუძველზე დაასაბუთა ბუნებაში სითხის მოძრაობის აღნიშნული რეჟიმების არსებობა.

ექსპერიმენტული კვლევა ო. რეინოლდსმა ჩაატარა სპეციალურ დანადგარზე, რომლის სქემა მოცემულია 6.3 ნახაზზე. დანადგარი შედგება გამოსაცდელი (მუშა) სითხით შევსებული A ავზისაგან, რომელთანაც მიერთებულია ჰორიზონტალური d დიამეტრის B მინის მილი. ეს უკანასკნელი, ხარჯის (სიჩქარის) რეგულირების მიზნით, აღჭურვილია C ონკანით. ავზის ზემოთ მოთავ-

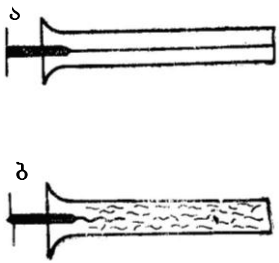
სებულია *D* ჭურჭელი შეფერილი სითხით (საღებავით), რომლის კუთრი წონა დაახლოებით მუშა სითხის კუთრი წონის ტოლია. შეფერილი სითხე მცირე დიამეტრის *E* მილაკით მიეწოდება *B* მინის მილში. *A* ავზში სითხის მუდმივი დონე შენარჩუნებულია *F* სარინის შემწეობით.



ნახ. 6.3

თუ *C* ონკანს მცირედ გავაღებთ (*B* მილში სითხე მცირე სიჩქარით დაიწყებს მოძრაობას), ხოლო შემდეგ *K* ონკანით შევუშვებთ საღებავს მუშა სითხის ნაკადში, შევნიშნავთ, რომ საღებავი მოძრაობას დაიწყებს მილსადენის კედლების პარალელური, მკაფიოდ გამოკვეთილი წვრილი ჭავლის სახით (ნახ. 6.4, ა): საღებავის ნაწილაკები არ შეერევა მუშა სითხის დანარჩენ მასას და გვექნება სითხის მოძრაობა ცალკეული წვრილი ჭავლების სახით, რაც მიუთითებს სითხის დინების შრეებრივ ხასიათზე. *B* მილთან მიერთებული პიეზომეტრი ან პიტოს მილაკი გვიჩვენებს, რომ არ ხდება წნევისა და სიჩქარის ცვლილება (პულსაცია) დროის მიხედვით.

თუ *B* მილში მუშა სითხის სიჩქარეს თანდათანობით გავზრდით *C* ონკანის შემდგომი გაღებით, ზემოთ აღწერილი სურათი დასაწყისში არ შეიცვლება. მაგრამ შემდეგ, სითხის დინების სიჩქარის გარკვეული მნიშვნელობისას, საღებავის ჭავლი იწყებს პულსირებას, ღებულობს ტალღისებრ ფორმას, ხდება მისი რღვევა – საღებავის ნაწილაკები მთლიანად შეერევა მუშა სითხეს (ნახ. 6.4, ბ). საერთო გადატანით მოძრაობასთან ერთად სითხის ნაწილაკები გადაადგილდება მილის განივი მიმართულებითაც; სითხის მოძრაობის შრეებრივი სტრუქტურა ირღვევა, იწყება გრიგალთწარმოქმნა. მოძრაობა ღებულობს მოუწესრიგებელ,



ნახ. 6.4

ქაოსურ ხასიათს. პიეზომეტრი და პიტოს მილაკი გვიჩვენებს მუშა სითხის ნაკადში წნევისა და სიჩქარის უწყვეტ პულსაციას.

ცდის შებრუნებული თანამიმდევრობით ჩატარებისას, ე.ი. ონკანის თანდათანობითი ჩაკეტვისას, აღწერილი მოვლენებიც განმეორდება შებრუნებული თანამიმდევრობით, მხოლოდ სიჩქარეთა რამდენადმე განსხვავებული მნიშვნელობებისათვის.

მოძრაობას, რომლის დროსაც სითხის ნაწილაკები გადაადგილდება ნაკადის ღერძის პარალელურად სიჩქარისა და წნევის პულსაციის გარეშე, **ლამინარული (შრეებრივი) მოძრაობა** ეწოდება. ლამინარული მოძრაობა შეიძლება განხილულ იქნეს, როგორც სითხის ცალკეული შრეების მოძრაობა, რომელშიც ნაწილაკების განივი შერევა არ ხდება.

მოძრაობას, რომლის დროსაც ხდება სითხის ნაწილაკების ინტენსიური შერევა, წნევისა და სიჩქარის პულსაცია, **ტურბულენტური (მოუწესრიგებელი) მოძრაობა** ეწოდება. ტურბულენტური მოძრაობისას სითხის ნაწილაკები გადაადგილდება გაურკვეველი სივრცითი ფორმის მრუდწირული ტრაექტორიით. ამასთან, სივრცის უძრავ წერტილში გამავალი ნაწილაკების ტრაექტორიებს დროის სხვადასხვა მომენტში სხვადასხვა ფორმა აქვს.

რეინოლდსმა, რომელმაც განაზოგადა კვლევის შედეგები, დაადგინა ამა თუ იმ რეჟიმის არსებობისა და ერთი რეჟიმიდან მეორეზე გადასვლის პირობები. აღმოჩნდა, რომ რეჟიმის ხასიათის განმსაზღვრელი ძირითადი ფაქტორებია: სითხის მოძრაობის საშუალო სიჩქარე (v), მილსადენის დიამეტრი (d), სითხის სიბლანტე (μ) და სითხის სიმკვრივე (ρ). ამ ოთხი სიდიდისაგან შედგენილი უგანზომილებო პარამეტრი (Re), რომელსაც **რეინოლდსის რიცხვს** (რეინოლდსის კრიტერიუმს) უწოდებენ, ახასიათებს სწორედ სითხის მოძრაობის რეჟიმს:

$$\mathrm{Re} = \frac{vd}{\mu/\rho}. \qquad (6.19)$$

რადგანაც $\mu/\rho = \nu$ (ν არის სიბლანტის კინემატიკური კოეფიციენტი), (6.19) ფორმულა შეიძლება ასეთი სახით ჩავწეროთ:

$$\mathrm{Re} = vd/\nu. \qquad (6.20)$$

სიჩქარეს, რომლის დროსაც მოძრაობის ლამინარული რეჟიმი გადადის ტურბულენტურში ეწოდება **ზედა კრიტიკული სიჩქარე**

($\nu_{ზ.კ}$), ხოლო სიჩქარეს, რომლის დროსაც ტურბულენტური რეჟიმი გადადის ლამინარულში – **ქვედა კრიტიკული სიჩქარე** ($\nu_{ქ.კ}$).

რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობას, რომელიც $\nu = \nu_{ქ.კ}$ სიჩქარეს შეესაბამება, **რეინოლდსის რიცხვის ქვედა კრიტიკულ მნიშვნელობას** ($\mathrm{Re}_{ქ.კ}$) უწოდებენ, ხოლო $\nu = \nu_{ზ.კ}$ სიჩქარის შემთხვევაში – **რეინოლდსის რიცხვის ზედა კრიტიკულ მნიშვნელობას** ($\mathrm{Re}_{ზ.კ}$).

რეინოლდსის რიცხვის $\mathrm{Re}_{ქ.კ}$ და $\mathrm{Re}_{ზ.კ}$ კრიტიკულ მნიშვნელობათა მიხედვით განისაზღვრება სითხის მოძრაობის ამა თუ იმ რეჟიმის არსებობის საზღვრები. როცა $\mathrm{Re} < \mathrm{Re}_{ქ.კ}$, შესაძლებელია მხოლოდ მოძრაობის ლამინარული რეჟიმი, როცა $\mathrm{Re} < \mathrm{Re}_{ზ.კრ}$ – მხოლოდ ტურბულენტური რეჟიმი. $\mathrm{Re}_{ქ.კრ} < \mathrm{Re} < \mathrm{Re}_{ზ.კრ}$ ფარგლებში შეიმჩნევა ნაკადის არამდგრადი მდგომარეობა (მოძრაობის რეჟიმი შეიძლება იყოს როგორც არამდგრადი ლამინარული, ისე ტურბულენტური). ამგვარი სითხის მოძრაობის რეჟიმის დასადგენად საჭიროა, ყოველ კონკრეტულ შემთხვევაში გამოვთვალოთ რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობა და შევადაროთ იგი კრიტიკულ მნიშვნელობებს.

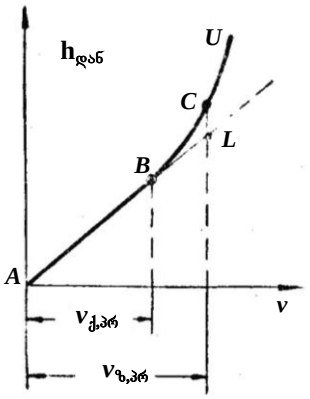
თვით რეინოლდსის ცდების მიხედვით $\mathrm{Re}_{ქ.კ} = 2000$, $\mathrm{Re}_{ზ.კ} = 12000$. თუმცა, როგორც მოგვიანებით ჩატარებულმა გამოკვლევებმა გვიჩვენა, კრიტიკული მნიშვნელობები არ არის მუდმივი და გარკვეულ პირობებში არამდგრადი (გარდამავალი) ზონა ($\mathrm{Re}_{ქ.კრ} < \mathrm{Re} < \mathrm{Re}_{ზ.კრ}$) შეიძლება გაცილებით ფართო აღმოჩნდეს. მაგალითად, სხვადასხვა ავტორის მიერ ჩატარებული ცდების მიხედვით რეინოლდსის რიცხვის ზედა კრიტიკული მნიშვნელობა იცვლება $\mathrm{Re}_{ზ.კრ} = 12000 \div 40000$ დიაპაზონში. არ არის გამორიცხული, რომ მომავალში ეს დიაპაზონი შეიძლება კიდევ უფრო გაფართოვდეს. ამიტომ, დღეისათვის ჰიდრავლიკურ გაანგარიშებათა ჩატარებისას ღებულობენ რეინოლდსის რიცხვის მხოლოდ ერთ, ქვედა კრიტიკულ მნიშვნელობას, რომელსაც უბრალოდ რეინოლდსის კრიტიკულ რიცხვს უწოდებენ და $\mathrm{Re}_{კრ}$-ით აღნიშნავენ. მისი რიცხვითი მნიშვნელობა ყველა სითხისათვის 2320-ის ტოლია, ე.ი. $\mathrm{Re}_{კრ} = \mathrm{Re}_{ქ.კრ} = 2320$. როცა $\mathrm{Re} < 2320$, მოძრაობის რეჟიმს თვლიან ყოველთვის ლამინარულად, ხოლო როცა $\mathrm{Re} > 2320$ – ყოველთვის ტურბულენტურად.

ხშირად რეინოლდსის რიცხვს ჰიდრავლიკური რადიუსით გამოსახავენ:

$$\mathrm{Re}_R = vR/\nu . \qquad (6.21)$$

ჰიდრავლიკური რადიუსის მიხედვით გამოთვლილი რეინოლდსის რიცხვის კრიტიკული მნიშვნელობა წრიული კვლევის სადაწნეო მილსადენისათვის (თუ გავითვალისწინებთ, რომ $R = d/4$) ტოლია $\mathrm{Re}_{კრ} = 580$, ხოლო ღია კალაპოტებისათვის, ცდის მონაცემების თანახმად, $\mathrm{Re}_{კრ} = 300 \div 500$.

განსაკუთრებით აღვნიშნავთ იმ გარემოებას, რომ სითხის მოძრაობის რეჟიმის ცვლილება აისახება ჰიდრავლიკური წინაღობის კანონებზე; ექსპერიმენტის შედეგები გვიჩვენებს ν საშუალო სიჩქარის სხვადასხვაგვარ გავლენას დაწნევის დანაკარგის სიდიდეზე სხვადასხვა რეჟიმის დროს. (6.5) ნახაზზე მოცემულია მილსადენში დაწნევის დანაკარგსა ($h_{დან}$) და სიჩქარეს ν შორის დამოკიდებულების გრაფიკი, რომლის განტოლებაც ზოგადი სახით შეიძლება ასე ჩაიწეროს:



ნახ. 6.5

$$h_{დან} = b\nu^n , \qquad (6.22)$$

სადაც b არის პროპორციულობის კოეფიციენტი; n – ხარისხის მაჩვენებელი.

ლამინარული რეჟიმისათვის, რომელსაც გრაფიკზე AB წრფე შეესაბამება, $n = 1$-ს. ეს ნიშნავს, რომ ლამინარული მოძრაობისას დაწნევის დანაკარგი საშუალო სიჩქარის პირველი ხარისხის პროპორციულია. ტურბულენტური რეჟიმისათვის, რომელსაც გრაფიკზე CD წირი შეესაბამება, $n = 2$-ს. მაშასადამე, ტურბულენტური მოძრაობისას დაწნევის დანაკარგი საშუალო სიჩქარის კვადრატის პროპორციულია და ამიტომ CD წირის შესაბამის ზონას **კვადრატული წინაღობის ზონას** უწოდებენ.

თუ გარდამავალ (არამდგრად) ზონაში ტურბულენტური რეჟიმია (მას გრაფიკზე შეესაბამება BC წირი), მაშინ n ხარისხის მაჩვენებელი დაახლოებით 1,75-ის ტოლია, ხოლო თუ ლამინარული რეჟიმია (მას გრაფიკზე შეესაბამება BE წრფის მონაკვეთი), მაშინ $n = 1$-ს.

შევნიშნავთ, რომ წინა პარაგრაფში მიღებული გამოსახულებები – თანაბარი მოძრაობის ძირითადი განტოლება (6.3), დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგის ფორმულა (6.15, 6.16) და წრიული

კვეთის მილში მხები ძაბვების განაწილების გამომსახველი დამოკიდებულება (6.10) – ერთნაირად მართებულია როგორც ლამინარული, ისე ტურბულენტური რეჟიმისათვის.

§ 6.4. სითხის მოძრაობის ლამინარული რეჟიმი წრიული კვეთის ცილინდრულ მილსადენში

სიჩქარეთა განაწილება ცოცხალ კვეთში. როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, სითხის მოძრაობის რეჟიმი ლამინარულია, როცა $\mathrm{Re} < 2320$. ჰიდროტექნიკურ პრაქტიკაში ლამინარული მოძრაობა იშვიათად გვხვდება, ამიტომ შემოვიფარგლებით ლამინარული მოძრაობის მხოლოდ ძირითად თავისებურებათა განხილვით.

ლამინარული მოძრაობა წრიული კვეთის მილსადენში ღერძსიმეტრიულია. ამიტომ, თუ განვიხილავთ მოძრაობას ვერტიკალურ სიბრტყეში ისე, რომ x ღერძი შეუთავსდეს მილსადენის ღერძს, ხოლო მისი მართობული r ღერძი – z ღერძს, მაშინ

$$u_x = u\,;\;\; u_y = 0\,;\;\; u_z = u_r = 0\,.$$

განსახილველ შემთხვევაში (3.8) გამოსახულება τ მხები ძაბვისათვის ასეთ სახეს მიიღებს:

$$\tau = -\mu \frac{du_x}{dr} = -\mu \frac{du}{dr}\,. \tag{6.23}$$

ნიშანი მინუსი მიუთითებს იმაზე, რომ u ადგილობრივი სიჩქარე მილის ღერძიდან დაცილებით (r ღერძის დადებითი მიმართულებით) კლებულობს, ე.ი. du/dr სიჩქარის გრადიენტი უარყოფითია, τ მხები ძაბვა კი ყოველთვის დადებითი სიდიდეა.

(6.23) დამოკიდებულება, რომელიც მართებულია მხოლოდ მოძრაობის ლამინარული რეჟიმისათვის, გავუტოლებთ (6.7) გამოსახულებას, რომელიც მოძრაობის ორივე რეჟიმისათვისაა გამოსადეგი

$$-\mu \frac{du}{dr} = \gamma \frac{r}{2} I$$

ანუ

$$du = -\frac{\gamma I}{2\mu} r dr\,.$$

თუ დავუშვებთ, რომ განსახილველი სითხის სიბლანტე გარკვეულ პირობებში მუდმივია $(\mu = const)$, მაშინ

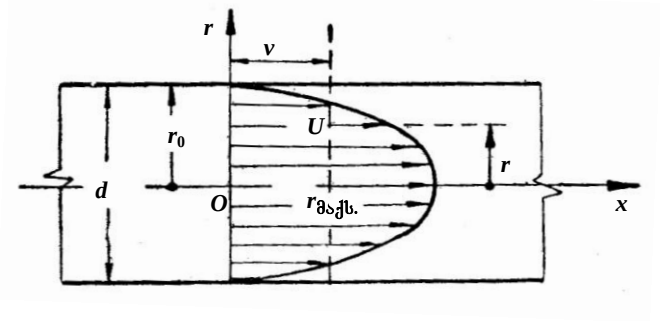
$$\int_0^u du = -\frac{\gamma I}{2\mu} \int_{r_0}^{r} r dr = \frac{\gamma I}{2\mu} \int_{r}^{r_0} r dr\,,$$

საიდანაც

$$u = \frac{\gamma I}{4\mu}(r_0^2 - r^2)\,. \tag{6.24}$$

მაგრამ მიღებული გამოსახულება არის კვადრატული პარაბოლის განტოლება. ამიტომ დავასკვნათ, რომ ადგილობრივი სიჩქარეები მილსადენის ცოცხალ კვეთში განაწილებულია პარაბოლური კანონით (ნახ. 6.6). მაქსიმალური სიჩქარე მიიღება პირობიდან $r = 0$, ე.ი. მილსადენის ღერძზე:

$$u_{\text{მაქს}} = \frac{\gamma I}{4\mu} r_0^2\,. \tag{6.25}$$



ნახ. 6.6

ამ უკანასკნელის გათვალისწინებით (6.24) გამოსახულება ასეთ სახეს მიიღებს:

$$u = u_{\text{მაქს}}\left[1 - (r/r_0)^2\right] \tag{6.26}$$

ანუ

$$u/u_{\text{მაქს}} = 1 - (r/r_0)^2\,. \tag{6.27}$$

მაშასადამე, ცოცხალი კვეთის რომელიმე წერტილში არსებული ადგილობრივი სიჩქარის ფარდობა მაქსიმალურ სიჩქარესთან დამოკიდებულია მხოლოდ მილის კვეთში წერტილის ფარდობით მდებარეობაზე $\left(\frac{r}{r_0}\right)$ და არ არის დამოკიდებული არც მილის გეომეტრიულ ზომებზე და არც სითხის გვარობაზე. ეს ნიშნავს, რომ **ფარდობით სიჩქარეთა ეპიურები** ლამინარული მოძრაობისას წრიული კვეთის მილსადენებში ერთმანეთის მსგავსია და აიგება (6.27) განტოლებით.

ახლა გამოვთვალოთ საშუალო სიჩქარე ცოცხალ კვეთში. ამისათვის (5.19) გამოსახულებაში შევიტანოთ u-ს მნიშვნელობა (6.26) განტოლებიდან და მოვახდინოთ შესაბამისი გარდაქმნები, მივიღებთ:

$$v = 0{,}5u_{მაქს}. \tag{6.28}$$

მაშასადამე, წრიული ცილინდრული მილსადენის ცოცხალ კვეთში საშუალო სიჩქარე ლამინარული მოძრაობისას მაქსიმალური ადგილობრივი სიჩქარის ნახევრის ტოლია.

კორიოლისის კოეფიციენტის მნიშვნელობა ლამინარული მოძრაობისათვის 2-ის ტოლია ($\alpha = 2$). კინეტიკური ენერგიის კოეფიციენტის (კორიოლისის კოეფიციენტის) ასეთი დიდი გადახრა 1-დან გამოწვეულია იმით, რომ მოძრაობის ლამინარული რეჟიმი ხასიათდება კვეთში ადგილობრივ სიჩქარეთა განაწილების მნიშვნელოვანი უთანაბრობით.

დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგი ლამინარული მოძრაობისას. დარსის კოეფიციენტი. (6.25) გამოსახულებიდან $u_{მაქს}$-ის მნიშვნელობა შევიტანოთ (6.28) ტოლობაში, გავითვალისწინოთ, რომ $\gamma = \rho g$, $\mu/\rho = \nu$, $r_0 = d/2$ (ნახ. 6.6), $R = d/4$ და შევასრულოთ ასეთი გარდაქმნა:

$$v = \frac{\gamma I}{8\mu} r_0^2 = \frac{\rho g I}{8\mu}\left(\frac{d}{2}\right)^2 = \frac{gI}{8\nu}\frac{d}{4}\cdot d = \frac{gRI}{8\nu} d\,.$$

აქედან

$$gRI = \frac{8\nu v}{d}$$

ან, თანახმად (6.6)-ისა,

$$u_*^2 = \frac{8\nu v}{d}\,.$$

ვისარგებლოთ (6.18) დამოკიდებულებით და ვიპოვოთ λ კოეფიციენტის (დარსის კოეფიციენტის) მნიშვნელობა:

$$\lambda = 8\left(\frac{u_*}{v}\right)^2 = \frac{8u_*^2}{v^2} = \frac{8\cdot 8\nu\upsilon}{v^2 d} = \frac{64\upsilon}{vd} = \frac{64}{vd/\upsilon}\,;$$

მაგრამ $vd/\upsilon = \mathrm{Re}$, ამიტომ

$$\lambda = 64/\mathrm{Re}\,. \tag{6.29}$$

ჩვენ 6.3 პარაგრაფში აღვნიშნეთ, რომ (6.15) და (6.16) გამოსახულებები დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგის გამოსათვლელად მართებულია მოძრაობის როგორც ლამინარული, ისე ტურბულენ-

ტური რეჟიმისათვის, მხოლოდ დარსის კოეფიციენტის მნიშვნელობა სხვადასხვაა. როგორც ვნახეთ, ლამინარული რეჟიმისათვის დარსის კოეფიციენტის მნიშვნელობა გამოითვლება (6.29) ფორმულით. ამიტომ, თუ შევიტანთ ამ სიდიდეს (6.15) და (6.16) გამოსახულებებში, მივიღებთ დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგის გამოსათვლელ ფორმულას, მოძრაობის ლამინარული რეჟიმისათვის:

$$h_{\text{სიგ}} = \frac{64}{\mathrm{Re}} \frac{\ell}{4R} \frac{v^2}{2g} = \frac{16}{\mathrm{Re}} \frac{\ell}{R} \frac{v^2}{2g} \tag{6.30}$$

და

$$h_{\text{სიგ}} = \frac{64}{\mathrm{Re}} \frac{\ell}{d} \frac{v^2}{2g} . \tag{6.31}$$

მიღებული გამოსახულების გარეგნული ფორმიდან გამომდინარე **არ უნდა გავაკეთოთ მცდარი დასკვნა,** რომ თითქოს ლამინარული მოძრაობისას დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგი საშუალო სიჩქარის კვადრატის პროპორციულია. საქმე იმაშია, რომ თვით რეინოლდსის რიცხვი $\mathrm{Re} = vd/\nu$ და, მაშასადამე, $\lambda = 64/\mathrm{Re}$ კოეფიციენტიც საშუალო სიჩქარის ფუნქციაა. ამიტომ (6.31) ფორმულა შეიძლება ასეთი სახით ჩავწეროთ:

$$h_{\text{სიგ}} = \frac{64}{vd/\nu} \frac{\ell}{4R} \frac{v^2}{2g} = \frac{64\nu\ell}{d^2 \cdot 2g} v = bv . \tag{6.32}$$

ამრიგად, წრიულო კვეთის ცილინდრულ მილსადენში მოძრაობის ლამინარული რეჟიმისას დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგი საშუალო სიჩქარის პირველი ხარისხის პროპორციულია.

მოძრაობის ლამინარული რეჟიმის განხილვისას უნდა აღინიშნოს კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი გარემოება – **ლამინარული მოძრაობა მილსადენში გრიგალური მოძრაობაა**. ლამინარულ ნაკადში გრიგალთწარმოქმნა განპირობებულია სითხის სიბლანტით და მეზობელ შრეებს შორის სიჩქარეთა სხვადასხვაობით, რაც სითხის ნაწილაკების დატრიალებას (ბრუნვას) იწვევს. გრიგალური წირები წარმოადგენს ცოცხალი კვეთის სიბრტყეში მოთავსებულ კონცენტრულ წრეწირებს ცენტრით მილსადენის ღერძზე.

§ 6.5. სითხის ტურბულენტური მოძრაობა. სიჩქარის პულსაცია. მყისი და გასაშუალებული ადგილობრივი სიჩქარეები

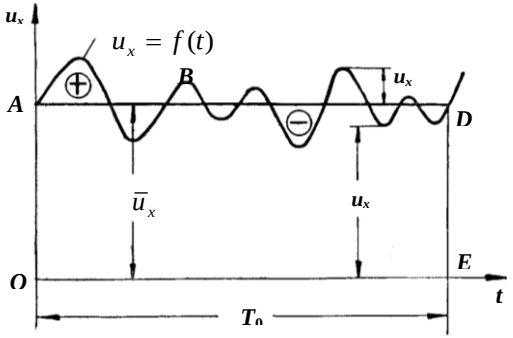
ტურბულენტური მოძრაობის მექანიზმი გაცილებით რთულია, ვიდრე ლამინარულის. ტურბულენტური რეჟიმისას სითხის ნაწილაკები ნაკადის ღერძის მიმართულებით გადატანით მოძრაობასთან ერთად გადაადგილდება აგრეთვე განივი მიმართულებითაც და ამიტომ ტურბულენტური ნაკადი ხასიათდება სითხის ნაწილაკების განუწყვეტელი, ინტენსიური და მოუწესრიგებელი შერევის პროცესით. აღნიშნულის გამო, ნაკადის ნებისმიერ წერტილში სითხის ნაწილაკების სიჩქარის ვექტორის სიდიდე და მიმართულება მყის იცვლება. მაშასადამე, შეიძლება ითქვას, რომ **ტურბულენტური მოძრაობა თავისი არსით დაუმყარებელი მოძრაობაა.** ტურბულენტური ნაკადის აღებულ წერტილში სიჩქარის სიდიდისა და მიმართულების მყის ცვლილებას **სიჩქარის პულსაცია** ეწოდება. სიჩქარეს ტურბულენტური ნაკადის მოცემულ წერტილში დროის მოცემულ მომენტში **ადგილობრივი მყისი სიჩქარე** (ან **ნამდვილი მყისი სიჩქარე**) ეწოდება. ადგილობრივი სიჩქარე u ასოთი აღინიშნება.

ყოველივე აღნიშნული ნათელს ხდის, თუ რატომ არის თითქმის შეუძლებელი ტურბულენტური ნაკადის ცალკეულ ნაწილაკთა ინდივიდუალური მოძრაობის შესწავლა. მაგრამ ეს არ ნიშნავს, რომ, სირთულის გამო, საკითხის შესწავლაზე ხელი ავიღოთ. ჰიდრავლიკის მრავალი პრაქტიკული საკითხის გადასაწყვეტად ხშირად არსებითი მნიშვნელობა აქვს სითხის ნაწილაკის არა მყის მახასიათებლებს, არამედ ამ მახასიათებლების **საშუალო სტატისტიკურ მნიშვნელობებს.** ასე, მაგალითად, ადგილობრივი მყისი სიჩქარის ნაცვლად ჰიდრავლიკა განიხილავს დროის მიხედვით **გასაშუალებულ სიჩქარეს** ($\overline{u}$) ნაკადის მოცემულ წერტილში. ამასთან, ფრიად მნიშვნელოვანია ის ფაქტი, რომ u ადგილობრივი მყისი სიჩქარე, მიუხედავად მისი მოჩვენებითი მოუწესრიგებელი ცვლილებისა, ირხევა სწორედ მოცემულ წერტილში დროის მიხედვით მუდმივი საშუალო მნიშვნელობის – **ადგილობრივი გასაშუალებული** სიჩქარის ($\overline{u}$) ირგვლივ. შევნიშნავთ, რომ გასაშუალებული სიჩქარის ჭეშმარიტი მნიშვნელობის საპოვნელად ადგილობრივი მყისი სიჩქარეების გაზომვისა და გასაშუალების დრო (ინტერვალი) უნდა იყოს საკმარისი ხანგრძლივობის.

ჩვეულებრივ, მეტი ყურადღება ექცევა ადგილობრივი მყისი სიჩქარის (u) გრძივი შემდგენის (u_x) პულსაციას, რომელიც

ცოცხალ კვეთში სხვადასხვა ჰიდრომეტრიული ხელსაწყოს საშუალებით, მაგალითად, პიტოს მილაკით იზომება. u_x გრძივი შემდგენი არის u სიჩქარის გეგმილი ტურბულენტური ნაკადის დინების მიმართულებაზე $u_x = u\cos\alpha$, სადაც α კუთხეა დინების მიმართულებასა და u სიჩქარის ვექტორს შორის. ვთქვათ, *ABCD* წირი (ნახ. 6.7) ასახავს ნამდვილი მყისი სიჩქარის გრძივი შემდგენის ცვლილებას დროის მიხედვით ტურბულენტური ნაკადის რაიმე წერტილში და გამოისახება განტოლებით

$$u_x = f(t). \tag{6.33}$$



ნახ. 6.7.

ვიპოვოთ შემდეგი ინტეგრალის

$$\int_0^{T_0} u_x dt = \int_0^{T_0} f(t)dt \tag{6.34}$$

მნიშვნელობა. ცხადია, გრაფიკულად ის წარმოადგენს *OABCDE* მრუდწირული ნაკვთის ფართობს. თუ (6.34) გამოსახულებას გავყოფთ T_0-ზე, მივიღებთ მრუდწირული ნაკვთის ტოლდიდი *OADE* მართკუთხედის სიმაღლეს ($\bar{u}_x$), რომელიც გამოსახავს ნაკადის განსახილველ წერტილში გასაშუალებული ადგილობრივი სიჩქარის გრძივი შემდგენის სიდიდეს:

$$\bar{u}_x = \frac{\int_0^{T_0} u_x dt}{T_0}. \tag{6.35}$$

ადგილობრივი მყისი და ადგილობრივი გასაშუალებული სიჩქარეების გრძივი შემდგენების სხვაობას **გრძივი პულსაციური სიჩქარე** ეწოდება

$$u'_x = u_x - \bar{u}_x . \qquad (6.36)$$

ადვილი დასადგენია, რომ დროის საკმარისად ხანგრძლივი T_0 შუალედისათვის გრძივი პულსაციური სიჩქარეების ჯამი ნულის ტოლია:

$$\sum u'_x dt = 0 ,$$

რადგან AD წრფის ზემოთ და ქვემოთ პლუს და მინუს ნიშნით აღებული ფართობების ჯამი უდრის ნულს.

(4.39)-ის ანალოგიური გამოსახულებები შეიძლება მივიღოთ გასაშუალებული სიჩქარის დანარჩენი ორი შემდგენისთვისაც ($\bar{u}_y$ და $\bar{u}_z$).

მაშინ სრული გასაშუალებული სიჩქარე გამოითვლება ფორმულით:

$$\bar{u} = \sqrt{\bar{u}_x^2 + \bar{u}_y^2 + \bar{u}_z^2} . \qquad (6.37)$$

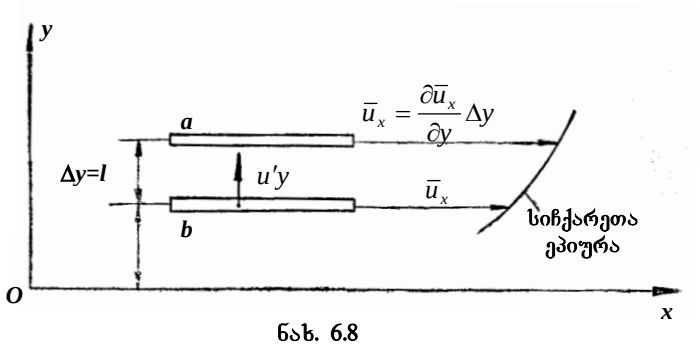
გასაშუალებული სიჩქარის ცნების შემოტანა საშუალებას იძლევა ტურბულენტური ნაკადის მოძრაობა პირობითად დამყარებულ მოძრაობად ჩავთვალოთ და ადგილობრივ მყის სიჩქარეთა ველის ნაცვლად განვიხილოთ გასაშუალებულ სიჩქარეთა ველი. ასეთ შემთხვევაში შესაძლებელი ხდება ტურბულენტური მოძრაობის მიმართ დამყარებული მოძრაობისათვის მიღებული ყველა დებულებისა და დამოკიდებულების გამოყენება. შემდგომში ტურბულენტური რეჟიმისათვის ადგილობრივ u სიჩქარეში ვიგულისხმებთ გასაშუალებულ $\bar{u}$ სიჩქარეს.

დასასრულ, შევნიშნავთ, რომ ადგილობრივ მყის სიჩქარეთა გაზომვისა და გასაშუალების T_0 დროის ხანგრძლივობა დამოკიდებულია პულსაციური სიჩქარის სიდიდეზე. იმ ოპტიმალური T_0 დროის გასაგებად, რომლისთვისაც $\bar{u}$ სიჩქარე მოიძებნება აუცილებელი სიზუსტით, ჩატარებულ იქნა გაზომვები სხვადასხვა ხელსაწყოთი სხვადასხვა ხანგრძლივობით და სხვადასხვა პირობებში. შედეგად დადგინდა ნაკადის დინების ადგილობრივ სიჩქარეთა გაზომვის ნორმები. სსრ კავშირში ჰიდრომეტრიული ტრიალათი სიჩქარის 2%-ის სიზუსტით გასაზომად სტანდარტულ სიდიდედ აღებული იყო $T_0 = 100$ წმ, თუმცა დიდი ტურბულენტობის შემთხვევაში (მაგალითად, მთის მდინარეებისათვის) ამ დრომ შეიძლება 10 წუთსაც მიაღწიოს.

§ 6.6. მხები ძაბვების ზოგადი გამოსახულება განაშუალებული ტურბულენტური ნაკადისათვის

მოძრაობის ტურბულენტური რეჟიმის თავისებურებათა გათვალისწინებით ლ. პრანდტლმა, თ. კარმანმა, ი. ტეილორმა, ი. ნიკურაძემ შექმნეს ჰიდრავლიკური წინაღობისა და დაწნევის დანაკარგების ნახევრად ემპირიული თეორია, რომელიც ეყრდნობა ნაკადში ტურბულენტური შერევის პროცესით გამოწვეული **დამატებითი ინერციული მხები ძაბვების** განსაზღვრის იდეას. ქვემოთ გავეცნოთ ამ თეორიის საფუძვლებს.

ტურბულენტურ ნაკადში განვიხილოთ სითხის ორი a და b შრე (ნახ. 6.8), რომლებიც ერთმანეთისაგან Δy მანძილითაა დაცილებული. მათი ურთიერთშეხების ზედაპირის ფართობი აღვნიშნოთ S-ით, ხოლო მანძილი კალაპოტის კედლიდან b შრემდე – y-ით. ვთქვათ, b შრის გასაშუალებული სიჩქარის გრძივი შემდგენია $\overline{u}_x$, მაშინ a შრის სიჩქარე იქნება $\overline{u}_x + \frac{d\overline{u}_x}{dy}\Delta y$. როგორც ადრე აღვნიშნეთ, ტურბულენტური მოძრაობისას ხდება სითხის ნაწილაკების განივი გადაადგილებაც a შრიდან b შრეში (და პირიქით) პულსაციური სიჩქარის u'_y შემდგენის ტოლი სიჩქარით. შევარჩიოთ შრეების ღერძებს შორის მანძილი $\ell = \Delta y$ ისე, რომ b შრიდან a შრეში შერეულმა სითხის ნაწილაკმა მოასწროს a შრის სიჩქარის შეძენა. ℓ მანძილს სითხის ნაწილაკების **განივი შერევის მანძილი** ეწოდება. ეს უკანასკნელი ფიზიკურად წარმოადგენს მანძილს, რომელიც უნდა გაიაროს სითხის ნაწილაკმა განივი მიმართულებით, რომ გარემომცველ ტურბულენტურ ნაკადთან შერევის შედეგად, ლ. პრანდტლის გამოთქმით, „დაკარგოს თავისი ინდივიდუალობა“, ე.ი. დაკარგოს პულსაციური სიჩქარის u'_y განივი შემდგენი. იმის გამო, რომ განივი მიმართულებით გადაადგილებული ნაწილაკების ღერძული სიჩქარეები განსხვავებულია, თითოეულ შრეში ხდება მოძრაობის რაოდენობის ცვლილება. კერძოდ, მეტი ღერძული სიჩქარის მქონე a შრეში მოძრაობის რაოდენობა შემცირდება, ხოლო ნაკლები სიჩქარით მოძრავ b შრეში – გაიზრდება. შრეების შეხების ზედაპირზე აღიძვრება T მხები (ინერციული) ძალა, რომლის იმპულსი განსახილველ შრეში მოძრაობის რაოდენობის ცვლილების ტოლი იქნება.



ნახ. 6.8

შრეების ურთიერთშეხების S ფართობში u'_y განივი პულსაციური სიჩქარით დროის ერთეულში გადაადგილება Δm მასა

$$\Delta m = \rho S u'_y .$$

მოძრაობის რაოდენობის ცვლილება დროის ერთეულში თითოეულ შრეში მხები ძალის ტოლი იქნება:

$$T = \Delta m u'_x = \rho S u'_y \frac{d\bar{u}_x}{dy}\ell ,$$

სადაც u'_x არის პულსაციური სიჩქარის გრძივი შემდგენი და, აღნიშნული თეორიის თანახმად, ის გაიგივებულია a და b შრეებს შორის სიჩქარეთა სხვაობასთან

$$\left(\bar{u}_x + \frac{d\bar{u}_x}{dy}\Delta y\right) - \bar{u}_x = \frac{d\bar{u}_x}{dy}\Delta y = \frac{d\bar{u}_x}{dy}\ell = u'_x . \qquad (6.38)$$

(6.38) გამოსახულებიდან განვსაზღვრავთ იმ დამატებით ინერციულ მხებ ძაბვას, რომელიც აღიძვრება ტურბულენტურ ნაკადში სითხის ნაწილაკების ურთიერთშერევის პროცესის შედეგად:

$$\tau_{\text{დამ}} = \frac{T}{S} = \rho \bar{u}'_y \frac{d\bar{u}_x}{dy}\ell . \qquad (6.39)$$

ლ. პრანდტლის ჰიპოთეზის თანახმად, პულსაციური სიჩქარის u'_y განივი შემდგენი $\frac{d\bar{u}_x}{dy}\ell$ სიდიდის პროპორციულია. ამიტომ, (6.39)-დან

$$\tau_{\text{დამ}} \sim \rho \ell^2 \left(\frac{d\bar{u}_x}{dy}\right)^2 ,$$

ე.ი.

$$\tau_{\text{დამ}} = k\rho\ell^2\left(\frac{d\bar{u}_x}{dy}\right)^2.$$

თუ პროპორციულობის k კოეფიციენტის სიდიდეს ჩავრთავთ შერევის ℓ სიგრძის მნიშვნელობაში, მივიღებთ დამატებითი ინერციული ძაბვის საანგარიშო ფორმულას:

$$\tau_{\text{დამ}} = \rho\ell^2\left(\frac{d\bar{u}_x}{d\ell}\right)^2. \tag{6.40}$$

ცხადია, ამ გამოსახულებაში ℓ სიდიდეს რამდენადმე განსხვავებული შინაარსი აქვს, ვიდრე წინა გამოსახულებებში.

ძალებისა და ძაბვების დამოუკიდებელი მოქმედების პრინციპის თანახმად, $\tau_{\text{დამ}}$ ძაბვის სიდიდე უნდა დავუმატოთ იმ წმინდა სიბლანტით გამოწვეული მხებ ძაბვას, რომელიც მოქმედებს ტურბულენტური ნაკადის განსხვავებული სიჩქარით მოძრავი სითხის შრეებს შორის. მიღებული აღნიშვნების შესაბამისად, სიბლანტით განპირობებული მხები ძაბვის ფორმულა (3.8) ასე ჩაიწერება:

$$\tau_{\text{სიბლ}} = \mu\frac{d\bar{u}_x}{dy}.$$

ამრიგად, ტურბულენტური რეჟიმის დროს სითხეში მოქმედი ჯამური მხები ძაბვა გამოითვლება ფორმულით:

$$\tau = \tau_{\text{სიბლ}} + \tau_{\text{დამ}} = \mu\frac{d\bar{u}_x}{dy} + \rho\ell^2\left(\frac{d\bar{u}_x}{dy}\right)^2. \tag{6.41}$$

მიღებულ გამოსახულებას დიდი მნიშვნელობა აქვს მოძრავი სითხის ნაკადში არსებული მხები ძაბვების ფიზიკური არსი გარკვევისათვის. მისი ანალიზის საფუძველზე დავასკვნით:

1. ლამინარული მოძრაობისას სითხის ნაწილაკების ურთიერთშერევა არ ხდება, ე.ი. $\ell = 0$ და, მაშასადამე

$$\tau = \tau_{\text{დამ}} = \tau_{\text{სიბლ}} = \mu\frac{d\bar{u}_x}{dy} \tag{6.42}$$

მხები ძაბვა სიჩქარის გრადიენტის პირველი ხარისხის პროპორციულია. მაგრამ კვეთში სიჩქარეთა განაწილების ეპიურის მუდმივობისას სიჩქარის გრადიენტი ნაკადის საშუალო სიჩქარის პროპორციულია, ამიტომ $\tau_{\text{დამ}}$ **მხები ძაბვაც საშუალო სიჩქარის პირველი ხარისხის პროპორციულია**.

2. განვითარებული ტურბულენტური მოძრაობისას, როდესაც ხდება სითხის ნაწილაკების ინტენსიური ურთიერთშერევა, (6.41)

განტოლების მეორე წევრის ($\tau_{\text{დამ}}$) სიდიდე მნიშვნელოვნად აღემატება პირველი წევრისას, ამიტომ $\tau_{\text{სიბლ}}$ შეიძლება უგულებელვყოთ. მაშინ (6.41) განტოლება ასეთ სახეს მიიღებს:

$$\tau = \tau_{\text{კვ}} = \tau_{\text{დამ}} = \rho\ell^2\left(\frac{d\bar{u}_x}{dy}\right)^2 . \qquad (6.43)$$

ეს ნიშნავს, რომ განვითარებული ტურბულენტობის შემთხვევაში **მხები ძაბვა საშუალო სიჩქარის კვადრატის პროპორციულია.** ამ დროს საქმე გვაქვს ე.წ. **წინაღობის კვადრატულ ზონასთან**.

3. ისეთ ტურბულენტურ ნაკადში, რომლისთვისაც (6.41) ფორმულაში შემავალი ორი წევრი ერთი რიგის სიდიდეებია, ჯამური მხები ძაბვა მოძრაობის საშუალო სიჩქარის ორზე ნაკლები ხარისხის პროპორციულია. ამ დროს საქმე გვაქვს ე.წ. **წინაღობის გარდამავალ ზონასთან**.

(6.43) გამოსახულება ასე გადავწეროთ:

$$\tau = \left(\rho\ell^2\frac{d\bar{u}_x}{dy}\right)\frac{d\bar{u}_x}{dy} = \varepsilon\frac{d\bar{u}_x}{dy} , \qquad (6.44)$$

სადაც

$$\varepsilon = \rho\ell^2\frac{d\bar{u}_x}{dy} , \qquad (6.45)$$

მაშინ ჯამური მხები ძაბვის ფორმულა შეიძლება ასეთი სახითაც ჩავწეროთ:

$$\tau = \mu\frac{d\bar{u}_x}{dy} + \varepsilon\frac{d\bar{u}_x}{dy} = (\mu+\varepsilon)\frac{d\bar{u}_x}{dy} . \qquad (6.46)$$

ε კოეფიციენტს ხშირად **ტურბულენტური შერევის ან ვირტუალური სიბლანტის კოეფიციენტს** უწოდებენ. შევნიშნავთ, რომ μ სიბლანტის კოეფიციენტისაგან განსხვავებით ε არ არის მუდმივი სიდიდე და არ ახასიათებს მოცემული სითხის ფიზიკურ თვისებებს; იგი მკვეთრად იცვლება ნაკადის ცოცხალი კვეთის ფარგლებში.

§ 6.7. ტურბულენტური ნაკადის სტრუქტურა. ჰიდრავლიკურად გლუვი და ხორკლიანი კალაპოტები

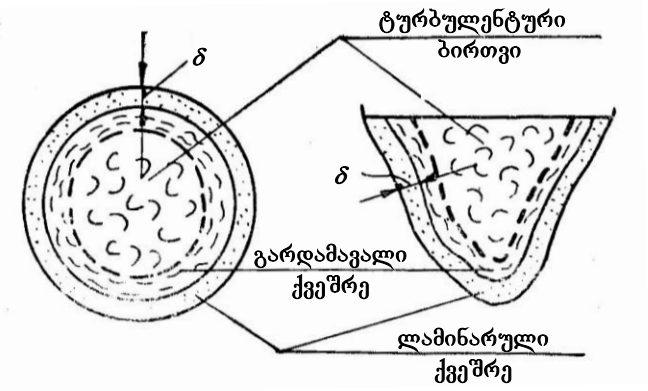
მრავალრიცხოვანმა გამოკვლევებმა გვიჩვენა, რომ ტურბულენტური ნაკადის ცოცხალ კვეთში სითხის ნაწილაკების ურთი-

ერთშერევის ინტენსიურობა სხვადასხვაა. კალაპოტის (მილსადენის) კედლთან შერევის პროცესი წყდება, რადგანაც მყარი ზედაპირი შეუძლებელს ხდის ნაწილაკების განივ გადაადგილებას. ამიტომ, ტურბულენტურ ნაკადში კედლის უშუალო მახლობლობაში წარმოიქმნება ძალზე მცირე სისქის **კედლისპირა ბლანტი ქვეშრე,** რომელსაც **ლამინარულ აფსკს** უწოდებენ (ნახ. 6.9). ლამინარულ ქვეშრეს ესაზღვრება **გარდამავალი ქვეშრე,** რომელიც ლამინარულ ქვეშრესთან ერთად შეადგენს ე.წ. **სასაზღვრო შრეს.** ნაკადის დანარჩენ ნაწილს **ტურბულენტური ბირთვი** ეწოდება. მიღებულია, რომ ლამინარულ ქვეშრეში მისი მცირე სისქის გამო (ამ შრის სისქე δ იზომება მილიმეტრის ნაწილებში) სიჩქარეები განაწილებულია წრფივი კანონით ნულიდან (კალაპოტის კედელთან) რაღაც $u_{\text{გარდ}}$ სასრულ მნიშვნელობამდე (ლამინარული და გარდამავალი ქვეშრეების შეხების ზედაპირზე). თვლიან, რომ ლამინარულ ქვეშრეში მოძრაობა ახლოს არის ლამინარულთან, სიჩქარის გრადიენტის მნიშვნელობა დიდია და მიახლოებით შეიძლება მუდმივ სიდიდედ ჩაითვალოს. სიბლანტის დინამიკური კოეფიციენტის (μ) მნიშვნელობა გაცილებით მეტია ვირტუალური სიბლანტის კოეფიციენტის (ε) მნიშვნელობაზე. გარდამავალ ქვეშრეში შეიმჩნევა მოძრაობის ორივე რეჟიმი – დროდადრო ლამინარული, დროდადრო ტურბულენტური. ამ ქვეშრისთვის μ და ε კოეფიციენტების მნიშვნელობები ერთი რიგისაა. ტურბულენტურ ბირთვში სიჩქარის გრადიენტის მნიშვნელობები დიდი არ არის, ε კოეფიციენტის მნიშვნელობა გაცილებით მეტია μ კოეფიციენტის მნიშვნელობაზე, ხოლო სიჩქარის განაწილების ხასიათი შეესაბამება ტურბულენტურ რეჟიმს, სადაც, როგორც ქვემოთ ვნახავთ, სიჩქარეები იცვლება ლოგარითმული კანონით.

ტურბულენტური ნაკადის ცალკეული ზონის სისქე შეიძლება დადგენილ იქნეს შემდეგი თანაფარდობებიდან: ბლანტი (ლამინარული) ქვეშრისათვის $0 < \frac{u_* y}{\nu} < 7$; გარდამალი ქვეშრისათვის $7 < \frac{u_* y}{\nu} < 70$; ტურბულენტური ბირთვისათვის $\frac{u_* y}{\nu} > 70$. აქ u_* არის დინამიკური სიჩქარე, ხოლო y – მანძილი კედლის ზედაპირიდან.

ლამინარული ქვეშრის სისქე (δ) წრიული კვეთის მილსადენისათვის გამოითვლება ფორმულით:

$$\delta \approx \frac{30d}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}}. \qquad (6.47)$$



ნახ. 6.9

(6.47) გამოსახულება გვიჩვენებს, რომ ლამინარული ქვეშრის სისქე რეინოლდსის რიცხვის უკუპროპორციულია, ე.ი. ნაკადის მოძრაობის სიჩქარის და, მაშასადამე, რეინოლდსის რიცხვის გაზრდით ლამინარული ქვეშრის სისქე მცირდება.

როგორც აღვნიშნეთ, ლამინარული აფსკის სისქე ძალზე მცირეა და კალაპოტში ნაკადის სიღრმის ან მილსადენის დიამეტრის მეასედ და მეათასედ ნაწილს შეადგენს, მაგრამ ის არსებით გავლენას ახდენს ჰიდრავლიკურ წინაღობათა და დაწნევის დანაკარგების ხასიათსა და სიდიდეზე.

ნაკადის შემომსაზღვრელი სადინარის კედლების შიგა ზედაპირი ხასიათდება ამა თუ იმ სახის და სიდიდის ხორკლიანობით, რომელიც დამოკიდებულია კედლის მასალაზე, მისი დამუშავების ხარისხსა და სადინარის ექსპლუატაციის პირობებზე.

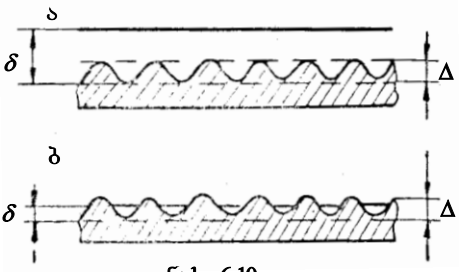
ხორკლიანობის ძირითადი მახასიათებელია **აბსოლუტური ხორკლიანობა** (Δ), რომელიც ხორკლების (შვერილების) საშუალო სიმაღლეს წარმოადგენს. ასეთ იდეალიზებულ ხორკლიანობას **თანაბარმარცვლოვანი** ეწოდება.

აბსოლუტური ხორკლიანობისა (Δ) და ლამინარული ქვეშრის სისქის (δ) სიდიდეთა შორის თანაფარდობის მიხედვით შეიძლება განვასხვაოთ ტურბულენტური ნაკადის მოძრაობის სამი შემთხვევა:

1. $\delta > \Delta$ (ნახ. 6.10, ა). ამ დროს ხორკლები მთლიანად დაფარულია ბლანტი ქვეშრით (ლამინარული აფსკით) და ტურბულენტური ბირთვი მისრიალებს ლამინარული აფსკის ზედაპირის გასწვრივ ისე, რომ ტურბულენტური ბირთვი სადინარის (კალაპოტის) კედელთან უშუალოდ შეხებაში არ არის და კედლის

ხორკლიანობა გავლენას ვერ მოახდენს ნაკადის დაწნევის დანაკარგების სიდიდესა და ხასიათზე; სიგრძეზე წინაღობის კოეფიციენტი დამოკიდებულია მხოლოდ რეინოლდსის რიცხვზე. ასეთ შემთხვევაში სადინარის კედელს **ჰიდრავლიკურად გლუვს** უწოდებენ.

2. $\delta < \Delta$ (ნახ. 6.10, ბ). ამ დროს ხორკლები მთლიანად ან ნაწილობრივ გამოდის ლამინარული ქვეშრის ზონიდან და ექცევა ტურბულენტური ბირთვის ზონაში. შედეგად მკვეთრად იზრდება როგორც ხახუნი ტურბულენტურ ბირთვსა და კალაპოტის კედლებს შორის, ისე ტურბულენტური განივი შერევისა და ცალკეული ხორკლების ზედაპირიდან გრიგალური წარმონაქმნების მოწყვეტის ინტენსიურობა. ყოველივე ამის გამო, კედლის ხორკლიანობა გავლენას ახდენს ნაკადის დაწნევის დანაკარგების სიდიდესა და ხასიათზე; სიგრძეზე წინაღობის კოეფიციენტი დამოკიდებულია მხოლოდ ხორკლიანობაზე. ასეთ შემთხვევაში კალაპოტის კედელს **ჰიდრავლიკურად ხორკლიანს** უწოდებენ.



ნახ. 6.10

3. ლამინარული ქვეშრის სისქე და აბსოლუტური ხორკლიანობა ერთი რიგისაა. ამ შემთხვევაში სიგრძეზე წინაღობის კოეფიციენტის მნიშვნელობაზე გავლენას ახდენს როგორც რეინოლდსის რიცხვი, ისე კალაპოტის ხორკლიანობა.

ჰიდრავლიკურ წინაღობებზე ხორკლიანობის გავლენის დასახასიათებლად შემოაქვთ **ფარდობითი ხორკლიანობის** ცნებაც, რომელშიც იგულისხმება აბსოლუტური ხორკლიანობის ფარდობა ნაკადის რაიმე დამახასიათებელ წრფივ ზომასთან (მილის r_0 რადიუსთან, d დიამეტრთან. ღია კალაპოტში ნაკადის h სიღრმესთან და სხვ.). მაგალითად, წრიული კვეთის მილსადენის ფარდობით ხორკლიანობას გამოსახავს $\frac{\Delta}{r_0}$ ან Δ/d უგანზომილებო ფარდობა. ფარდობითი ხორკლიანობის შებრუნებულ სიდიდეს **ფარდობითი სიგლუვე** ეწოდება. მაგალითად, მილსადენის ფარდობითი სიგლუვე გამოისახება $\frac{r_0}{\Delta}$ ან $\frac{d}{\Delta}$ ფარდობით.

სინამდვილეში, როგორც გამოკვლევებმა გვიჩვენა, ჰიდრავლიკურ წინაღობებზე გავლენას ახდენს არა მხოლოდ აბსოლუტური ხორკლიანობა, არამედ ხორკლების ფორმაც, მათი განლაგების სიხშირე და ხასიათი. ვინაიდან ამ ფაქტორების გათვალისწინება უშუალოდ გაზომვებით შეუძლებელია, ამიტომ დღეისათვის სამრეწველო მილების კედლების ხორკლიანობის დასახასიათებლად ჰიდრავლიკურ გაანგარიშებებში სარგებლობენ ე.წ. ეკვივალენტური ხორკლიანობით ($\Delta_{ეკვ}$). ეს უკანასკნელი ისე უნდა შეირჩეს, რომ მოგვცეს სიგრძეზე წინაღობის კოეფიციენტის ისეთივე მნიშვნელობა (და მაშასადამე, დაწნევის დანაკარგებისაც), როგორსაც მოგვცემდა ფაქტიური ხორკლიანობის შემთხვევა. ეკვივალენტური ხორკლიანობის მნიშვნელობას ადგენენ მილსადენების ჰიდრავლიკური გამოცდის საფუძველზე.

როგორც ზემოთ ვნახეთ, ლამინარული ქვეშრის სისქე (δ) რეინოლდსის რიცხვის გაზრდით მცირდება. ამიტომ, ცხადია, რომ სადინარის კედლების დაყოფა ჰიდრავლიკურად გლუვ და ჰიდრავლიკურად ხორკლიან კედლებად პირობითია: ერთი და იგივე კედელი, რომელიც რეინოლდსის რიცხვის რაიმე Re_1 მნიშვნელობისათვის ჰიდრავლიკურად გლუვია, რეინოლდსის რიცხვის სხვა $\mathrm{Re}_2 > \mathrm{Re}$ მნიშვნელობისათვის შეიძლება ჰიდრავლიკურად ხორკლიანი აღმოჩნდეს.

§ 6.8. გასაშუალოებულ სიჩქარეთა განაწილება მილსადენის ცოცხალ კვეთში სითხის ტურბულენტური მოძრაობისას

ჯერ განვიხილოთ სიჩქარეთა განაწილების საკითხი ლამინარულ ქვეშრეში.

ტურბულენტობის ნახევრად ემპირიულ თეორიაში უშვებენ, რომ ბლანტი (ლამინარული) ქვეშრის ფარგლებში სიბლანტით განპირობებული მხები ძაბვა $\tau_0 = const$. ასეთი დაშვების საფუძველზე შეიძლება დავწეროთ:

$$\tau_0 = \mu \frac{d\bar{u}_x}{dy} = \rho\nu \frac{d\bar{u}_x}{dy},$$

საიდანაც

$$d\bar{u}_x = \frac{\tau_{0x}}{\rho} \frac{dy}{\upsilon} = u_*^2 \frac{dy}{\upsilon}.$$

ინტეგრირებით მივიღებთ:

$$\bar{u}_x = u_*^2 \frac{y}{\nu} + C ,$$

სადაც y არის განსახილველი წერტილიდან მილსადენის კედლამდე მანძილი.

თვლიან, რომ **მილსადენის კედელთან** $(y = 0)$ **სიჩქარე** $\bar{u}$ **და, მაშასადამე, მისი გრძივი შემდგენიც** (u'_x) ნულის ტოლია, ამიტომ, $C = 0$-ს და

$$\bar{u}_x = u_*^2 \frac{y}{\nu} . \tag{6.48}$$

ლამინარული ქვეშრის საზღვარზე $(y = \delta)$

$$\bar{u}_{\text{აფსკ}} = \bar{u}_{\text{ლ.შ.}} = u_*^2 \frac{\delta}{\nu} .$$

ახლა განვიხილოთ სიჩქარეთა განაწილების საკითხი ტურბულენტურ ბირთვში განვითარებული ტურბულენტობისას, როცა სიბლანტით გამოწვეული მხები ძაბვა შეიძლება უგულებელვყოთ. როგორც ვნახეთ, ასეთ შემთხვევაში (წინაღობის კვადრატული ზონისათვის) მხები ძაბვა გამოითვლება (6.49) ფორმულით:

$$\tau = \rho \ell^2 \left(\frac{d\bar{u}_x}{dy} \right)^2 . \tag{6.49}$$

ამ გამოსახულებიდან

$$d\bar{u}_x = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \frac{1}{\ell} dy . \tag{6.49′}$$

პირობით მივიღოთ ლ. პრანდტლის დაშვება, რომ მხები ძაბვები ტურბულენტური ბირთვის ზონაში შეიძლება შეიცვალოს მუდმივი მხები τ_0 ძაბვით[1] მილსადენის კედელზე, ხოლო სითხის ნაწილაკების განივი შერევის ℓ მანძილსა და განსახილველი წერტილიდან მილსადენის კედლამდე y მანძილს შორის არსებობს წრფივი დამოკიდებულება

$$\ell = \chi y , \tag{6.50}$$

სადაც χ არის ე.წ. **პრანდტლის უნივერსალური მუდმივა** და ი. ნიკურაძის ცდების თანახმად, დაახლოებით 0,40-ის ტოლია[2].

---

[1] ასეთი დაშვება ემყარება იმას, რომ, როგორც ქვემოთ ვნახავთ, სიჩქარის გრადიენტი ტურბულენტურ ბირთვში უმნიშვნელოა.

[2] შემდგომმა გამოკვლევებმა უჩვენა, რომ æ დამოკიდებულია რეინოლსის რიცხვზე 0,36...0,435 ფარგლებში.

აღნიშნულის გათვალისწინებით, (6.49) გამოსახულება ასე ჩაიწერება:

$$d\bar{u}_x = \frac{1}{\chi}\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}\frac{dy}{y} = \frac{u_*}{æ}\frac{dy}{y}.$$

ამ განტოლების ინტეგრირებით მივიღებთ:

$$\bar{u}_x = \frac{u_*}{\chi}\ln y + C. \tag{6.51}$$

მილსადენის ღერძზე $(y = r_0)$ სიჩქარე მაქსიმალურია, $\bar{u}_x = \bar{u}_{მაქს}$ ამიტომ $C = \bar{u}_{მაქს} - \frac{u_*}{\chi}\ln r_0$. შევიტანოთ ეს მნიშვნელობა (4.58) გამოსახულებაში, მივიღებთ:

$$\bar{u}_x = \bar{u}_{მაქს} - \frac{u_*}{\chi}\ln\frac{r_0}{y}. \tag{6.52}$$

თუ დავუშვებთ, $\chi = 0{,}40$ და გადავალთ ნატურალურიდან ათობით ლოგარითმზე, მაშინ ადგილობრივი გასაშუალოებული სიჩქარის გრძივი შემდგენის განსაზღვრისათვის ტურბულენტური ბირთვის ნებისმიერ წერტილში მივიღებთ შემდეგ ფორმულას:

$$\bar{u}_x = \bar{u}_{მაქს} - 5{,}75u_*\lg\frac{r_0}{y}. \tag{6.53}$$

ამ განტოლებით სიჩქარეთა ეპიურის ასაგებად მხედველობაში უნდა ვიქონიოთ, რომ $\delta \le y \le r_0$. ლამინარულ ქვეშრეში სიჩქარეთა განაწილების დასადგენად ვისარგებლებთ (6.48) გამოსახულებით. 6.11 ნახაზზე გამოსახულია მოძრაობის ტურბულენტური რეჟიმისათვის დამახასიათებელი სიჩქარის ეპიურა მილსადენის ცოცხალ კვეთში, რომელშიც ადგილობრივი გასაშუალებული სიჩქარის ცვლილება ემორჩილება (6.53) განტოლებით მოცემულ ლოგარითმულ კანონს. ტურბულენტურ ნაკადში სითხის ნაწილაკების ინტენსიური ურთიერთშერევის გამო სიჩქარეთა ეპიურა მნიშვნელოვნადაა გათანაბრებული ლამინარული რეჟიმის შესაბამის სიჩქარეთა ეპიურასთან შედარებით.

(6.53) გამოსახულება ასეთი სახით ჩავწეროთ:

$$\frac{\bar{u}_{მაქს} - \bar{u}_x}{u_*} = 5{,}75\lg\frac{r_0}{y}. \tag{6.53'}$$

მიღებული ტოლობის მარცხენა ნაწილს D_u ასოთი აღინიშნავენ:

$$D_u = \frac{\overline{u}_{მაქს} - \overline{u}_x}{u_*} \tag{6.54}$$

და მას **ადგილობრივი სიჩქარის ფარდობით დეფიციტს** უწოდებენ. ფიზიკური არსით D_u არის ადგილობრივი სიჩქარის[1] დანაკლისი მაქსიმალურ სიჩქარემდე $(\overline{u}_{მაქს} - \overline{u}_x)$, რომელიც მოცემულია ფარდობითი (უგანზომილებო) ფორმით - $(\overline{u}_{მაქს} - \overline{u}_x)/u_*$.

ადგილობრივი სიჩქარის ფარდობითი დეფიციტის ანალოგიურად შეიძლება გამოვთვალოთ **საშუალო სიჩქარის ფარდობითი დეფიციტიც.** ლ. პრანდტლის, თ. კარმანის, თ. შეველევის გამოკვლევებით

$$D_v = \frac{\overline{u}_{მაქს} - v}{u_*} \cong 3{,}75 . \tag{6.55}$$

აქედან

$$\overline{u}_{მაქს} = v + 3{,}75u_* . \tag{6.56}$$

(6.53) და (6.56) **ფორმულების საფუძველზე განისაზღვრება მოძრაობის ადგილობრივი სიჩქარე ტურბულენტური ბირთვის ნებისმიერ წერტილში.**

(6.18) გამოსახულებიდან განვსაზღვროთ u_* დინამიკური სიჩქარე

$$u_* = \frac{v\sqrt{\lambda}}{\sqrt{8}}$$

და ჩავსვათ (6.56) გამოსახულებაში, მივიღებთ:

$$\overline{u}_{მაქს} = v(1 + 1{,}33\sqrt{\lambda}) \tag{6.57}$$

ანუ

$$v = \overline{u}_{მაქს} \frac{1}{1 + 1{,}33\sqrt{\lambda}} . \tag{6.58}$$

თუ დავუშვებთ, რომ პრაქტიკაში სიგრძეზე წინაღობის λ კოეფიციენტის მნიშვნელობები იცვლება 0,013...0,05 ფარგლებში, მაშინ (6.58) დამოკიდებულებიდან გვექნება:

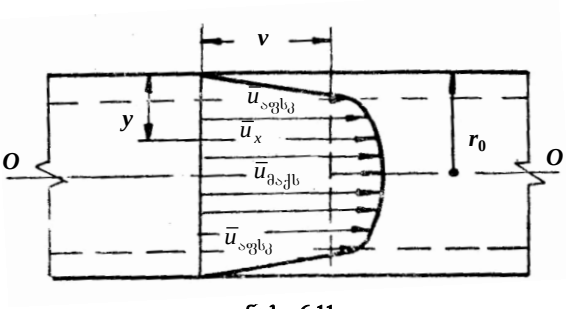
$$v = (0{,}75 \ldots 0{,}90)\overline{u}_{მაქს} . \tag{6.59}$$

(გავიხსენოთ, რომ ლამინარული რეჟიმიდან $v = 0{,}5\overline{u}_{მაქს}$). ა.ალტშულის გამოკვლევების თანახმად, მანძილი მილსადენის

[1] იგულისხმება ადგილობრივი გასაშუალოებული სიჩქარის გრძივი შემდგენი $(\overline{u}_x)$.

კედლიდან იმ შრემდე, სადაც ადგილობრივი გასაშუალებული სიჩქარე ტურბულენტური ნაკადის საშუალო სიჩქარის ტოლია ($\overline{u}_x = v$) განისაზღვრება ფორმულით:

$$y \cong 0{,}223 r_0 . \tag{6.60}$$



ნახ. 6.11

კინეტიკური ენერგიის კოეფიციენტი (კორიოლისის კოეფიციენტი) ტურბულენტური ნაკადისათვის შეიძლება გამოვთვალოთ ა. ალტშულის ფორმულით:

$$\alpha = 1 + 2{,}65\lambda . \tag{6.61}$$

λ-ს მოყვანილი მნიშვნელობისათვის ($\lambda = 0{,}013\ldots0{,}05$) α კოეფიციენტი იცვლება 1,03...1,13 ფარგლებში. ამიტომ, პრაქტიკისათვის საკმარისი სიზუსტით ხშირად α-ს 1,1-ის ტოლად ღებულობენ.

დასასრულ, შევნიშნავთ, რომ გ. ჟელეზნიაკოვის გამოკვლევების თანახმად, მდინარეებისათვის χ სიდიდე დაახლოებით 0,54-ის ტოლია. მისივე გამოკვლევებით ბარის მდინარეებისათვის საშუალო სიჩქარის დეფიციტი D_v ცვლადი სიდიდეა და გამოითვლება ფორმულით:

$$D_v = 1/\chi + C/C_0 , \tag{6.62}$$

სადაც C არის შეზის კოეფიციენტი; $C_0 = 0{,}1$ მ$^{0.5}$/წმ.

§ 6.9. დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგის განსაზღვრა თანაბარი ტურბულენტური მოძრაობისას. ი. ნიკურაძის გრაფიკი

ზემოთ აღვნიშნეთ (§§ 6.2, 6.3), რომ მოძრაობის როგორც ლამინარული, ისე ტურბულენტური რეჟიმისათვის დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგის ძირითად გამოსათვლელ ფორმულას

წრიული კვეთის სადაწნეო ცილინდრული მილსადენისათვის წარმოადგენს დარსი-ვერსბახის ფორმულა (6.16), ხოლო ღია კალაპოტებისათვის – შეზის ფორმულა (6.12).

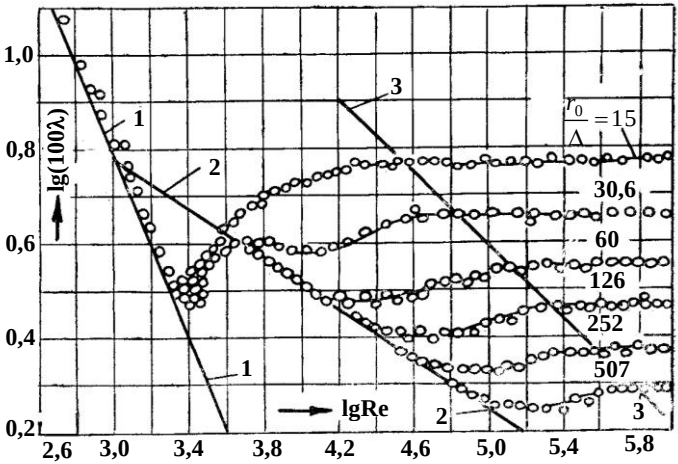
ამ ფორმულების გამოსაყენებლად საჭიროა ვიცოდეთ λ და c კოეფიციენტების მნიშვნელობები.

დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგის განსაზღვრა სადაწნეო მილსადენებში. მრავალრიცხოვანმა ექსპერიმენტმა ცხადყო, რომ წინაღობის λ კოეფიციენტების (დარსის კოეფიციენტის) მნიშვნელობა დამოკიდებულია რეინოლდსის რიცხვსა და მილსადენის ფარდობით ხორკლიანობაზე, ე.ი. $\lambda = f\left(\mathrm{Re}, \frac{\Delta}{r_0}\right)$. მაგრამ ეს ფუნქციური დამოკიდებულება სითხის ნაკადის მოძრაობის პირობებში რაოდენობრივად და თვისებრივად სხვადასხვა ხასიათისაა. λ კოეფიციენტის ცვლილების კანონზომიერების დასადგენად დიდი თეორიული და პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს ი. ნიკურაძის მიერ ჩატარებულ კვლევებს, რომლის შედეგებიც გრაფიკის სახით მოცემულია 6.12 ნახაზზე. ექსპერიმენტები ჩატარებულ იქნა ხელოვნური თანაბარმარცვლოვანი ხორკლიანობის მილებში; ასეთი ხორკლიანობა იქმნებოდა გარკვეული ზომის ერთნაირი სისხოს ქვიშის მარცვლების დაწებებით მილის შიგა ზედაპირზე. აბსცისთა ღერძზე გადაზომილია $\lg \mathrm{Re}$-ის, ხოლო ორდინატთა ღერძზე $\lg(100\lambda)$-ს მნიშვნელობები ($0 < \lambda < 1$, ამიტომ $\lg\lambda < 0$. $\lg\lambda$-ს უარყოფით მნიშვნელობათა თავიდან აცილების მიზნით ორდინატთა ღერძზე გადაზომილია $\lg(100\lambda)$). გრაფიკის ანალიზიდან ჩანს, რომ სადაწნეო მილსადენში სითხის მოძრაობისას შეიძლება გამოვყოთ შემდეგი ზონები:

პირველი ზონა, რომელსაც 1-1 წრფე შეესაბამება, **მიეკუთვნება სითხის მოძრაობის ლამინარულ რეჟიმს** ($\mathrm{Re} < 2320$ ანუ $\lg \mathrm{Re} < 3{,}36$). ამ ზონაში, კედლების ხორკლიანობის სხვადასხვაობის მიუხედავად, ყველა ექსპერიმენტული წერტილი 1-1 წრფეზე დალაგდა. მაშასადამე, აქ λ კოეფიციენტი დამოკიდებულია მხოლოდ რეინოლდსის რიცხვზე და არ არის დამოკიდებული კედლის ხორკლიანობაზე – $\lambda = f(\mathrm{Re})$. დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგი სითხის დინების საშუალო სიჩქარის პირველი ხარისხის პროპორციულია.

მეორე ზონა მოთავსებულია 1-1 და 2-2 წრფეებს შორის და **შეესაბამება ნაკადის მოძრაობის ლამინარული რეჟიმიდან ტურბულენტურში გადასვლას** ($3{,}36 < \lg \mathrm{Re} < 3{,}5$). ამ ზონაშიც λ კოე-

ფიციენტი დამოკიდებულია მხოლოდ რეინოლდსის რიცხვზე – $\lambda = f(\mathrm{Re})$. რეჟიმების შეცვლის პროცესი ვითარდება ნაკადის ბირთვში და მილსადენის ხორკლიანობა გავლენას ვერ ახდენს წინაღობის კანონზე; მილის ხორკლები დაფარულია ლამინარული აფსკით ($\delta > \Delta$).



ნახ. 6.12

მესამე ზონა, რომელსაც 2-2 წრფე შეესაბამება, **მიეკუთვნება სითხის მოძრაობის ტურბულენტურ** რეჟიმს; ეს არის **ჰიდრავლიკურად გლუვკედლიანი მილსადენების ზონა**. აქაც მილის ხორკლები დაფარულია ლამინარული აფსკით ($\delta > \Delta$). λ კოეფიციენტი დამოკიდებულია მხოლოდ რეინოლდსის რიცხვზე და არ არის დამოკიდებული ფარდობით ხორკლიანობაზე; დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგი სითხის დინების საშუალო სიჩქარის 1,75 ხარისხის პროპორციულია.

მეოთხე ზონა მოთავსებულია 2-2 და 3-3 წრფეებს შორის და მას **გარდამავალი წინაღობის ზონას** უწოდებენ. ამ ზონაში ხორკლების სიმაღლე (Δ) და ლამინარული აფსკის სისქე (δ) ერთი რიგისაა; მილსადენის ხორკლიანობა გარკვეულ გავლენას ახდენს დაწნევის დანაკარგის და, მაშასადამე, λ კოეფიციენტის სიდიდეზე. წინაღობის გარდამავალ ზონაში λ კოეფიციენტი დამოკიდებულია როგორც რეინოლდსის რიცხვზე, ისე ფარდობით ხორკლიანობაზე $\lambda = f\left(\mathrm{Re}, \frac{\Delta}{r_0}\right)$. დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგი

სითხის დინების 1,75-დან 2-მდე საშუალო სიჩქარის ხარისხის პროპორციულია.

მეხუთე ზონა მოთავსებულია 3-3 წრფის მარჯვნივ და შეესაბამება სითხის მოძრაობის ტურბულენტურ რეჟიმს, როცა დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგი საშუალო სიჩქარის კვადრატის პროპორციულია. **ამ ზონას ჰიდრავლიკურად ხორკლიანი მილსადენების ან კვადრატული წინაღობის ზონას** უწოდებენ. აქ $\delta \ll \Delta$, λ კოეფიციენტი დამოკიდებულია ფარდობით ხორკლიანობაზე და პრაქტიკულად არ არის დამოკიდებული რეინოლდსის რიცხვზე $\lambda = f\left(\frac{\Delta}{r_0}\right)$; 3-3 წრფის მარჯვნივ მრუდები $\lg \mathrm{Re}$ აბსცისთა ღერძის პარალელურია. მაშასადამე, მეოთხე ზონა შეიძლება განხილულ იქნეს, როგორც გარდამავალი ზონა ჰიდრავლიკურად გლუვი მილსადენების ზონიდან ჰიდრავლიკურად ხორკლიანი მილსადენების ზონაზე.

განვიხილოთ λ კოეფიციენტის საანგარიშო ფორმულები და მათი გამოყენების საზღვრები მოძრაობის ტურბულენტური რეჟიმისათვის:

1. **წინაღობის გლუვი მილსადენების ზონა** ი. იდელჩიკის მონაცემებით განისაზღვრება რეინოლდსის რიცხვის ცვალებადობის შემდეგი შუალედით:

$$2320 \le \mathrm{Re} \le 46\frac{r_0}{\Delta}. \qquad (6.63)$$

თუ რეინოლდსის რიცხვი $\mathrm{Re} < 10^5$, მაშინ λ კოეფიციენტის მნიშვნელობათა გამოსათვლელად სარგებლობენ ბლაზიუსის ცნობილი ფორმულით:

$$\lambda = 0{,}3164/\mathrm{Re}^{0{,}25}. \qquad (6.64)$$

თუ გავიხსენოთ, რომ $\mathrm{Re} = vd/\upsilon$ და (6.16) გამოსახულებაში შევიტანთ λ-ს მნიშვნელობას (4.71) ფორმულიდან, დავრწმუნდებით, რომ წინაღობის ჰიდრავლიკურად გლუვი მილსადენების ზონაში დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგი ($h_{\text{სიგ}}$) სითხის დინების საშუალო სიჩქარის 1,75 ხარისხის პროპორციულია

$$h_{\text{სიგ}} = \lambda\frac{\ell}{d}\frac{v^2}{2g} = \frac{0{,}3164\nu^{0{,}25}}{v^{0{,}25}d^{0{,}25}}\frac{\ell}{d}\frac{v^2}{2g} = bv^{1{,}75}.$$

როდესაც რეინოლდსის რიცხვი $\mathrm{Re} > 10^5$, მაშინ (6.64) ფორმულა აღარ იძლევა ისეთსავე ზუსტ მნიშვნელობებს და წინაღობის λ კოეფიციენტის განსაზღვრა მიზანშეწონილია პ. კონაკოვის ფორმულით:

$$\lambda = 1/(1{,}8\lg \mathrm{Re} - 1{,}5)^2 . \qquad (6.65)$$

(6.64) და (6.65) ფორმულებიდან ჩანს, რომ წინაღობის გლუვი მილსადენების ზონაში λ კოეფიციენტი დამოკიდებულია მხოლოდ რეინოლდსის რიცხვზე $\lambda = f(\mathrm{Re})$.

2. **წინაღობის გარდამავალი ზონა** განისაზღვრება რეინოლდსის რიცხვის ცვალებადობის შუალედით:

$$46\frac{r_0}{\Delta} < \mathrm{Re} \le 1120\frac{r_0}{\Delta} . \qquad (6.66)$$

ამ ზონისათვის λ კოეფიციენტის მნიშვნელობათა გამოსათვლელად შეიძლება ვისარგებლოთ ნ. ფრენკელის ფორმულით:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg\left[0{,}14\frac{\Delta}{r_0} + \left(\frac{6{,}81}{\mathrm{Re}}\right)^{0{,}9}\right] . \qquad (6.67)$$

ამ ფორმულიდან ჩანს, რომ წინაღობის გარდამავალ ზონაში λ კოეფიციენტი დამოკიდებულია როგორც რეინოლდსის რიცხვზე, ისე ფარდობით ხორკლიანობაზე $\lambda = f\left(\mathrm{Re}, \frac{\Delta}{r_0}\right)$. დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგი სითხის დინების საშუალო სიჩქარის 1,75-დან 2-მდე ხარისხის პროპორციულია.

3. **კვადრატული წინაღობის ზონა** განისაზღვრება რეინოლდსის რიცხვის ცვალებადობის შუალედით

$$\mathrm{Re} > 1120\frac{r_0}{\Delta} . \qquad (6.68)$$

ამ ზონისათვის λ კოეფიციენტის გამოსათვლელად სარგებლობენ ი. ნიკურაძის ცნობილი ფორმულით:

$$\lambda = 1\Big/\left(2\lg\frac{r_0}{\Delta} + 1{,}74\right)^2 . \qquad (6.69)$$

როგორც (6.69) გამოსახულებიდან ჩანს, წინაღობის კვადრატულ ზონაში λ კოეფიციენტი დამოკიდებულია მხოლოდ მილსადენის ფარდობით ხორკლიანობაზე $\lambda = f\left(\mathrm{Re}, \frac{\Delta}{r_0}\right)$. რეინოლდსის რიცხვი ამ ფორმულაში არ შედის, რის გამო დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგი ამ ზონაში სითხის დინების საშუალო სიჩქარის კვადრატის პროპორციულია.

შევნიშნავთ, რომ ზემოთ მოყვანილ გამოსახულებებში აბსოლუტური ხორკლიანობის (Δ) მნიშვნელობები სხვადასხვა მასა-

ლისაგან დამზადებული და სხვადასხვა პირობებში მყოფი მილსადენებისათვის მოცემულია სპეციალურ ლიტერატურაში.

ამგვარად, გვაქვს რა λ კოეფიციენტის საანგარიშო ფორმულები და ვიცით რა მათი გამოყენების საზღვრები, (6.16) გამოსახულებით შეგვიძლია გამოვთვალოთ დაწნევის სიგრძის დანაკარგები წინაღობის თითოეული ზონისათვის.

უახლესმა გამოკვლევებმა გვიჩვენა, რომ λ კოეფიციენტის განსაზღვრისას თანაბარმარცვლოვანი აბსოლუტური ხორკლიანობის ცნების გამოყენება იწვევს გარკვეულ უზუსტობას. ამიტომ, პრაქტიკაში მკვიდრდება ე.წ. **ეკვივალენტური თანაბარმარცვლოვანი აბსოლუტური ხორკლიანობის ცნება** (§ 6.7). ტექნიკური მილსადენების ეკვივალენტური ხორკლიანობის ($\Delta_{ეკვ}$) მიხედვით λ კოეფიციენტის მნიშვნელობათა გამოსათვლელად შეიძლება ვისარგებლოთ ა. ალტშულის მაჩვენებლიანი ფორმულით, რომელიც მართებულია ჰიდრავლიკური წინაღობის ყველა ზონისათვის:

$$\lambda = 0{,}11\left(\frac{\Delta_{ეკვ}}{d} + \frac{68}{\mathrm{Re}}\right)^{0{,}25}. \qquad (6.70)$$

სხვადასხვა მასალის მილსადენების ეკვივალენტური აბსოლუტური ხორკლიანობის მნიშვნელობები აიღება სპეციალური ცხრილებიდან და ცნობარებიდან.

დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგის განსაზღვრა ღია კალაპოტებში

ჰიდროტექნიკურ პრაქტიკაში დიდი მნიშვნელობა აქვს დაწნევის დანაკარგების განსაზღვრას ღია კალაპოტებში (უდაწნეო მილსადენებში, არხებსა და მდინარეებში). ამიტომ დაისვა საკითხი, შეიძლება თუ არა სადაწნეო მილსადენებისათვის მიღებული საანგარიშო ფორმულები გავავრცელოთ ღია კალაპოტებზე.

ამ მიზნით ა. ზეგჟდას მიერ სწორკუთხა კვეთის თავისუფალ ნაკადებზე სხვადასხვა თანაბარმარცვლოვანი ხორკლიანობისათვის ჩატარებულ იქნა ექსპერიმენტები, რომელთა ანალიზის საფუძველზე კვადრატული წინაღობის ზონისათვის მიიღო დამოკიდებულება:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2\lg\frac{R}{\Delta} + 2{,}125, \qquad (6.71)$$

სადაც R არის კალაპოტის ჰიდრავლიკური რადიუსი.

ეს ფორმულა მილსადენების საანგარიშო ფორმულებთან სრულ სტრუქტურულ შესაბამისობაშია, რაც სადაწნეო მილსადე-

ნებსა და ღია კალაპოტებში მიმდინარე დინამიკური პროცესების ერთიანობაზე მეტყველებს.

იმის გამო, რომ პრაქტიკაში ღია კალაპოტების რეალური ხორკლიანობა მნიშვნელოვნად განსხვავდება იდეალიზებული თანაბარმარცვლოვანი ხორკლიანობისაგან, ამიტომ ღია კალაპოტებში დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგის განსაზღვრისას სარგებლობენ არა (6.71) ფორმულებით, არამედ შეზის ფორმულით, რითაც C კოეფიციენტის მნიშვნელობებს გამოთვლიან, ხშირ შემთხვევაში, ნაკადის გამარტივებულ სტრუქტურულ სქემაზე დამყარებული ემპირიული და ნახევრად ემპირიული დამოკიდებულებებით.

გავითვალისწინოთ, რომ შეზის ფორმულაში $I = \frac{h_{\text{სიგ}}}{\ell}$ არის ნაკადის ერთეულ სიგრძეზე დაწნევის დანაკარგი (ჰიდრავლიკური ქანობი, რომელიც განსახილველი თანაბარი მოძრაობისათვის პიეზომეტრული ქანობის ტოლია). მაშინ შეზის ფორმულიდან (6.12) მივიღებთ ღია კალაპოტში დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგის საანგარიშო ფორმულას:

$$h_{\text{სიგ}} = \frac{v^2 \ell}{C^2 R} \tag{6.11}$$

(აღნიშვნები ჩვენთვის ცნობილია).

შევნიშნავთ, რომ სითხის ნაკადის მოძრაობა ღია კალაპოტებში პრაქტიკულად წინაღობის კვადრატულ ზონას შეესაბამება, ამიტომ **ქვემოთ მოგვყავს C კოეფიციენტის (შეზის კოეფიციენტის) საანგარიშო ფორმულები წინაღობის კვადრატული ზონისათვის.**

1. ნ. პავლოვსკის ფორმულა

$$C = \frac{1}{n} R^y, \tag{6.72}$$

სადაც n არის კალაპოტის ხორკლიანობის კოეფიციენტი;

y –ხარისხის მაჩვენებელი, რომელიც გამოითვლება შემდეგი ემპირიული გამოსახულებით:

$$y = 2{,}5\sqrt{n} - 0{,}13 - 0{,}75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0{,}10). \tag{6.73}$$

თვით ნ. პავლოვსკის რეკომენდაციით, პრაქტიკული გამოთვლებისას გამოიყენება შეიძლება შემდეგი გამარტივებული გამოსახულება:

$$\begin{aligned} y &\approx 1{,}5\sqrt{n}, \text{ თუ } 0{,}1 < R < 1 \text{მ}; \\ y &\approx 1{,}3\sqrt{n}, \text{ თუ } 1 < R < 3 \text{მ}. \end{aligned} \tag{6.74}$$

სტუ-ის ჰიდრავლიკის კათედრის მიერ რეკომენდებულია ხარისხის მაჩვენებლის საანგარიშო ფორმულა:

$$y = \frac{2+R}{1+R}\sqrt{n}\,. \qquad (6.74')$$

ნ. პავლოვსკის ფორმულა შეიძლება გამოვიყენოთ სადაწნეო მილსადენისთვისაც, თუ ვისარგებლებთ (6.14) გამოსახულებით[1]

$$C = \sqrt{8g/\lambda}\,, \qquad (6.14)$$

საიდანაც

$$\lambda = 8g/c^2\,. \qquad (6.14')$$

2. ი. აგროსკინის ფორმულა:

$$C = \frac{1}{n} + 17{,}72\lg R\,. \qquad (6.75)$$

3. ლიტერატურაში ხშირად ვხვდებით ნ. პავლოვსკის ფორმულის კერძო შემთხვევებს, როდესაც $y = 1/6$ და $y = 1/5$:

$$C = \frac{1}{n}R^{\frac{1}{6}}; \qquad (6.76)$$

$$C = \frac{1}{n}R^{\frac{1}{5}}. \qquad (6.77)$$

მათგან პირველს მანინგის ფორმულას უწოდებენ და ძირითადად გამოიყენება მილსადენების ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას, ხოლო მეორეს – ფორხჰეიმერის ფორმულას, რომლითაც სარგებლობენ ღია კალაპოტების გაანგარიშებისას.

ზემოთ მოყვანილ გამოსახულებებში n ხორკლიანობის კოეფიციენტის მნიშვნელობები აიღება სპეციალური ცხრილებიდან [29, 49, 53, 56].

სსრ კავშირში ღია კალაპოტების ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას განსაკუთრებული გავრცელება პოვა ნ. პავლოვსკის ფორმულამ.

ამგვარად, თუ გვეცოდინება შეზის კოეფიციენტის მნიშვნელობა, შევძლებთ (6.11) ფორმულით გამოვთვალოთ ღია კალაპოტში დაწნევის სიგრძის დანაკარგი.

---

[1] (6.14) გამოსახულება ყოველთვის არ იძლევა იმის საშუალებას, რომ მილსადენისათვის განსაზღვრული λ-ს მნიშვნელობები ავტომატურად გამოვიყენოთ არხებისათვის C კოეფიციენტის გამოსათვლელად.

§ 6.10. ადგილობრივი წინაღობები. დაწნევის ადგილობრივი დანაკარგების განსაზღვრა ტურბულენტური მოძრაობისას

რეალური სითხის მოძრაობისას სადაწნეო მილსადენებსა და ღია კალაპოტებში, როგორც ეს 6.1 პარაგრაფში იყო აღნიშნული, ნაკადის სიგრძეზე დაწნევის დანაკარგთან ერთად შეიძლება ადგილი ჰქონდეს **დაწნევის ადგილობრივ დანაკარგსაც.** სადაწნეო მილსადენებში ამის მიზეზია სხვადასხვა სახის **ადგილობრივი ჰიდრავლიკური წინაღობა** – ნაკადის მკვეთრი გაფართოება ან შევიწროება, მოხვეულობა, დიაფრაგმა, საკეტი, განშტოება და სხვა, ხოლო ღია კალაპოტებში – გადასასვლელი უბანი და მოხვეულობა, არხის ცოცხალი კვეთის შემავიწროებელი რეგულატორი, სხვადასხვა კონსტრუქციის ზღურბლი, ბურჯი, წყალმიმღების გისოსი, ნაკადების შეერთების ან გაყოფის უბანი და ა.შ. ადგილობრივ წინაღობათა ფარგლებში ნაკადის მოძრაობა იძენს მკვეთრად ცვლად ხასიათს, იცვლება მოძრაობის სიჩქარის სიდიდე და მიმართულება, რის შედეგადაც წარმოიქმნება გრიგალური ზონები. სიგრძეზე ჰიდრავლიკური წინაღობისაგან განსხვავებით, რომელიც მუდავნდება თანაბრად ან დაახლოებით თანაბრად ნაკადის მთელ სიგრძეზე, ადგილობრივი წინაღობა თავს იჩენს მოკლე უბანზე, ნაკადის კონფიგურაციის მკვეთრი ცვლილების ადგილებში.

ადგილობრივ ჰიდრავლიკურ წინაღობათა სახესხვაობა მრავალგვარია, მაგრამ მათ ყველას აერთიანებს ერთი საერთო ნიშანი: ნებისმიერი ადგილობრივი წინაღობის დაძლევისას ნაკადი განიცდის დეფორმაციას. დეფორმაციის შედეგად მნიშვნელოვნად იზრდება ხახუნის სიდიდე ან, სხვანაირად რომ ვთქვათ, იზრდება სიჩქარის გრადიენტი, რაც განაპირობებს დაწნევის ადგილობრივ დანაკარგს ადგილობრივ ჰიდრავლიკურ წინაღობათა ფარგლებში.

თუ მილსადენის სიგრძე მნიშვნელოვანია, ხოლო ადგილობრივი წინაღობები ბევრი არ არის, მაშინ დაწნევის ადგილობრივი დანადგარები მხედველობაში არ მიიღება, მაგრამ დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგს ზრდიან 10–15%-ით. თუ მილსადენის სიგრძე მოკლეა, ხოლო ადგილობრივი წინაღობები მნიშვნელოვანი რაოდენობითაა, მაშინ დაწნევის ადგილობრივი დანაკარგების სიდიდის ზუსტად გამოთვლა, ცხადია, აუცილებელია.

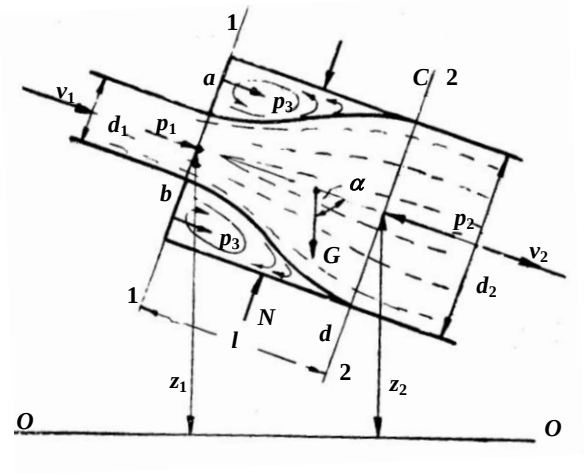
დაწნევის ადგილობრივი დანაკარგი, მოძრაობის ტურბულენტური რეჟიმისას, განისაზღვრება ვეისბახის ცნობილი ფორმულით:

$$h_{\text{ადგ}} = \xi \frac{v^2}{2g}, \qquad (6.78)$$

სადაც ξ არის ადგილობრივი წინაღობის (ან ადგილობრივი დანაკარგის) უგანზომილებო კოეფიციენტი, რომელიც გვიჩვენებს, თუ სიჩქარით დაწნევის რა წილი (რა რაოდენობა) იხარჯება ამა თუ იმ ადგილობრივი ჰიდრავლიკური წინაღობის დაძლევაზე (გადალახვაზე); v – ნაკადის მოძრაობის საშუალო სიჩქარე ადგილობრივი წინაღობის წინ ან მის შემდეგ, როგორც წესი, ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას განიხილება ადგილობრივი წინაღობის შემდეგ არსებული საშუალო სიჩქარე.

თეორიული გზით ξ კოეფიციენტის მნიშვნელობები შეიძლება განისაზღვროს რამდენიმე სახის ადგილობრივი წინაღობისათვის, რომელთაგან ჩვენში განსაკუთრებულ ინტერესს იწვევს ნაკადის უეცარი გაფართოების შემთხვევა. ყველა სხვა სახის ადგილობრივი წინაღობისათვის ξ სიდიდეს ადგენენ ექსპერიმენტული გზით.

განვიხილოთ **დაწნევის ადგილობრივი დანაკარგის საკითხი მილსადენის უეცარი გაფართოებისას** წინაღობის კვადრატული ზონისათვის. სითხის ნაკადი d_1 მცირე დიამეტრისა და ω_1 ცოცხალი კვეთის ფართობის მქონე მილიდან შედის $d_2 > d_1$ დიამეტრისა და $\omega_2 > \omega_1$ ცოცხალი კვეთის ფართობის მილში, თანდათანობით ფართოვდება და 1-1 კვეთიდან ℓ მანძილით დაცილებულ 2-2 კვეთში მთლიანად ავსებს მას (ნახ. 6.13). უეცარი გაფართოების 1-1 კვეთში სითხე წყდება მილის კედლებს და ფართო



ნახ. 6.13

კვეთის მილის საწყის უბანზე (ℓ) მოძრაობს თავისუფალი, მდოვრედ განშლადი ჭავლის სახით, რომელიც ac და bd დენის წირებით არის შემოფარგლული. მდოვრედ განშლადი ჭავლის (ძირითადი ნაკადის) შემომფარგვლელ ზედაპირსა და ფართო მილის კედლებს შორის იქმნება რგოლური სივრცე, რომელშიც ხდება სითხის რთული ცირკულაცია მასათა ცვლით; სითხის ნაწილაკები ძირითადი ნაკადიდან შემოდის ამ სივრცეში, ასრულებს რთულ მარყუჟისებრ მოძრაობას და კვლავ შედის ძირითად ნაკადში. ამ პროცესის შენარჩუნებაზე იხარჯება უმთავრესად ძირითადი ნაკადის ენერგია (დაწნევა).

1-1 და 2-2 კვეთს შორის მოთავსებული ნაკვეთურისათვის გამოვიყენოთ მექანიკის ცნობილი თეორემა მოძრაობის რაოდენობის ცვლილების შესახებ, რომლის თანახმადაც ეს ცვლილება მოქმედი გარე ძალების იმპულსების ჯამის ტოლია.

როგორც ზემოთ ვნახეთ (§ 5.16), ცოცხალ კვეთში დროის ერთეულში გამავალი სითხის მასის მოძრაობის რაოდენობის გამოსათვლელ ფორმულას აქვს ასეთი სახე:

$$(\text{მ.რ})_u = \alpha'\rho\omega v^2 . \qquad (6.58)$$

მაშინ 1-1 და 2-2 კვეთებს შორის მოძრაობის რაოდენობის ცვლილება იქნება:

$$\Delta(\text{მ.რ})_u = \alpha'_2\rho\omega_2 v_2^2 - \alpha'_1\rho\omega_1 v_1^2 . \qquad (6.79)$$

სითხის გამოყოფილ ნაკვეთურზე მოქმედი ძალებია:

1. ნაკვეთურში მოთავსებული სითხის სიმძიმის ძალა $G = \gamma\omega_2\ell$, რომლის გეგმილიც მოძრაობის მიმართულებაზე (მილის ღერძზე) ტოლია:

$$G\sin\alpha = \gamma\omega_2\ell\sin\alpha .$$

მაგრამ $\ell\sin\alpha = z_1 - z_2$ (ნახ. 6.13), სადაც z_1 და z_2 არის შესაბამისად ω_1 და ω_2 კვეთების სიმძიმის ცენტრების კოორდინატები. ამიტომ

$$G\sin\alpha = \gamma\omega_2(z_1 - z_2) .$$

2. 1-1 და 2-2 კვეთებში მოქმედი ჰიდროდინამიკური წნევის P_1 და P_2 ძალები (იხ. § 6.2)

$$P_1 = p_1\omega_1 ; \;\; P_2 = p_2\omega_1 .$$

3. ნაკვეთურის გვერდით ზედაპირზე მის მართობულად მოქმედი მილის კედლების N წნევის ძალები, რომლის გეგმილები მილის ღერძზე ნულის ტოლია.

4. მილის გვერდითი კედლის P_3 წნევის ძალა, რომელიც მოქმედებს 1-1 სიბრტყეში

$$P_3 = p_1(\omega_2 - \omega_1) .$$

5. მილის კედლებზე მოქმედ ხახუნის ძალებს, 1-1 და 2-2 კვეთებს შორის მანძილის სიმცირის გამო, უგულებელვყოფთ.

აღნიშნულის შედეგად, მოძრაობის რაოდენობის ცვლილების განტოლება ასეთი სახით ჩაიწერება:

$$\alpha_2'\rho\omega_2 v_2^2 - \alpha_1'\rho\omega_1 v_1^2 = p_1\omega_1 - p_2\omega_2 + p_1(\omega_2 - \omega_1) + \gamma\omega_2(z_1 - z_2) .$$

თუ დავუშვებთ, რომ ტურბულენტური მოძრაობისათვის $\alpha_1' \approx \alpha_2' \approx 1$ და შევასრულებთ მარტივ გარდაქმნებს, მივიღებთ:

$$\rho\omega_2\left(v_2^2 - \frac{\omega_1}{\omega_2}v_1^2\right) = \omega_2(p_1 - p_2) + \gamma\omega_2(z_1 - z_2) .$$

ხარჯის უწყვეტობის განტოლებიდან

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} . \qquad (5.10'')$$

ამიტომ წინა გამოსახულება ასე ჩაიწერება:

$$\rho v_2(v_2 - v_1) = (p_1 - p_2) + \gamma(z_1 - z_2)$$

ანუ

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1 v_2}{g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{g} . \qquad (6.80)$$

ახლა ბერნულის განტოლებაში (5.60) დავუშვათ, რომ $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx 1$ და (5.60) განტოლებას წევრ-წევრად გამოვაკლოთ (6.80) ტოლობა, გვექნება:

$$h_{\text{დან}} = \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_1 v_2}{g} + \frac{v_2^2}{2g} .$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ განსახილველ შემთხვევაში $h_{\text{დან}} = h_{\text{უჯ}}$, სადაც $h_{\text{უჯ}}$ არის ნაკადის უეცარ გაფართოებაზე დაწნევის ადგილობრივი დანაკარგის სიდიდე, მაშინ ბოლო გამოსახულებიდან მივიღებთ **ბორდას ცნობილ ფორმულას:**

$$h_{\text{უჯ}} = (v_1 - v_2)^2 / 2g , \qquad (6.81)$$

სადაც $(v_1 - v_2)$ სხვაობა არის ნაკადის უეცარი გაფართოების შედეგად დაკარგული სიჩქარე.

მაშასადამე, **დაწნევის ადგილობრივი დანაკარგი ნაკადის უეცარი გაფართოების დაკარგული სიჩქარის შესაბამისი სიჩქარითი დაწნევის ტოლია.**

(6.81) ფორმულას მივცეთ ვეისბახის ზოგადი ფორმულის (6.78) სახე, რისთვისაც ვისარგებლოთ ხარჯის უწყვეტობის განტოლებით (5.20′). (6.81) გამოსახულებიდან ფრჩხილებს გარეთ გავიტანოთ ჯერ v_1, შემდეგ v_2 სიჩქარეები:

$$h_{\text{უბ}} = \left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right)^2 \frac{v_1^2}{2g} = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \frac{v_1^2}{2g};$$

$$h_{\text{უბ}} = \left(\frac{v_1}{v_2} - 1\right)^2 \frac{v_2^2}{2g} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1\right)^2 \frac{v_2^2}{2g}.$$

თუ შემოვიტანთ აღნიშვნებს

$$\xi'_{\text{უბ}} = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2; \quad \xi''_{\text{უბ}} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1\right)^2. \tag{6.82}$$

მაშინ ნაკადის უეცარი გაფართოებისას დაწნევის ადგილობრივი დანაკარგი შეიძლება გამოითვალოს ერთ-ერთი შემდეგი ფორმულით:

$$h_{\text{უბ}} = \xi'_{\text{უბ}} \frac{v_1^2}{2g}; \quad h_{\text{უბ}} = \xi''_{\text{უბ}} \frac{v_2^2}{2g}. \tag{6.83}$$

ადგილობრივი ξ ჰიდრავლიკური წინაღობის კოეფიციენტის მნიშვნელობები წინაღობის სხვა სახეობებისათვის, როდესაც მათი თეორიული გზით გამოთვლის საშუალება არ არსებობს, განისაზღვრება ექსპერიმენტულად ვეისბახის ფორმულიდან:

$$\xi = \frac{h_{\text{ადგ}} \cdot 2g}{v^2}. \tag{6.84}$$

მუდმივი წრიული კვეთის $(d = const)$ ჰორიზონტალური მილსადენისათვის $z_1 = z_2$, $v_1 = v_2$. ამიტომ, ბერნულის განტოლებიდან (5.60) დაწნევის ადგილობრივი დანაკარგის გამოსათვლელად გვექნება:

$$h_{\text{ადგ}} = \frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} = \frac{p_1 - p_2}{\gamma},$$

სადაც p_1/γ და p_2/γ არის ადგილობრივი წინაღობის წინ და შემდეგ მილსადენთან მიერთებული პიეზომეტრული მილაკების ჩვენებები.

$h_{\text{ადგ}}$-ის მიღებული მნიშვნელობის ჩასმით (6.84) გამოსახულებაში გამოითვლება განსახილველი ადგილობრივი წინაღობის ξ კოეფიციენტის სიდიდე.

მილსადენებში ადგილობრივი წინაღობათა ძირითადი სახეობებისათვის ξ კოეფიციენტის მნიშვნელობები მოცემულია ცნობარებში.

მილსადენში რამდენიმე ჰიდრავლიკური წინაღობის არსებობისას დაწნევის დანაკარგები იკრიბება (ჯამდება), ე.ი. თუ მილსადენი ხასიათდება $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \ldots, \xi_n$ წინაღობის კოეფიციენტებით და ნაკადის განსახილველ უბანზე საშუალო სიჩქარე მუდმივია, მაშინ

$$\sum h_{\text{ადგ}} = (\xi_1, \xi_2, \xi_3, \ldots, \xi_n)\frac{v^2}{2g}. \qquad (6.85)$$

თუ ადგილობრივ წინაღობებს შორის მანძილები შედარებით მცირეა, ჯამური დაწნევის დანაკარგი შეიძლება თითოეულ წინაღობაზე დაკარგული დაწნევების ჯამისაგან განსხვავებული აღმოჩნდეს:

$$\sum h_{\text{ადგ}} \neq \xi_1 \frac{v^2}{2g} + \xi_2 \frac{v^2}{2g} + \xi_3 \frac{v^2}{2g} + \cdots + \xi_n \frac{v^2}{2g}.$$

ეს იმით აისხნება, რომ ადგილობრივ გასაშუალებულ სიჩქარეთა ეპიურა პირველი წინაღობის შემდეგ ვერ ასწრებს სტაბილიზებას მეორე წინაღობამდე. მანძილი, რომელზედაც მყარდება ორი მეზობელი წინაღობის ურთიერთგავლენა, შეიძლება გამოვთვალოთ ა. ალტშულის მიახლოებითი ფორმულით

$$\ell_{\text{გავ}} = (40 \cdots 60)d, \qquad (6.86)$$

სადაც d არის მილსადენის დიამეტრი.

თუ ადგილობრივ წინაღობებს შორის მანძილი $\ell = \ell_{\text{გავ}}$, მაშინ საერთო ჯამური დანაკარგის განსაზღვრისათვის ლაბორატორიულ ცდებს მიმართავენ.

თავი VII. სითხის დამყარებული მოძრაობა საწნეხო მილსადენებში

§ 7.1. მილსადენებში დაწნევის დანაკარგების გამოსათვლელი საანგარიშო დამოკიდებულებები

ამ თავში განვიხილავთ სითხის დამყარებულ, თანაბარ, დაწნევით, ტურბულენტურ მოძრაობას წრიული კვეთის ცილინდრულ მილსადენებში. საინჟინრო პრაქტიკაში ასეთი მოძრაობის ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას გამოიყენება დამოკიდებულებები:

(5.60), (6.11), (6.12), (6.13), (6.16). ხაზს ვუსვამთ, რომ განვიხილავთ მხოლოდ ისეთ შემთხვევებს, რომლებიც **უპასუხებს წინაღობის კვადრატულ ზონას.** თუ მოძრაობის ტურბულენტური რეჟიმი მილსადენში შეესაბამება წინაღობის ჰიდრავლიკურ გლუვკედლიან ან გარდამავალ ზონებს, მაშინ გაანგარიშების მეთოდიკა არსებითად დარჩება იგივე, რაც წინაღობის კვადრატული ზონისათვის, მხოლოდ დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგის განსაზღვრისას შეზისა და დარს-ვეისბახის ორი ფორმულიდან უნდა ვისარგებლოთ აუცილებლად დარს-ვეისბახის ფორმულით და მასში შემავალი λ კოეფიციენტის გამოსათვლელი სათანადო დამოკიდებულებებით.

ზემომოყვანილ დამოკიდებულებებთან ერთად მილსადენის (სადინარის) ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას მიმართავენ **ხარჯის მახასიათებლის** ცნებას. შეზის ფორმულა შეიძლება ასეთი სახით ჩავწეროთ:

$$Q = \omega C\sqrt{RI} = K\sqrt{I}\ , \tag{7.1}$$

სადაც

$$K = \omega C\sqrt{R} \tag{7.2}$$

არის ე.წ. **ხარჯის მახასიათებელი ან ხარჯის მოდული**. (7.1) გამოსახულებიდან ჩანს, რომ ვინაიდან I ჰიდრავლიკური ქანობი უგანზომილებო სიდიდეა, ამიტომ ხარჯის მახასიათებელს აქვს ნაკადის ხარჯის განზომილება. ცხადია, რომ თუ $I = 1$ სმ, მაშინ $Q = K$-ს, ე.ი. ერთეული ჰიდრავლიკური ქანობის შემთხვევაში მილსადენში გამავალი ხარჯი რიცხობრივად ხარჯის მოდულის ტოლია და ახასიათებს მილსადენის გამტარობის უნარს.

გამოვსახოთ ხარჯის მახასიათებელი მილსადენის დიამეტრის საშუალებით:

$$K = \omega c\sqrt{R} = \frac{\pi d^2}{4}\cdot\frac{1}{n}R^y\cdot\sqrt{\frac{d}{4}} = \frac{\pi d^2}{4}\cdot\frac{1}{n}\left(\frac{d}{4}\right)^y\sqrt{\frac{d}{4}}\ .$$

გავიხსენოთ, რომ ხარისხის მაჩვენებელი ნ. პავლოვსკის ფორმულაში დამოკიდებულია ჰიდრავლიკურ რადიუსსა და ხორკლიანობის კოეფიციენტზე, ე.ი. $y = f_1(n, R)$ ანუ $y = f_2(n, d)$. მაშასადამე, თუ $n = const$, მაშინ ხარჯის მახასიათებელი წარმოადგენს მხოლოდ მილსადენის დიამეტრის ფუნქციას: $K = f(d)$. K-ს მნიშვნელობები პრაქტიკაში გამოყენებული სხვადასხვა მასალის და ხორკლიანობის სტანდარტული დიამეტრის მილებისათვის მოცემულია ცნობარებში.

§ 7.2. დაწნევის დანაკარგების შეკრება. წინაღობის სრული კოეფიციენტები. მოკლე და გრძელი მილსადენების შესახებ

ვთქვათ, მოცემული გვაქვს რაიმე ℓ სიგრძის მილსადენი რამდენიმე ადგილობრივი წინაღობით, რომლებიც ხასიათდება შესაბამისი $\xi_1,\xi_2,\xi_3,\ldots,\xi_n$ კოეფიციენტებით. ვიგულისხმოთ ისიც, რომ რომ წინაღობებს შორის მანძილები აკმაყოფილებს პირობას $\ell_i = \ell_{გვ}$, სადაც ℓ_i არის მანძილი ნებისმიერ ორ მეზობელ წინაღობას შორის, ხოლო $\ell_{გვ}$ მანძილი, რომელზედაც მყღავნდება მათი ურთიერთგავლენა (4.93). როგორც ვნახეთ (§ 6.10), ასეთ შემთხვევაში დაწნევის ჯამური ადგილობრივი დანაკარგი გამოითვლება დამოკიდებულებით:

$$\sum h_{ადგ} = \left(\xi_1,\xi_2,\xi_3,\ldots,\xi_n\right)\frac{v^2}{2g}. \qquad (6.85)$$

განსახილველი ℓ სიგრძის მილსადენისათვის დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგი განისაზღვრება დარს-ვეისბახის ფორმულით (6.16):

$$h_{სიგ} = \lambda\frac{\ell}{d}\frac{v^2}{2g}.$$

ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას ხშირად სარგებლობენ მილსადენის სიგრძეზე დაწნევის დანაკარგის $\xi_{სიგ}$ კოეფიციენტის ცნებით:

$$\xi_{სიგ} = \lambda\frac{\ell}{d}; \qquad (7.3)$$

მაშინ დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგის (4.16) ფორმულა შეიძლება ასე ჩავწეროთ:

$$h_{სიგ} = \lambda\frac{\ell}{d}\frac{v^2}{2g} = \xi_{სიგ}\frac{v^2}{2g}. \qquad (7.4)$$

(6.85) და (7.4) გამოსახულებათა შეკრებით მივიღებთ დაწნევის ჯამური დანაკარგის გამოსათვლელ ფორმულას:

$$h_{დან} = h_{სიგ} + \sum h_{ადგ} = \lambda\frac{\ell}{d}\frac{v^2}{2g} + \left(\xi_1,\xi_2,\xi_3,\ldots,\xi_n\right)\frac{v^2}{2g} =$$

$$\left(\lambda\frac{\ell}{d}\right)\frac{v^2}{2g} = \left(\xi_{სიგ} + \sum\xi_{ადგ}\right)\frac{v^2}{2g}.$$

აღვნიშნოთ

$$\xi_{\text{სრ.}} = \lambda \frac{\ell}{d} + \sum \xi_{\text{ადგ}} = \xi_{\text{სიგ.}} + \sum \xi_{\text{ადგ}} , \qquad (7.5)$$

მაშინ

$$h_{\text{დან}} = \xi_{\text{სრ}} \frac{v^2}{2g} . \qquad (7.6)$$

მიღებული გამოსახულება არის დაწნევის სრული (ჯამური) დანაკარგის გამოსათვლელი ფორმულა. $\xi_{\text{სრ}}$ კოეფიციენტს, რომელიც ითვალისწინებს ნაკადის მოცემული უბნისათვის ყველა სახის დაწნევის დანაკარგს, **წინაღობის სრულ კოეფიციენტს** ან **სისტემის წინაღობის კოეფიციენტს** უწოდებენ.

დაწნევის სიგრძეზე და ადგილობრივ დანაკარგებს შორის თანაფარდობის მიხედვით ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას განასხვავებენ **მოკლე** და **გრძელ მილსადენებს**.

მცირე სიგრძის მილსადენს, ადგილობრივ წინაღობათა საკმაოდ დიდი რაოდენობით, რომლისთვისაც დაწნევის ადგილობრივი დანაკარგები შეადგენს სიგრძეზე დანაკარგის არა ნაკლებ 5...10%-ს, **მოკლე მილსადენი** ეწოდება. მოკლე მილსადენებს მიეკუთვნება ტუმბოების შემწოვი მილები, დიუკერები, სიფონები, სხვადასხვა კონსტრუქციის ზეთსადენი და სხვა.

შედარებით დიდი სიგრძის მილსადენს, ადგილობრივ წინაღობათა მცირე რაოდენობით, რომლისთვისაც დაწნევის ადგილობრივი დანაკარგები სიგრძეზე დანაკარგებთან შედარებით უმნიშვნელოა (5%-ზე ნაკლები), **გრძელი მილსადენი** ეწოდება. გრძელი მილსადენების ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას ადგილობრივი დანაკარგები ცალკე არ განიხილება და მათი სიდიდე ჯამურ დანაკარგებში აიღება სიგრძეზე დანაკარგების გარკვეული პროცენტის სახით (5...10%). ზოგ შემთხვევაში (ძალზე გრძელ წყალსადენის მაგისტრალურ მილსადენებში) დასაშვებია ადგილობრივი დანაკარგების სრული უგულებელყოფაც. გრძელ მილსადენებს მიეკუთვნება წყალსადენის ქსელისა და ირიგაციული სისტემის მილსადენები, ნავთობსადენები და სხვა.

საორიენტაციოდ, თუ $\ell < 50$ მ-ზე, მილსადენი შეიძლება ჩავთვალოთ მოკლედ, თუ $\ell > 100$ მ-ზე – გრძლად. $50 < \ell < 100$ მ ფარგლებში მილსადენი შეიძლება იყოს გრძელი ან მოკლე იმის მიხედვით, თუ როგორია დაწნევის სიგრძისა და ადგილობრივ დანაკარგთა თანაფარდობა.

მუშაობის ჰიდრავლიკური სქემისა და გეომეტრიული კონფიგურაციის მიხედვით განასხვავებენ **მარტივ** და **რთულ** მილსადე-

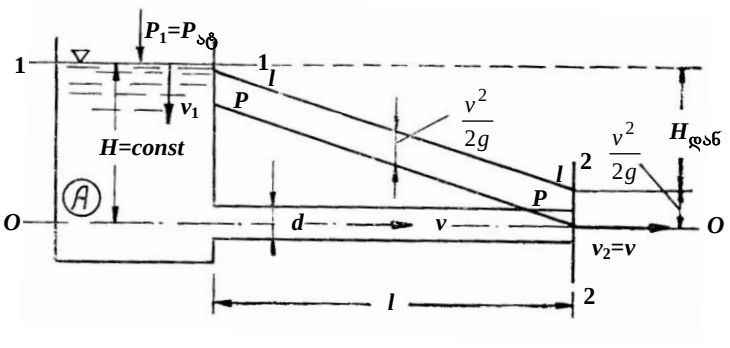
ნებს. **მარტივი** ეწოდება მუდმივი ან ცვლადი დიამეტრის მქონე მიმდევრობით შეერთებული სხვადასხვა სიგრძის ცილინდრული მილებისაგან შედგენილ მილსადენს, რომელსაც გვერდითი განშტოებები არ გააჩნია. მარტივ მილსადენში თავიდან ბოლომდე გამავალ მუდმივ ხარჯს **სატრანზიტო ხარჯი** ($Q_{\text{სატრ}}$) ეწოდება.

მარტივისაგან განსხვავებით, **რთულ სადენს** აქვს გვერდითი განშტოებები. რთულ მილსადენებს მიეკუთვნება პარალელურად შეერთებული მილების სისტემა, ჩიხური და რგოლური მილსადენები.

მარტივი და რთული მილსადენების ძირითად სახეებს განვიხილავთ მომდევნო პარაგრაფებში.

§ 7.3. მოკლე მილსადენები

1. **მუდმივი დიამეტრის მარტივი მილსადენი.** ამ სახის მილსადენის გაანგარიშებისას მხედველობაში უნდა ვიქონიოთ ორი ძირითადი სქემა: მილიდან სითხის გამოდინება ხდება ატმოსფეროში (ნახ. 7.1) ან დონის ქვეშ (ნახ. 7.2). ჯერ განვიხილოთ პირველი სქემა. იგულისხმება, რომ მოძრაობა მილსადენში დამყარებულია, v საშუალო სიჩქარე მილსადენში დროის მიხედვით უცვლელი; მილსადენის დიამეტრი სიგრძეზე მუდმივია ($d = const$); გამოსასვლელი 2-2 კვეთის ცენტრზე დაწნევა $H = const$ (H არის A რეზერვუარში სითხის თავისუფალი ზედაპირისა და მილის გამოსასვლელი კვეთის ნიშნულებს შორის სხვაობა). ჩვენი მიზანია, განვსაზღვროთ მილსადენში ხარჯის (Q) სიდიდე.



ნახ. 7.1

ამისათვის საფარდ სიბრტყედ მივიჩნიოთ 2-2 კვეთის ცენტრზე გამავალი *O-O* სიბრტყე და შევადგინოთ ბერნულის განტოლება 1-1 და 2-2 კვეთებისათვის (ნახ. 7.1). საანგარიშო კვეთებისა და საფარდი სიბრტყის ასეთ შერჩევა ხელსაყრელია იმიტომ, რომ *A* რეზერვუარში სითხის თავისუფალ ზედაპირზე (1-1 კვეთი) და მილის გამოსასვლელ კვეთში (2-2) წნევები ატმოსფერულის ტოლია ($p_1 = p_2 = p_{ატ}$). გარდა ამისა, $z_1 = H$, $z_2 = 0$ და $v_1 \approx 0$, რადგანაც რეზერვუარის ზომები მნიშვნელოვნად აღემატება მილის კვეთის ზომებს. აღნიშნულის გათვალისწინებით, როდესაც $\alpha \approx 1$, მაშინ ბერნულის განტოლება 1-1 და 2-2 კვეთებისათვის:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma}\frac{v_2^2}{2g} + h_{დან}$$

ასეთ სახეს მიიღებს:

$$H = \frac{v_2^2}{2g} + h_{დან}.$$

მილის გამოსასვლელ 2-2 კვეთში სიჩქარე (v_2) აღვნიშნოთ v-თი. მხედველობაში მივიღოთ (7.6) გამოსახულება. გვექნება:

$$H = \frac{v^2}{2g} + \xi_{სრ}\frac{v^2}{2g},$$

საიდანაც

$$v = \frac{1}{\sqrt{1+\xi_{სრ}}}\sqrt{2gz} \qquad (7.7)$$

და მაშასადამე

$$Q = \omega v = \frac{\pi d^2}{4}\frac{1}{\sqrt{1+\xi_{სრ}}}\sqrt{2gz}\,. \qquad (7.8)$$

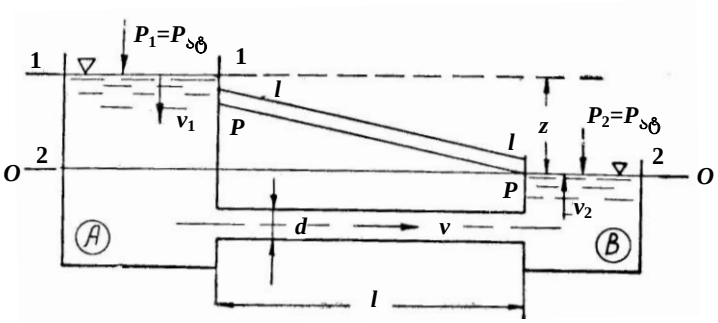
მიღებულ გამოსახულებაში $\xi_{სრ}$ არის წინაღობის სრული კოეფიციენტი.

ახლა განვიხილოთ მეორე სქემა, როდესაც მილიდან სითხის გამოდინება ხდება დონის ქვეშ (ნახ. 7.2). ამ შემთხვევაში $z_1 = Z$; $v_1 = v_2 = 0$; $p_1 = p_2 = p_{ატ}$; $z_2 = 0$, $\alpha \approx 1$. ამიტომ ბერნულის განტოლება საბოლოოდ ასეთ სახეს მიიღებს:

$$z_1 = \xi_{სრ}\frac{v^2}{2g},$$

საიდანაც

$$v = \frac{1}{\sqrt{\xi_{სრ}}}\sqrt{2gH} \qquad (7.9)$$



ნახ. 7.2

და მაშასადამე

$$Q = \omega v = \frac{\pi d^2}{4}\frac{1}{\sqrt{\xi_{სრ}}}\sqrt{2gH}\ . \qquad (7.10)$$

(7.8) და (7.10) გამოსახულებებს შეიძლება შემდეგი სახე მივცეთ:

$$Q = \mu_{მილ}\omega\sqrt{2gH}\ ; \qquad (7.11)$$

$$Q = \mu_{მილ}\omega\sqrt{2gZ}\ , \qquad (7.12)$$

სადაც $\mu_{მილ}$ (7.5) ფორმულის გათვალისწინებით ტოლია:

ა) ატმოსფეროში გამოდინებისას

$$\mu_{მილ} = \frac{1}{\sqrt{1+\xi_{სრ}}} = \frac{1}{\sqrt{1+\lambda\frac{\ell}{d}+\sum\xi_{ადგ}}}\ ; \qquad (7.13)$$

ბ) დონის ქვეშ გამოდინებისას

$$\mu_{მილ} = \frac{1}{\sqrt{\xi_{სრ}}} = \frac{1}{\sqrt{\lambda\frac{\ell}{d}+\sum\xi_{ადგ}}}\ . \qquad (7.14)$$

$\mu_{მილ}$ კოეფიციენტს **მილსადენის ხარჯის კოეფიციენტი** ეწოდება.

(7.11) და (7.12) ფორმულები გამოიყენება მუდმივი დიამეტრის მარტივი მილსადენის ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას. მათი საშუალებით შეიძლება გადავწყვიტოთ შემდეგი პრაქტიკული ამოცანები: 1) მოცემული *d* და *z*-ის ან *H*-ის მიხედვით განისაზღვრება *Q*; 2) მოცემული *d* და *Q*-ს მიხედვით განისაზღვრება *H* (ან *z*); 3) მოცემული *a* და *H*-ის (ან *z*) მიხედვით განისაზღვრება *d*.

(7.13) გამოსახულებაში ფესქვეშ პირველი შესაკრები (ერთი) მიეკუთვნება $\frac{v^2}{2g}$ სიჩქარით დაწნევას, რომელიც აქვს ნაკადს მილიდან ატმოსფეროში გამოდინების კვეთში და, მაშასადამე, წარმოადგენს იმ კინეტიკურ ენერგიას, რომლითაც ნაკადი აგრძელებს ატმოსფეროში მოძრაობას და შეიძლება გამოყენებულ იქნეს. (7.14) გამოსახულებაში ასეთი შესაკრები (ერთი) არ გვაქვს, რადგანაც მილიდან *B* რეზერვუარში შესვლისას ადგილობრივი წინაღობის კოეფიციენტი $\xi_{შეს}=1$ გათვალისწინებულია მეორე შესაკრებში ($\sum\xi_{ადგ}$).

(7.1) და (7.2) ნახაზებზე აგებულია სრული დაწნევის (ენერგიის) და პიეზომეტრული წირები (*e-e* და *p-p*) გამოდინების ორივე შემთხვევაში.

2. **სიფონი**. სიფონი ეწოდება თვითდინებით მილს, რომლის ნაწილი მოთავსებულია მის მკვებავ რეზერვუარში არსებული სითხის დონის მაღლა.

სიფონი ფართოდ გამოიყენება პრაქტიკაში იმის გამო, რომ ის გაცილებით ეკონომიურია, ვიდრე თვითდინებითი მილსადენი, რომელშიც სითხე დონეთა სხვაობის შედეგად მოძრაობს. სიფონი ვაკუუმის პირობებში მუშაობს, ამიტომ მისი გაანგარიშების თავისებურება დაკავშირებულია მილსადენის უმაღლეს წერტილში ვაკუუმის სიდიდის განსაზღვრასთან.

განვიხილოთ სიფონიდან სითხის გამოდინება დონეზე დაბლა. გავატაროთ *O-O* საფარდი სიბრტყე და დავწეროთ ბერნულის განტოლება 1-1 და 2-2 კვეთებისათვის (ნახ. 7.3)

$$z_1+\frac{p_{ატ}}{\gamma}=z+h+\frac{p_2}{\gamma}+\frac{v_2^2}{2g}+\xi_{სრ(1-2)}\frac{v_2^2}{2g},$$

სადაც h არის სიფონის უმაღლესი წერტილის (2-2 კვეთის ცენტრის) დაცილება A რეზერვუარში სითხის დონიდან;

$\xi_{სრ(1-2)}=\lambda\frac{\ell_{1-2}}{d}+\sum\xi_{ადგ(1-2)}$ – წინაღობის სრული კოეფიციენტი მილსადენის შესასვლელი კვეთიდან 2-2 კვეთამდე;

ℓ_{1-2} – მილსადენის სიგრძე აღნიშნულ კვეთებს შორის;

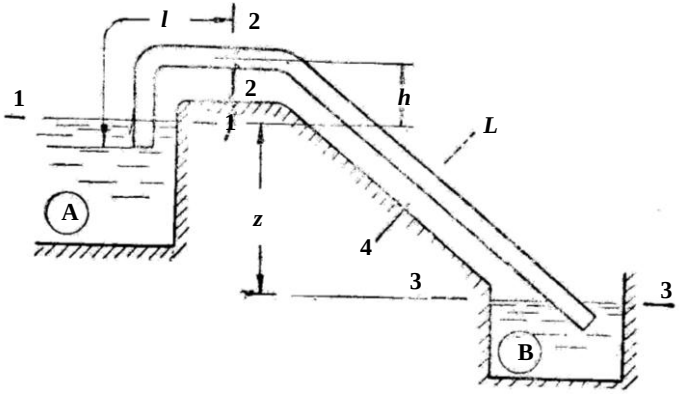
$v_2=v$ – ნაკადის მოძრაობის საშუალო სიჩქარე მილსადენში.

გავითვალისწინოთ, რომ მაქსიმალური ვაკუუმმეტრული სიმაღლე $h_{ვაკ}^{მაქს}=\frac{p_{ატ}-p_2}{\gamma}$, მივიღებთ

$$h_{\text{ვაკ}}^{\text{მაქს}} = h + \left(1 + \lambda \frac{\ell_{1-2}}{d} + \sum \xi_{\text{ადგ}(1\text{-}2)}\right) \frac{v^2}{2g} \tag{7.15}$$

ანუ

$$h_{\text{ვაკ}}^{\text{მაქს}} = h + \left(1 + \xi_{\text{ადგ}(1\text{-}2)}\right) \frac{v^2}{2g} . \tag{7.16}$$



ნახ. 7.3

ამ გამოსახულებით შეიძლება განისაზღვროს ვაკუუმის მნიშვნელობა სიფონის ნებისმიერ კვეთში, მაგალითად 4-4 კვეთში. ამასთან (7.16) ფორმულაში *h*-ში ვიგულისხმებთ 4-4 კვეთის ცენტრის დაცილებას *A* რეზერვუარში სითხის დონიდან, ხოლო წინაღობის სრულ კოეფიციენტში – მის მნიშვნელობას 1-1 კვეთიდან 4-4 კვეთამდე. ცხადია, ვაკუუმის სიდიდე ნებისმიერ კვეთში ნაკლები იქნება $h_{\text{ვაკ}}^{\text{მაქს}}$ სიდიდეზე.

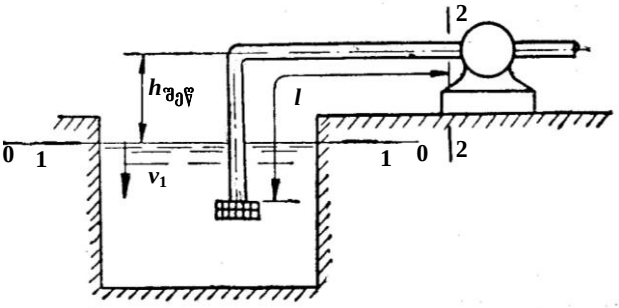
(7.16) ფორმულით გამოთვლილი $h_{\text{ვაკ}}^{\text{მაქს}}$ მნიშვნელობა წყლის ნორმალური ატმოსფერული წნევისას არ უნდა აღემატებოდეს 7 მ-ს. წინააღმდეგ შემთხვევაში, მოსალოდნელია სიფონში ჭავლის გაწყვეტა.

ხარჯი სიფონში განისაზღვრება (7.12) გამოსახულებით. მხოლოდ მილსადენის ხარჯის $\mu_{\text{მილ}}$ კოეფიციენტის გამოსათვლელ ფორმულაში (7.14) უნდა გავითვალისწინოთ სიფონის სრული სიგრძე 1-1 კვეთიდან 3-3 კვეთამდე შესაბამისი ადგილობრივი წინაღობებით.

3. **ტუმბოს შემწოვი მილი.** ტუმბოს შემწოვი მილი, როგორც სიფონი, ხასიათდება მასში ვაკუუმის არსებობით, რომლის მაქ-

სიმალური სიდიდე მიიღება უშუალოდ ტუმბოს მუშა თვლიდან. იგულისხმება ცენტრიდანული ტუმბო, რადგან დგუშიანი ტუმბოს შემთხვევაში სითხის მოძრაობა შემწოვ მილში იქნებოდა დაუმყარებელი. ვაკუუმის მაქსიმალური მნიშვნელობის გამოსათვლელად საანგარიშო კვეთებად მივიღოთ რეზერვუარში სითხის თავისუფალ ზედაპირზე გამავალი 1-1 კვეთი და 2-2 კვეთი ტუმბოს შესასვლელის წინ (ნახ. 7.4) საფარდი სიბრტყე შევუთავსოთ 1-1 კვეთს. საანგარიშო კვეთების ასეთი შერჩევა მოსახერხებელია იმით, რომ რეზერვუარში სითხის თავისუფალ ზედაპირზე წნევა ატმოსფერულის ტოლია $(p_1 = p_{ატ})$, $z_1 = 0$, $v_1 = 0$ და $z_2 = h_{შწ}$. აღნიშნულის გათვალისწინებით, როცა $\alpha = 1$.

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{დან}$$



ნახ. 7.4

მაშინ ბერნულის განტოლებას 1-1 და 2-2 კვეთებისათვის ასეთი სახე ექნება:

$$\frac{p_{ატ}}{\gamma} = h_{შწ} + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{დან},$$

სადაც $v_2 = v$ არის ნაკადის საშუალო სიჩქარე შემწოვ მილში და ჩვეულებრივ, აიღება 0,8...1,25 მ/წმ ფარგლებში;

p_2 – წნევა ტუმბოს შესასვლელთან;

$h_{დან} = \xi_{სრ} \frac{v_2^2}{2g}$ – დაწნევის სრული დანაკარგი შემწოვ მილში.

მიღებული გამოსახულება შეიძლება ასე ჩაწეროთ:

$$\frac{p_{ატ} - p_2}{\gamma} = h_{შწ} + \left(1 + \xi_{სრ}\right)\frac{v^2}{2g}.$$

ამ ტოლობის მარცხენა ნაწილი არის შეწოვის ვაკუუმმეტრული სიმაღლე $h_{ვაკ} = \frac{p_{ატ} - p_2}{\gamma}$, ე.ი.

$$h_{შეწ} = h_{ვაკ} - (1 + \xi_{სრ})\frac{v^2}{2g}. \qquad (7.17)$$

ეს განტოლება გვიჩვენებს, რომ შეწოვის სიმაღლე ყოველთვის ნაკლებია ვაკუუმმეტრულ სიმაღლეზე, რადგან ვაკუუმის ნაწილი იხარჯება $\frac{v^2}{2g}$ სიჩქარითი დაწნევის შექმნაზე, ხოლო ნაწილი – ჰიდრავლიკურ წინაღობათა გადალახვაზე.

$h_{ვაკ}$-ის დასაშვები მნიშვნელობა ($h_{ვაკ(დას)}$) მითითებულია ტუმბოს პასპორტში და სხვადასხვა ტიპის ტუმბოსათვის ის იცვლება ფარგლებში:

$$h_{ვაკ(დას)} \le 4{,}0 \ldots 6{,}5 \ \text{მ}.$$

თუ მოცემული ტუმბოსათვის გვეცოდინება $h_{ვაკ(დას)}$-ის მნიშვნელობა, (7.17) ფორმულით გამოვთვლით ტუმბოს დადგმის ზღვრულ სიმაღლეს რეზერვუარში სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან.

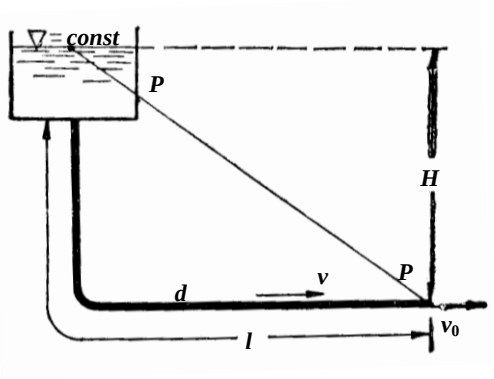
§ 7.4. გრძელი მილსადენები

1. **მარტივი მილსადენი.** როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, **გრძელი მილსადენების შემთხვევაში დაწნევის დანაკარგებს უგულებელვყოფთ**. ამასთან ვთვლით, რომ სრული დაწნევის წირი და პიეზომეტრული წირი პრაქტიკულად შეთავსებულია. განვიხილოთ მუდმივი d დიამეტრის მილებისაგან შედგენილი ℓ სიგრძის მარტივი მილსადენი (ნახ. 7.5). აღნიშნულის თანახმად, მთელი H დაწნევა უნდა დაიხარჯოს სიგრძეზე წინაღობის დაძლევასა და მილის გამოსასვლელ კვეთში $\frac{v_0^2}{2g}$ სიჩქარითი დაწნევის შექმნაზე. დავუშვათ, რომ მილსადენში სითხის მოძრაობის საშუალო სიჩქარე v-ს ტოლია, მაშინ (6.11) ფორმულის გათვალისწინებით გვექნება:

$$H = \frac{v_0^2}{2g} + h_{სიგ} = \frac{v_0^2}{2g} + \frac{v^2 \ell}{C^2 R}.$$

მილსადენის მნიშვნელოვანი სიგრძის $\frac{v_0^2}{2g}$ სიდიდე შეიძლება უგულებელვყოთ, რადგანაც ის გაცილებით ნაკლებია $\frac{v^2\ell}{C^2R}$ შესაკრებზე, მაშინ

$$H = h_{\text{სიგ}} = \frac{v^2\ell}{C^2R}. \tag{7.18}$$



ნახ. 7.5

ეს გამოსახულება გვიჩვენებს, რომ განსახილველ შემთხვევაში მთელი H დაწნევა იხარჯება მილსადენის სიგრძის წინაღობის დაძლევაზე.

(7.18) გამოსახულების თითოეული წევრის ℓ-ზე გაყოფით მივიღებთ ჰიდრავლიკური ქანობის სიდიდეს:

$$I = \frac{H}{\ell} = \frac{h_{\text{სიგ}}}{\ell} = \frac{v^2}{C^2R}. \tag{7.19}$$

შევიტანოთ ეს მნიშვნელობა (7.1) ფორმულაში

$$Q = K\sqrt{I} = K\sqrt{\frac{h_{\text{სიგ}}}{\ell}} = K\sqrt{\frac{H}{\ell}}, \tag{7.20}$$

საიდანაც მივიღებთ საჭირო დაწნევის გამოსათვლელ დამოკიდებულებას:

$$h_{\text{სიგ}} = Q^2\frac{\ell}{K^2} \tag{7.21}$$

ანუ

$$H = Q^2 \frac{\ell}{K^2} . \qquad (7.22)$$

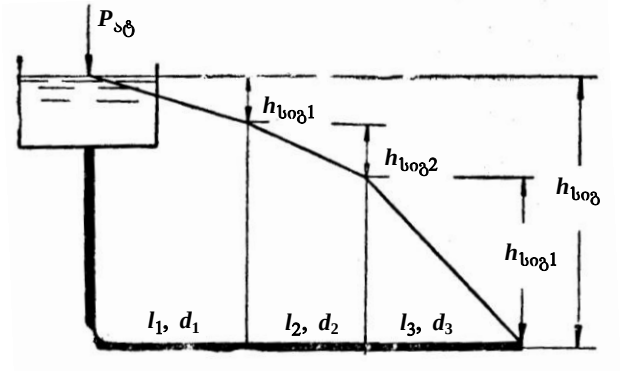
ℓ/K^2 სიდიდე, როდესაც $Q=1$-ს, რიცხობრივად ისეთი დაწნევის ტოლია, რომელიც აუცილებელია მილსადენში ჰიდრავლიკურ წინაღობათა დასაძლევად. ამიტომ ℓ/K^2 სიდიდეს **მილსადენის კუთრ წინაღობას** უწოდებენ.

(7.19)–(7.22) დამოკიდებულებები საშუალებას იძლევა გადავწყვიტოთ მუდმივი დიამეტრის გრძელი მარტივი მილსადენის გაანგარიშებასთან დაკავშირებული ამოცანები.

2. **მილსადენის მიმდევრობითი შეერთება.** განვიხილოთ სხვადასხვა დიამეტრისა და სიგრძის მილებისაგან მიმდევრობით შეერთებული მილსადენის სისტემა, რომელშიც გაედინება უცვლელი სატრანზიტო Q ხარჯი ($Q=const$) (ნახ. 7.6). აქაც, ისევე როგორც გრძელი მარტივი მილსადენის გაანგარიშებისას, უგულებელვყოთ სიჩქარითი დაწნევის მნიშვნელობები ცალკეულ უბნებზე მათი სიმცირის გამო. მაშინ თითოეულ უბანზე დაწნევის დანაკარგის სიდიდე შეიძლება გამოვთვალოთ (7.21) ფორმულით:

$$h_{\text{სიგ},i} = Q^2 \frac{\ell_i}{K_i^2} ,$$

სადაც ინდექსი $i = 1,2,3,\ldots,n$ არის მილსადენის უბნის ნომერი.



ნახ. 7.6

მილსადენის მთელ სიგრძეზე დაწნევის დანაკარგი იქნება:

$$\sum h_{\text{სიგ}} = h_{\text{სიგ},1} + h_{\text{სიგ},2} + h_{\text{სიგ},3} + \cdots + h_{\text{სიგ},n} = H .$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ მილსადენის ყველა უბნისათვის სატრანზიტო ხარჯი $Q = const$, მაშინ (7.21) ფორმულის თანახმად

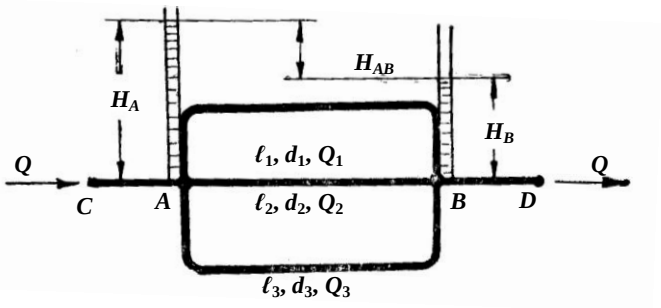
$$H = \sum h_{\text{სიგ}} = Q^2 \sum \frac{\ell_i}{K_i^2}. \qquad (7.23)$$

მაშასადამე, მილების მიმდევრობითი შეერთებისას დაწნევის ჯამური დანაკარგი სიგრძეზე, რომელიც H დაწნევის ტოლია, უდრის ხარჯის კვადრატისა და ცალკეული უბნების კუთრ წინაღობათა ჯამის ნამრავლს.

შევნიშნავთ, რომ მიმდევრობით შეერთებული გრძელი მარტივი მილსადენის ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას ცალკეული უბნების სიგრძეები და დიამეტრები (ℓ_i, d_i), როგორც წესი, ცნობილია. ამიტომ, თუ გავიხსენებთ, რომ ხარჯის მახასიათებელი $K = f(d)$ (იხ. § 7.1), შეგვიძლია განვსაზღვროთ მისი მნიშვნელობები თითოეული უბნისათვის.

(7.6) ნახაზზე მოცემულია მილების მიმდევრობით შეერთების სქემა სამი უბნისათვის და აგებულია შესაბამისი პიეზომეტრული წირი.

3. **მილების პარალელური შეერთება.** განვიხილოთ 7.7 ნახაზზე მოცემული რთული მილსადენის სქემა. C პუნქტიდან D პუნქტში მილსადენით მიეწოდება მუდმივი Q ხარჯი. A წერტილში მილსადენი განშტოვდება სამ პარალელურ ძაფად (ხაზად), რომელთა დიამეტრები და სიგრძეები (d_1, d_2, d_2, ℓ_1, ℓ_2, ℓ_3) ერთმანეთისაგან განსხვავდება. ეს ძაფები თავს იყრის B წერტილში.



ნახ. 7.7

A და B წერტილები საერთოა თითოეული ძაფისათვის, ამიტომ სამივე ძაფში სითხე იმოძრავებს ერთი და იგივე

$$H_{AB} = H_A - H_B$$

დაწნევათა სხვაობით, მაგრამ სხვადასხვა

$$I_i = \frac{H_A - H_B}{\ell_i} = \frac{H_{AB}}{\ell_i}$$

ჰიდრავლიკური ქანობით, რადგანაც ℓ_1, ℓ_2 და ℓ_3 სიგრძეები ერთმანეთის ტოლი არ არის.

ხარჯის სიდიდე თითოეულ ძაფში გამოითვლება (7.20) ფორმულით:

$$Q_i = K_i \sqrt{\frac{H_{AB}}{\ell_i}} .$$

ამრიგად, პარალელურად შეერთებული სამი ძაფისათვის შეგვიძლია შევადგინოთ განტოლებათა სისტემა:

$$Q_1 = K_1 \sqrt{\frac{H_{AB}}{\ell_1}} ; \quad Q_2 = K_2 \sqrt{\frac{H_{AB}}{\ell_2}} ; \quad Q_3 = K_3 \sqrt{\frac{H_{AB}}{\ell_3}} . \qquad (7.24)$$

ამ სისტემაში ოთხი უცნობია: Q_1, Q_2, Q_3, H_{AB}, რომელთა სიდიდეების დასადგენად არ არის საკმარისი სამი განტოლება. ამიტომ, დამატებით ვსარგებლობთ მეოთხე განტოლებით, რომელსაც **ხარჯის ბალანსის განტოლებას** უწოდებენ.

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 . \qquad (7.25)$$

თუ ცნობილია Q სატრანზიტო ხარჯი და მილსადენის ზომები (ℓ და d), (7.24) და (7.25) განტოლებებით ვიპოვით ზემოაღნიშნულ ოთხ უცნობს.

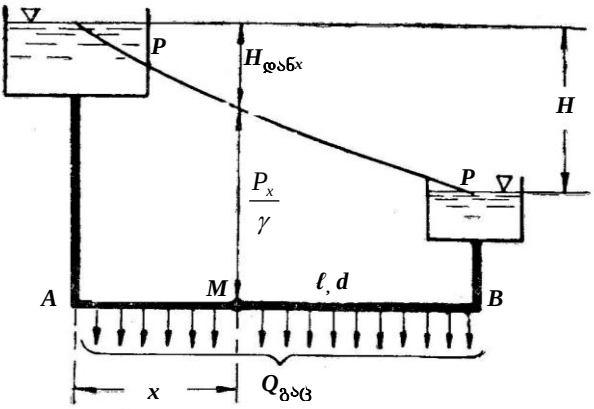
შევნიშნავთ, რომ პარალელურად შეერთებული მილსადენი, რომელსაც თავსა და ბოლოში აქვს საერთო საკვანძო წერტილები, უზრუნველყოფს წყალმომარაგების გაზრდილ საიმედოობას, რადგანაც ერთი ხაზის მწყობრიდან გამოსვლისას წყალი მიეწოდება დანარჩენი ხაზებით.

4. **დაწნევის დანაკარგების განსაზღვრა მილსადენის სიგრძეზე ხარჯის უწყვეტი თანაბარი გადაცემისას**. წყვილსადენის ქსელის გაანგარიშებისას გვხვდება შემთხვევები, როდესაც d დიამეტრისა და l სიგრძის მაგისტრალური მილსადენიდან მომხმარებლის მიერ ხდება წყლის აღება. თუ წყლის აღების წერტილები ერთმანეთთან საკმარისად ახლოსაა და მათი რიცხვი დიდია, მაშინ ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას, ჩვეულებრივ, განიხილავენ მილსადენის სიგრძეზე ხარჯის უწყვეტი თანაბარი გაცემის სქემას (ნახ. 7.8). სხვანაირად რომ ვთქვათ, მილსადენის ყოველი ერთეული სიგრძიდან გაიცემა ერთი და იგივე $Q_{გად}/l$

კუთრი ხარჯი, სადაც $Q_{გაც}$ არის განსახილველი უბნის l სიგრძეზე **გაცემული ხარჯის სიდიდე**.

წყლის ხარჯი მილსადენის საწყის კვეთში (A) აღვნიშნოთ Q-თი, ხოლო უწყვეტი თანაბარი გაცემის შემდეგ, უბნის ბოლოში (B) დარჩენილი ხარჯი – $Q_{სატ}$-თი; როგორც გვახსოვს, ასეთ ხარჯს **სატრანზიტოს** უწოდებენ, მაშინ მილსადენის საწყის კვეთში შემოსული ხარჯის სიდიდე (საწყისი ხარჯი)

$$Q = Q_{სატ} + Q_{გაც}.$$



ნახ. 7.8

ჩვენი მიზანია, განვსაზღვროთ დაწნევის დანაკარგების სიდიდე მილსადენის l სიგრძეზე. ამისათვის განვიხილოთ A წერტილიდან ნებისმიერი x მანძილით დაცილებული M კვეთი. ცხადია, ხარჯი M კვეთში (Q_M) საწყისი კვეთის ხარჯის სიდიდეზე $\frac{Q_{გაც}}{l}x$ ნაკლები იქნება, ე.ი.

$$Q_M = Q - \frac{Q_{გაც}}{l}x = (Q_{სატ} + Q_{გაც}) - \frac{Q_{გაც}}{l}x.$$

თუ გავითვალისწინებთ (5.83) და (7.20) ფორმულებს, მაშინ ჰიდრავლიკური ქანობისათვის მილსადენის ნებისმიერ M კვეთში მივიღებთ შემდეგ გამოსახულებას:

$$J_M = \frac{dh_{დან}}{dx} = \frac{Q_M^2}{K^2}.$$

აქედან

$$dh_{\text{დან}} = \frac{Q_M^2}{K^2}dx$$

ანუ

$$dh_{\text{დან}} = \frac{1}{K^2}\left[\left(Q_{\text{სატ}} + Q_{\text{გად}}\right) - \frac{Q_{\text{გად}}}{l}x\right]^2 dx =$$

$$= \left[\frac{(Q_{\text{სატ}} + Q_{\text{გად}})^2}{K^2} - \frac{2Q_{\text{გად}}}{lK^2}(Q_{\text{სატ}} + Q_{\text{გად}})x + \frac{Q_{\text{გად}}^2}{l^2K^2}\right]dx .$$

ამ განტოლების 0-დან l-მდე ინტეგრირებით და იმ დაშვებით, რომ მოცემული მილსადენისათვის $K = const$, გვექნება:

$$h_{\text{დან}} = H = \frac{1}{K^2}\left(Q_{\text{სატ}}^2 + Q_{\text{სატ}}Q_{\text{გად}} + \frac{1}{3}Q_{\text{გად}}^2\right). \qquad (7.26)$$

(7.26) განტოლება კერძო შემთხვევაში, როდესაც $Q_{\text{სატ}} = 0$, ასეთ სახეს მიიღებს:

$$h_{\text{დან}} = H = \frac{1}{3}Q_{\text{გად}}^2\frac{1}{K^2}. \qquad (7.27)$$

ეს გამოსახულება ცნობილია დიუპუის ფორმულის სახელწოდებით.

(7.21), (7.22) და (7.27) დამოკიდებულებათა შედარებიდან ვღებულობთ, რომ **დაწნევის დანაკარგების სიდიდე ხარჯის სრული უწყვეტი გაცემისას სამჯერ ნაკლებია, ვიდრე იმავე ხარჯის სრული ტრანზიტის დროს** (ე.ი. როცა $Q_{\text{გად}} = 0$).

როგორც (7.8) ნახაზიდან ჩანს, განსახილველ შემთხვევაში პიეზომეტრული წირი არის მრუდი, რომელიც ჩაზნექილობით მიმართულია ქვემოთ.

(7.26) ფორმულაში ფრჩხილებში მოთავსებული გამოსახულება პრაქტიკისათვის საკმაო სიზუსტით შეიძლება ასე ჩავწეროთ:

$$Q_{\text{სატ}}^2 + Q_{\text{სატ}}Q_{\text{გად}} + \frac{1}{3}Q_{\text{გად}}^2 \approx \left(Q_{\text{სატ}} + 0{,}55Q_{\text{გად}}\right)^2 .$$

ამიტომ, გვექნება

$$h_{\text{დან}} = H = \frac{l}{K^2}\left(Q_{\text{სატ}} + 0{,}55Q_{\text{გად}}\right)^2 = Q_{\text{საანგ}}^2\frac{l}{K^2}, \qquad (7.28)$$

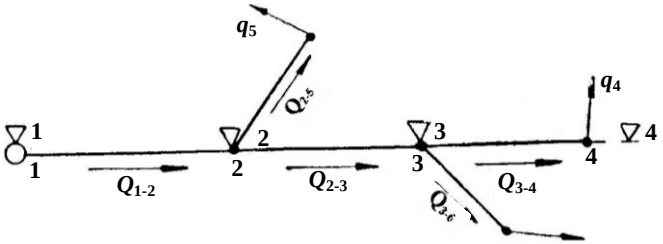
სადაც

$$Q_{\text{საანგ}} = Q_{\text{სატ}} + 0{,}55Q_{\text{გად}} \qquad (7.29)$$

არის ე.წ. „საანგარიშო ხარჯი“.

ეს ფორმულები მართებულია ხარჯის განაწილების ნებისმიერი ტიპისათვის – სატრანზიტო ($Q_{გც} = 0$), სრული გაცემის ($Q_{სტ} = 0$) და შერეული განაწილების ($Q_{სტ} \neq 0;\ Q_{გც} \neq 0$).

5. **ჩიხური (განშტოებული) მილსადენის გაანგარიშება.** განვიხილოთ (7.9) ნახაზზე მოცემული ჩიხური მილსადენის სქემა. ასეთი მილსადენის ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას, ჩვეულებრივ, ცნობილია: მილების განლაგების ადგილმდებარეობა და ყველა დამახასიათებელი წერტილის ნიშნული; ცალკეული უბნების სიგრძეები; ხარჯი მილის ყოველი უბნის თავსა და ბოლოში; თავისუფალ დაწნევაში იგულისხმება პიეზომეტრული სიმაღლის მნიშვნელობა განსახილველ წერტილში. უნდა განისაზღვროს წყალსადაწნეო კოშკის წყლის დონის ნიშნული (დაწნევა) და მილების დიამეტრები.



ნახ. 7.9

უპირველეს ყოვლისა, უნდა დადგინდეს საანგარიშო ხარჯები ქსელის თითოეული უბნისათვის

$$Q_{3-4} = q_4;\ \ Q_{2-3} = q_4 + q_6;\ \ Q_{1-2} = q_4 + q_5 + q_6;\ \ Q_{2-5} = q_5;$$

$$Q_{3-6} = q_6.$$

გაანგარიშებას იწყებენ **მაგისტრალით** (მთავარი ხაზით). მაგისტრალად მიიღება ქსელის ყველაზე გრძელი ხაზი, რომელშიც სითხის მეტი რაოდენობა გაედინება. ასეთად მივიჩნიოთ მაგალითად, 1-2-3-4 ხაზი. გაანგარიშება წარმოებს შემდეგი თანამიმდევრობით:

1) მაგისტრალის თითოეული უბნისათვის (1-2, 2-3, 3-4) ვუშვებთ ე.წ. **ეკონომიკურ სიჩქარეს** ($v_{ეკ}$), რომელიც დიამეტრის ფუნქციაა

d, მ	0,10	0,20	0,25	0,30
$\upsilon_{ეკ}$, მ/წმ	0,75	0,90	1,10	1,25

ეკონომიკური სიჩქარე ის ოპტიმალური სიჩქარეა, რომლისთვისაც წყალსადენის ქსელის ღირებულება მინიმალური იქნება.

2) ეკონომიკური სიჩქარეების საშუალებით ვსაზღვრავთ მაგისტრალის ცალკეული უბნების დიამეტრებს

$$\omega = \frac{Q}{\upsilon_{\text{ეკ}}}; \quad d' = \sqrt{\frac{4\omega}{\pi}} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi\upsilon_{\text{ეკ}}}}.$$

d'-ის მიღებულ მნიშვნელობას ვამრგვალებთ უახლოეს (უდიდეს ან უმცირეს) სტანდარტულ d დიამეტრამდე.

3) ვიცით რა d დიამეტრი (და, მაშასადამე, K ხარჯის მახასიათებელიც) და Q ხარჯი, თითოეული უბნისათვის გამოვითვლით დაწნევის დანაკარგს:

$$h_{\text{სიგ}} = Q^2 \frac{l}{K^2}.$$

4) განვსაზღვრავთ მთლიან H დაწნევას, რომელიც წყალსადაწნეო კოშკში წყლის დონისა და მაგისტრალის ბოლო პუნქტის ნიშნულების სხვაობაა,

$$H = \sum h_{\text{სიგ}(1\text{-}4)} + h_{\text{თავ}(4)} + \nabla_4,$$

სადაც $\sum h_{\text{სიგ}(1\text{-}4)}$ არის დაწნევის სიგრძე დანაკარგების ჯამის მაგისტრალის სამივე უბანზე;

$h_{\text{თავ}(4)}$ – თავისუფალი დაწნევა მაგისტრალის ბოლო პუნქტში (4);

∇_4 – მისი ნიშნული.

თავისუფალი დაწნევის ($h_{\text{თავ}}$) სიდიდე დამოკიდებულია წყლის მომხმარებელზე. მაგალითად, საცხოვრებელი შენობებისათვის დადგენილია შემდეგი მნიშვნელობები: ერთსართულიანი შენობისათვის – 10 მ, ორსართულიანისათვის – 12 მ, სამსართულიანისათვის – 16 მ და ა.შ., ყოველი მომდევნო სართულიანისათვის – 16 მ და ა.შ., ყოველი მომდევნო სართულისათვის 4 მ ემატება.

ამგვარად, გაანგარიშების შედეგად გვეცოდინება დაწნევის მნიშვნელობა მაგისტრალის საწყის A წერტილში და დაწნევის დანაკარგის სიდიდე თითოეული უბნისათვის. მაგისტრალის დანარჩენ პუნქტებში დაწნევას გამოვთვლით ფორმულებით:

$$H_2 = H - h_{\text{სიგ}(1\text{-}2)}; \quad H_3 = H_{(2)} - h_{\text{სიგ}(2\text{-}3)}; \quad H_{(4)} = h_{\text{თავ}(4)}.$$

5) ვაგებთ პიეზომეტრულ წირს მაგისტრალისათვის. მისი აგება სირთულეს აღარ წარმოადგენს.

განშტოებათა გაანგარიშება პრინციპულად განსხვავდება მაგისტრალის გაანგარიშებისაგან. მაგისტრალის საწყისი პუნქტისათვის დაწნევის მნიშვნელობა მოცემული იყო, რის გამოც ვისარგებლეთ ეკონომიკური სიჩქარის ცნებით. განშტოებათა გაანგარიშებისას კი ცნობილია დაწნევის სიდიდე როგორც საწყისი, ისე ბოლო წერტილისათვის. ჩვენს შემთხვევაში 2-5 განშტოების თავსა და ბოლოში დაწნევის მნიშვნელობები $H_{(2)}$ და $h_{თავ(5)}$, ხოლო 3-6 განშტოებისათვის – $H_{(3)}$ და $h_{თავ(6)}$.

აღნიშნულის გათვალისწინებით, განშტოების გაანგარიშებას ვატარებთ შემდეგი თანამიმდევრობით:

1) განვსაზღვრავთ დაწნევის დანაკარგს განშტოებებზე:

$$h'_{სიგ(2-5)} = (\nabla_2 + H_{(2)}) - (\nabla_5 + h_{თავ(5)});$$

$$h'_{სიგ(3-6)} = (\nabla_3 + H_{(3)}) - (\nabla_6 + h_{თავ(6)}).$$

2) (7.21) ფორმულიდან გამოვთვლით ხარჯის მახასიათებლის მნიშვნელობებს ორივე განშტოებისათვის:

$$K'_{2-5} = Q_{2-5}\sqrt{\frac{l_{2-5}}{h'_{სიგ(2-5)}}};$$

$$K'_{3-6} = Q_{3-6}\sqrt{\frac{l_{3-6}}{h'_{სიგ(3-6)}}}.$$

3) მიღებული ხარჯის მახასიათებლის მნიშვნელობების მიხედვით ცხრილებიდან ვპოულობთ d'_{2-5} და d'_{3-6} დიამეტრებს, რომელთაც ვამრგვალებთ უახლოეს d_{2-5} და d_{3-6} სტანდარტულ მნიშვნელობებამდე.

4) d_{2-5} და d_{3-6} დიამეტრების მიხედვით გამოვთვლით K_{2-5} და K_{3-6} ხარჯის მახასიათებლებს და $h_{სიგ(2-5)}$ და $h_{სიგ(3-6)}$ ნამდვილ დაწნევის დანაკარგებს განშტოებებში.

გაანგარიშებისას შეიძლება აღმოჩნდეს, რომ

$$\nabla_2 + H_{(2)} < \nabla_5 + h_{სიგ(2-5)}$$

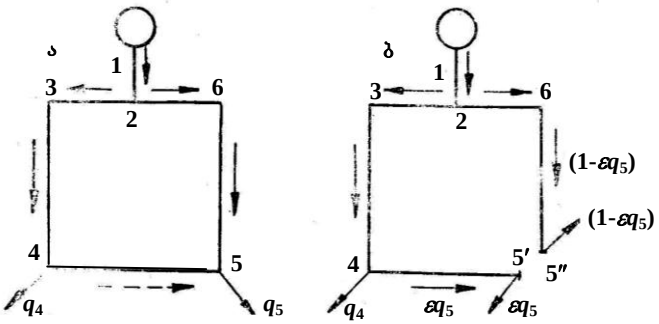
ან

$$\nabla_3 + H_{(3)} < \nabla_6 + h_{სიგ(3-6)}.$$

ეს ნიშნავს, რომ 2-5 და 3-6 განშტოებების ბოლო პუნქტებში აუცილებელი ხარჯების მიწოდება შეუძლებელია. ამიტომ, აღნიშნული თანაფარდობების შემთხვევაში უნდა დავსახოთ მაგისტრალის ახალი მიმართულება, მაგალითად, 1-2-3-6 და ხელახლა ჩავატაროთ გაანგარიშება.

შევნიშნავთ, რომ მაგისტრალის და განშტოებათა გაანგარიშებისას, მხედველობაში არ მიგვიღია დაწნევის ადგილობრივი დანაკარგები.

6. ჩაკეტილი (რგოლური) მილსადენის გაანგარიშების ძირითადი პრინციპი. ვთქვათ, გვაქვს ერთი რგოლისაგან შემდგარი ქსელი (ნახ. 7.10, ა), რომელშიც წყლის აღება ხდება ქსელის მე-4 და მე-5 წერტილებიდან. განვიხილოთ ასეთი მილსადენის ჰიდრავლიკური გაანგარიშების ერთ-ერთი ვარიანტი, როდესაც მოცემულია: ყველა მილის სიგრძე; წყალსადაწნეო კოშკში წყლის დონის ნიშნული; თავისუფალი დაწნევის მინიმალური მნიშვნელობები მე-3–6 საკვანძო წერტილებში; q_4 და q_5 ხარჯების სიდიდეები. უნდა განისაზღვროს მილების დიამეტრები.



ნახ. 7.10

ამოცანა ამოიხსნება შემდეგი თანამიმდევრობით:

ა) ავიღოთ მილების დიამეტრების მნიშვნელობები: ბ) იმის გამო, რომ წყლის აღება ხდება ქსელის მე-4 და მე-5 წერტილებიდან, წყლის მოძრაობის მიმართულება ყველა მილში, გარდა 4-5 მილებისა, წინასწარ ცნობილია. ამიტომ, პირობითად ვუშვებთ 4-5 მილში წყლის მოძრაობის მიმართულებას მარცხნიდან მარჯვნივ; გ) ვთვლით, რომ q_5 ხარჯიდან εq_5 ნაწილი მიეკუთვნება 4-5 ხაზს, ხოლო $(1-\varepsilon)q_5$ ნაწილი – 6-5 ხაზს. ε-ის შერჩევა თვითნებურია, თუმცა მოითხოვს დამგეგმარებლის გარკვეულ გამოცდილებას.

მილსადენის რგოლში გვაქვს ორი ნაკადი, რომელთაგან ერთი (2–3–4–5) მოძრაობს საათის ისრის საწინააღმდეგო, ხოლო მეორე (2–6–5) – საათის ისრის მოძრაობის მიმართულებით. ეს

ნაკადები თავს იყრის მე-5 წერტილში, რომელსაც **წყალგასაყარი (წყალგამყოფი) ან ნულოვანი წერტილი** ეწოდება. წყლის მოძრაობის მიმართულებად 4-5 მილში რომ მიგვეჩნია მიმართულება მარჯვნიდან მარცხნივ, მაშინ წყალგასაყარი მე-4 წერტილში აღმოჩნდებოდა.

იმის გასარკვევად, რამდენად სწორად შევარჩიეთ მილების დიამეტრები, ε სიდიდე და ნულოვანი წერტილის მდებარეობა, ჩვენ წარმოდგენაში მე-5 წერტილში რგოლი გავჭრათ და ჩვეულებრივი ფორმულებით გამოვთვალოთ დაწნევის დანაკარგები 1-2-3-4-5′ და 1-2-6-5″ უბნებისათვის ($h'_{სიგ}$ და $h''_{სიგ}$; ნახ. 7.10, ბ). თუ აღმოჩნდა, რომ $h'_{სიგ} = h''_{სიგ}$, მაშინ ჩავთვლით, რომ ჩვენ მიერ სწორად იქნა აღებული როგორც მილების დიამეტრები, ისე ε სიდიდე. თუ $h'_{სიგ} \neq h''_{სიგ}$, მაშინ უნდა შეიცვალოს დიამეტრებისა და ε-ის მნიშვნელობები, ზოგიერთ შემთხვევაში ნულოვანი წერტილის მდებარეობაც. გაანგარიშებას ვასრულებთ მანამდე, სანამ, თუნდაც მიახლოებით, არ შესრულდება პირობა $h'_{სიგ} = h''_{სიგ}$.

თავი VIII. სითხის დამყარებული თანაბარი მოძრაობა ღია კალაპოტებში (არხებში)

§ 8.1. ღია კალაპოტებში სითხის თანაბარი მოძრაობის თავისებურებანი. ძირითადი საანგარიშო დამოკიდებულებები

ამ თავში განვიხილავთ ღია კალაპოტებში სითხის ტურბულენტურ მოძრაობას **კვადრატული წინაღობის ზონაში.** შემთხვევები, როდესაც ჩვეულებრივ არხებში სითხის მოძრაობა პასუხობს წინაღობის გლუვკედლიან ან გარდამავალ ზონას, შედარებით იშვიათია.

ღია კალაპოტებში სითხის თანაბარი მოძრაობა შესაძლებელია იმ შემთხვევაში, თუ დაცულია შემდეგი პირობები: სითხის ხარჯი ნაკადის გასწვრივ მუდმივია ($Q = consr$); კალაპოტის ცოცხალი კვეთის ფორმა და ფართობი სიგრძეზე არ იცვლება ($\omega = const$); საშუალო სიჩქარეები ორ მეზობელ ცოცხალ კვეთში და ადგილობრივი გასაშუალებული სიჩქარეები ამ კვეთების მსგავს წერტილებში ერთმანეთის ტოლია. ამასთან, კალაპოტის სიგრძეზე $v = const$; ჰიდრავლიკური, პიეზომეტრული, კალაპოტის

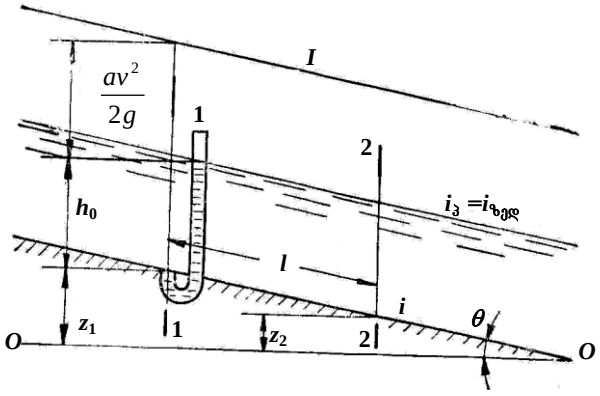
ფსკერის და ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ქანობები ტოლი და მუდმივია ($I = i_ვ = i_{ფსკ} = const$); ნაკადის გასწვრივ პრაქტიკულად არ იცვლება კალაპოტის სველი ზედაპირის ხორკლიანობის ხასიათი ($n = const$ ან $\Delta = const$); კალაპოტს არ აქვს ადგილობრივი წინაღობა.

მკაცრად რომ ვთქვათ, ასეთი მოძრაობა არც ბუნებრივ კალაპოტებში (მდინარეები და სხვ.) და არც ხელოვნურ წყალსადინარებში (არხები, ღარები, სითხით ნაწილობრივ შევსებული უდაწნეო მილები და გვირაბები და სხვ.) არ არსებობს. ბევრ შემთხვევაში, ხელოვნურ წყალსადენებში ნაკადის მოძრაობა პრაქტიკულად აკმაყოფილებს ზემოთ ჩამოთვლილ პირობებს. ამიტომ მოცემულ თავში განვიხილავთ ხელოვნური ნაგებობების (კერძოდ, არხების) ჰიდრავლიკური გაანგარიშების საკითხებს.

თანაბარი მოძრაობისას ნაკადის სიგრძეზე დაწნევის კარგვა ხდება მხოლოდ ფსკერის ნიშნულების შემცირების ხარჯზე. კალაპოტის ორ საანგარიშო კვეთში ფსკერის ნიშნულების სხვაობის $(z_1 - z_2)$ ფარდობას კვეთებს შორის მანძილთან (ℓ) **ფსკერის ქანობი** ეწოდება.

$$i = \frac{z_1 - z_2}{\ell} = \sin\theta\,, \qquad (8.1)$$

სადაც θ არის ჰორიზონტთან ფსკერის დახრის კუთხე (ნახ. 8.1).



ნახ. 8.1

ამგვარად, **თანაბარი მოძრაობისას ღია კალაპოტში ფსკერის ქანობი აუცილებლად დადებითი უნდა იყოს,** ე.ი. ფსკერის ნიშნულები ნაკადის მოძრაობის მიმართულებით აუცილებლად უნდა მცირდებოდეს.

იმის გამო, რომ i ფსკერის ქანობი, ჩვეულებრივ, მცირეა, არხში წყლის h_0 სიღრმეს ზომავენ ვერტიკალზე და არა ფსკერის ნორმალზე. **თანაბარი მოძრაობის შესაბამის h_0 სიღრმეს ნორმალური სიღრმე** ეწოდება.

თუ კალაპოტის ფსკერთან ან კედლებთან მივუერთებთ პიეზომეტრებს, შევნიშნავთ, რომ დონეები მათში ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის დონეზე დადგება. ნაკადის პიეზომეტრული ქანობი ($i_პ$) სითხის თავისუფალი ზედაპირის ქანობის ($i_ზედ$) და, მაშასადამე, ფსკერის ქანობის i ტოლია. მაგრამ თანაბარი მოძრაობისას v სიჩქარის მუდმივობის გამო, მუდმივია $\alpha v^2/2g$ სიჩქარითი დაწნევაც, ე.ი. პიეზომეტრული წირი სრული დაწნევის (ენერგიის) წირის პარალელურია და ჰიდრავლიკური ქანობი (I) პიეზომეტრულის ტოლია. ამიტომ, თუ (6.1) ფორმულასაც მივიღებთ მხედველობაში, გვექნება

$$i = i_პ = i_{ზედ} = I = \sin\theta . \tag{8.2}$$

არხების ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას თანაბარი მოძრაობის შემთხვევაში სარგებლობენ შემდეგი ძირითადი დამოკიდებულებებით:

$$Q = \omega v = const \quad \text{(ნაკადის გასწვრივ);} \tag{8.3}$$

$$Q = \omega c\sqrt{RI}$$

ანუ (8.2) გამოსახულების გათვალისწინებით

$$Q = \omega c\sqrt{Ri} ; \tag{8.4}$$

$$h_{სიგ} = \frac{v^2\ell}{c^2R} ; \tag{8.5}$$

$$i = \frac{h_{სიგ}}{\ell} = \frac{v^2}{c^2R} ; \tag{8.6}$$

$$h_{სიგ} = i\ell ; \tag{8.7}$$

$$K = \omega c\sqrt{R} ; \quad K = Q/\sqrt{i} ; \tag{8.8}$$

$$Q = K\sqrt{i} ; \quad i = Q^2/K^2 . \tag{8.9}$$

ზოგ შემთხვევაში სიჩქარის გამოსათვლელი შეზის ფორმულა – $v = c\sqrt{Ri}$ მოსახერხებელია, სხვა სახით ჩავწეროთ:

$$v = c\sqrt{Ri} = W\sqrt{i} , \tag{8.10}$$

სადაც

$$W = c\sqrt{R} \tag{8.11}$$

არის ე.წ. **სიჩქარის მოდული** ანუ **სიჩქარის მახასიათებელი**.

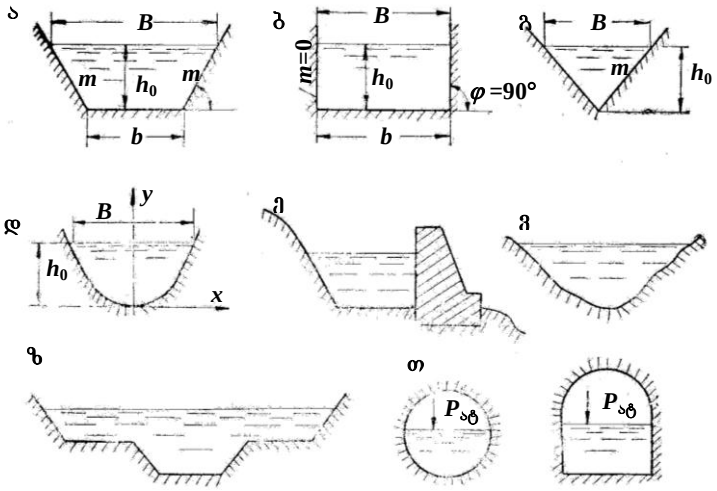
შეზის კოეფიციენტი ზემომოყვანილ ფორმულებში გამოითვლება ნ. პავლოვსკის ფორმულით

$$C = \frac{1}{n} R^{y}. \qquad (8.12)$$

უდაწნეო სადრენაჟო კოლექტორებისა და საკანალიზაციო მილების გაანგარიშებისას C კოეფიციენტის განსაზღვრისათვის ხშირად იყენებენ მანინგისა (4.83) და ი. აგროსკინის (4.82) ფორმულებს.

§ 8.2. არხის ცოცხალი კვეთის გეომეტრიული და ჰიდრავლიკური ელემენტები

პრაქტიკაში ხშირად გვხვდება 8.2 ნახაზზე ნაჩვენები სხვადასხვა ფორმის განივკვეთის მქონე არხები. ქვემოთ მოგვყავს დამოკიდებულებები მათი ჰიდრავლიკური ელემენტების გამოსათვლელად.



ნახ. 8.2

1. **სიმეტრიული ტრაპეციული განივკვეთი** (ნახ. 8.2, ა). აქ b არის არხის ფსკერის სიგანე; h_0 – არხის შევსების სიღრმე; m – ე.წ. არხის ფერდოს ქვედებულის კოეფიციენტი ან, მარტივად, ფერდოს კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს ფერდოს გრუნტის მდგრადობას, თუ არხის ფერდოები არაკლდოვანია

$$m = ctg\varphi; \tag{8.13}$$

B – ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის სიგანე არხში:

$$B = b + 2mh_0. \tag{8.14}$$

ცოცხალი კვეთის ფართობი (ω) და სველი პერიმეტრი (χ) გამოითვლება ფორმულებით:

$$\omega = (b + mh_0)h_0; \tag{8.15}$$

$$\chi = b + 2h_0\sqrt{1+m^2}. \tag{8.16}$$

ω-ს და χ-ს საშუალებით განისაზღვრება ჰიდრავლიკური რადიუსი

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{(b + mh_0)h_0}{b + 2h_0\sqrt{1+m^2}}. \tag{8.17}$$

არხების ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას ხშირად სარგებლობენ **არხის ფსკერის ფარდობითი სიგანით**:

$$\beta = \frac{b}{h_0}. \tag{8.18}$$

ცოცხალი კვეთის ფართობი და სველი პერიმეტრი β-ს საშუალებით ასე გამოისახება:

$$\omega = h_0^2(\beta + m); \tag{8.19}$$

$$\chi = h_0\left(\beta + 2\sqrt{1+m^2}\right). \tag{8.20}$$

2. **მართკუთხა (სწორკუთხა) განივკვეთი** (ნახ. 8.2, ბ). აქ

$$B = b;\ \ m = ctg90° = 0;\ \ \omega = bh_0;\ \ \chi = b + 2h_0. \tag{8.21}$$

ძალზე განიერი სწორკუთხა კალაპოტისათვის

$$\chi \approx b. \tag{8.22}$$

3. **სამკუთხა განივკვეთი** (ნახ. 8.2, გ). აქ

$$b = 0;\ \ B = 2mh_0;\ \ \omega = mh_0^2;\ \ \ \chi = 2h_0\sqrt{1+m^2}. \tag{8.23}$$

4. **პარაბოლური განივკვეთი** (ნახ. 8.2, დ). ასეთი კვეთი აიგება განტოლებით:

$$x^2 = 2py, \tag{8.24}$$

სადაც p არის პარაბოლის პარამეტრი.

ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის სიგანე (B) მოიძებნება (8.23) განტოლებიდან; ცოცხალ კვეთის ფართობი

$$\omega = \frac{2}{3}Bh. \tag{8.25}$$

$$\left.\begin{aligned}
&\chi \approx B, \text{ როცა } \frac{h_0}{B} \le 0{,}15;\\
&\chi \approx B\left[1+\frac{8}{3}\left(\frac{h_0}{B}\right)^2\right], \text{ როცა } \frac{h_0}{B} \le 0{,}33;\\
&\chi = 1{,}78h_0 + 0{,}61B, \text{ როცა } 0{,}33 < \frac{h_0}{B} < 2{,}0;\\
&\chi = 2h_0, \text{ როცა } 2{,}0 \le \frac{h_0}{B}.
\end{aligned}\right\} \qquad (8.26)$$

5. **სხვა სახის განივკვეთები:** ა) არასიმეტრიული პროფილი (ნახ. 8.2, ე); ბ) არასწორი პროფილი (ნახ. 8.2, ვ); გ) შედგენილი პროფილი (ნახ. 8.2, ზ); დ) ჩაკეტილი (შეკრული) პროფილი (ნახ. 8.2, თ).

არასიმეტრიული და არასწორი პროფილების შემთხვევაში ω და χ-ს გამოსათვლელად საჭიროა, განივკვეთი დავყოთ ცალკეულ ნაწილებად.

§ 8.3. არხის ჰიდრავლიკურად ხელსაყრელი კვეთი

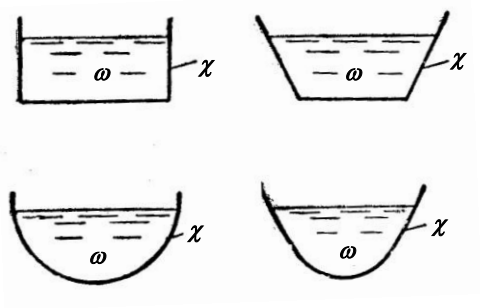
ხარჯის ფორმულა (8.4) შეიძლება სხვა სახით ჩავწეროთ, თუ გავითვალისწინებთ (5.22) და (8.12) გამოსახულებებს

$$Q = \omega C\sqrt{Ri} = \omega\frac{1}{n}R^y R^{0,5}\sqrt{i} = \omega\frac{1}{n}R^{y+0,5}\sqrt{i}\ ,$$

ანუ

$$Q = \omega\frac{1}{n}\left(\frac{\omega}{\chi}\right)^{y+0,5}\sqrt{i}\ . \qquad (8.27)$$

სხვადასხვა ფორმის განივკვეთის კალაპოტი (ნახ. 8.3) ერთი და იგივე ცოცხალი კვეთის ω ფართობის, ფსკერის i ქანობისა და კალაპოტის n ხორკლიანობისას, როგორც ეს (8.27) გამოსახულებიდან ჩანს, სხვადასხვა ხარჯს ატარებს და მისი სიდიდე დამოკიდებულია χ სველ პერიმეტრზე და, მაშასა-

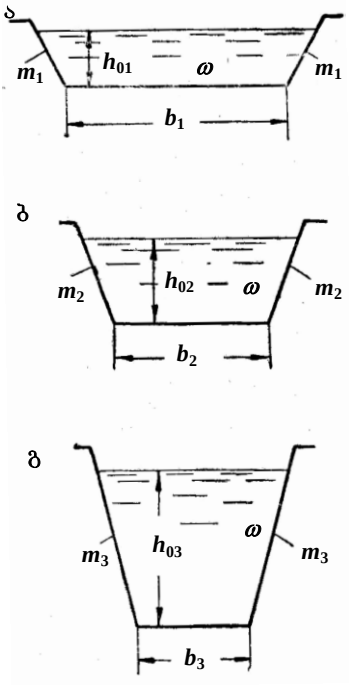


ნახ. 8.3

დამე, $R = \frac{\omega}{\chi}$ ჰიდრავლიკურ რადიუსზე. ამასთან, მეტ ხარჯს გაატარებს ის განივკვეთი, რომელსაც მაქსიმალური ჰიდრავლიკური რადიუსი ანუ მინიმალური სველი პერიმეტრი აქვს. ასეთ განივკვეთს **ჰიდრავლიკურად ხელსაყრელი კვეთი** ეწოდება.

8.3 ნახაზზე გამოსახული სხვადასხვა ფორმის კვეთებიდან უმცირესი სველი პერიმეტრით ხასიათდება ნახევრად წრიული განივკვეთი, ამიტომაც ის ჰიდრავლიკურად ხელსაყრელია. ასეთი კვეთის მქონე არხის ასაგებად სრულდება შედარებით ნაკლები სამუშაო, ვიდრე სხვა ფორმის კვეთის არხებისათვის. მაგრამ, სამშენებლო სამუშაოებისა და ექსპლუატაციის სირთულის გამო, ნახევრად წრიული კვეთის არხებს საინჟინრო პრაქტიკაში არ ახორციელებენ. უფრო ხშირად აიგება ტრაპეციული კვეთის არხები.

რადგან პრაქტიკაში ხშირია ტრაპეციული ფორმის არხების მშენებლობა, **თვით ტრაპეციულ კვეთებს შორის მოვძებნით ისეთი,** რომელიც სხვა თანაბარ პირობებში მაქსიმალური ჰიდრავლიკური რადიუსით ანუ მინიმალური სველი პერიმეტრით ხასიათდება, ე.ი. მოვძებნოთ **ტრაპეციული არხის ჰიდრავლიკურად ხელსაყრელი კვეთი** და დავადგინოთ გეომეტრიულ და ჰიდრავლიკურ ელემენტთა შორის თანაფარდობა. ცხადია, რომ ტრაპეციული არხის ცოცხალი კვეთის ფართობი $\omega = f(b, h_0, m)$ და, მაშასადამე, ამ სამი სიდიდის (b, h_0, m) ცვლილებით შეგვიძლია მივიღოთ განივი კვეთების განუსაზღვრელი რაოდენობა (ვარიანტი), რომელთა ცოცხალი კვეთის ფართობები ერთი და იგივე იქნება (ნახ. 8.4). თითოეული ამ ვარიანტთაგან ხასიათდება გარკვეული χ სველი პერიმეტრით და R ჰიდრავლიკური რადიუსით. თუ ყველა ამ შესაძლო ვარიანტიდან ამოვარჩევთ ისეთ კვეთს, რომლის სველი პერიმეტრი მინიმალურია, მაშინ მას ექნება ჰიდრავლიკური რადიუსის უდიდესი მნიშვნელობა და,



ნახ. 8.4

მაშასადამე, უდიდესი გამტარობის უნარი. ასეთი კვეთი იქნება სწორედ **ტრაპეციული არხის ჰიდრავლიკურად ხელსაყრელი კვეთი.**

ვიპოვოთ თანაფარდობა, რომლითაც განისაზღვრება ტრაპეციული არხის ჰიდრავლიკურად ხელსაყრელი კვეთი.

ვიცით, რომ ტრაპეციული კვეთისათვის სველი პერიმეტრი განისაზღვრება (8.16) ფორმულით:

$$\chi = b + 2h_0\sqrt{1+m}\,,$$

საიდანაც (8.15) გამოსახულების გათვალისწინებით მივიღებთ

$$\chi = \omega/h_0 - mh_0\sqrt{1+m^2}\,. \qquad (8.28)$$

ამგვარად, როცა $\omega = const$, სველი პერიმეტრი მხოლოდ არხის შევსების სიღრმის (h_0) ფუნქციაა – $\chi = f(h_0)$. როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, χ-ის მინიმალური მნიშვნელობისას კვეთი არის ჰიდრავლიკურად ხელსაყრელი. ამიტომ, სველი პერიმეტრის მინიმალური მნიშვნელობის დასადგენად (8.28) გამოსახულების პირველი წარმოებული გავუტოლოთ ნულს

$$\frac{d\chi}{dh_0} = -\frac{\omega}{h_0^2} - m + 2\sqrt{1+m^2} = 0\,.$$

მაგრამ (8.15) ფორმულიდან $\dfrac{\omega}{h_0^2} = \dfrac{b}{h_0} + m$, ამიტომ

$$\frac{d\chi}{dh_0} = -\frac{\omega}{h_0} - 2m + 2\sqrt{1+m^2} = 0 \quad \text{ანუ} \quad \frac{b}{h_0} = 2\left(\sqrt{1+m^2} - m\right).$$

(8.18) ფორმულის გათვალისწინებით **ტრაპეციული არხის** ჰიდრავლიკურად ხელსაყრელი კვეთისათვის მივიღებთ არხის ფსკერის ფარდობითი სიგანის მნიშვნელობას

$$\beta_{ჰ.უ} = 2\left(\sqrt{1+m^2} - m\right). \qquad (8.29)$$

თუ ვისარგებლებთ (8.19) და (8.20) ფორმულებით, ჰიდრავლიკური რადიუსის გამოსათვლელად მივიღებთ შემდეგ დამოკიდებულებას:

$$R_{ჰ.უ} = \frac{\omega}{\chi} = \frac{h_0^2\left(\beta_{ჰ.უ} + m\right)}{h_0\left(\beta_{ჰ.უ} + 2\sqrt{1+m^2}\right)} = \frac{h_0}{2}\,. \qquad (8.30)$$

ჰიდრავლიკურად ხელსაყრელი **სწორკუთხა კვეთისათვის,** თუ გავითვალისწინებთ, რომ ამ დროს არხის ფერდოს ქვედებულის კოეფიციენტი $m = 0$, ფსკერის ფარდობითი სიგანე, (8.18) და (8.29) ფორმულების თანახმად, ტოლი იქნება:

$$\beta_{ჰ.უ} = b/h_0 = 2 \quad \text{ანუ} \quad b = 2h_0\,. \qquad (8.31)$$

ჰიდრავლიკური რადიუსი ამ შემთხვევაშიც (სწორკუთხა კვეთისათვის) $R_{ჰ.უ} = \frac{h_0}{2}$.

$\beta_{ჰ.უ}$-ის მნიშვნელობები ჰიდრავლიკურად ხელსაყრელი ტრაპეციული კვეთისათვის აიღება სხვადასხვა m კოეფიციენტის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის. კერძოდ, როცა $m = 2$, $\beta_{ჰ.უ} = b/h_0 = 0{,}47$; როცა $m = 3$ $\beta_{ჰ.უ} = 0{,}32$ და ა.შ. ისე, რომ m-ის იმ მნიშვნელობებისათვის, რომლებიც პრაქტიკაში ხშირად გვხვდება, ჰიდრავლიკურად ხელსაყრელი ტრაპეციული კვეთის არხის ფსკერის სიგანე სიღრმის ნახევარზე ნაკლებია. ჩვეულებრივ, ტრაპეციული არხის ჰიდრავლიკურად ხელსაყრელი კვეთი 8.4, გ ნახაზზე ნაჩვენები ფორმისაა, ე.ი. ხასიათდება შევსების დიდი სიღრმით (h_0) და ფსკერის მცირე სიგანით (b).

შევნიშნავთ, რომ ჰიდრავლიკურად ხელსაყრელი კვეთი ეკონომიკურად ყოველთვის ხელსაყრელი არ არის.

§ 8.4. ტრაპეციული არხების ჰიდრავლიკური გაანგარიშების ძირითადი ამოცანები თანაბარი მოძრაობის შემთხვევაში

არხის გამტარობის უნარი განისაზღვრება მისი ფორმით, ზომებით, ხორკლიანობითა და ქანობით. მაშასადამე, ტრაპეციული კვეთის არხი ხასიათდება შემდეგი ექვსი სიდიდით: b, h_0, m, n, i, Q (ან $v = \frac{Q}{\omega}$). მათგან პირველი სამი (b, h, m) მთლიანად განსაზღვრავს არხის ცოცხალი კვეთის ზომებს. ჰიდრავლიკური გაანგარიშების ამოცანა იმაშია, რომ აღნიშნული ექვსი სიდიდიდან ვიპოვოთ ერთ-ერთი, თუ ცნობილია დანარჩენი ხუთი[1].

I. **ამოცანები, რომლებშიც მოცემულია არხის ცოცხალი კვეთი, ე.ი. ცნობილია b, h_0 და m სიდიდეები.** ასეთი ამოცანები ამოიხსნება უშუალოდ საძიებელი სიდიდის შერჩევის გარეშე.

ამოცანა 1. მოცემულია: b, h_0, m, n, i. განვსაზღვროთ არხის ხარჯი Q. ამოცანის ამოხსნა:

1) (8.15) და (8.16) ფორმულებით გამოვთვლით ω-ს და χ-ს;

2) ვპოულობთ $R = \omega/\chi$;

[1] როგორც წესი, ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისათვის m კოეფიციენტი მოცემულია.

3) R და n-ის მიხედვით (8.12) ფორმულით ვპოულობთ C-ს მნიშვნელობას;

4) C და R-ის მიხედვით (8.10) ფორმულით განვსაზღვრავთ v-ს;

5) v და ω-ს საშუალებით ვპოულობთ Q ხარჯს: $Q = \omega v$.

ამოცანა 2. მოცემულია: b, b_0, m, n, Q. განვსაზღვროთ არხის ფსკერის ქანობი i.

ამოცანის ამოხსნა:

1) ისევე, როგორც ზემოთ, ვპოულობთ ω, χ, R, C სიდიდეებს;

2) (8.3) ფორმულიდან განვსაზღვრავთ v-ს;

3) (8.6) ფორმულით გამოვითვლით i-ს.

II. **ამოცანები, რომლებშიც არხის ცოცხალი კვეთი მოცემული არ არის, ე.ი. საძიებელია b ან h_0**. ასეთი ამოცანები ამოიხსნება საძიებელი სიდიდის შერჩევით.

ამოცანა 3. მოცემულია: m, b, n, i, Q. განვსაზღვროთ არხის შევსების h_0 სიღრმე.

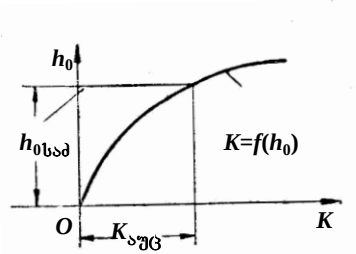
ამოცანის ამოხსნა:

1. მოცემული არხისათვის (8.8) ფორმულით გამოვთვლით ხარჯის მახასიათებელს, რომელსაც აუცილებელი ხარჯის მახასიათებელი ეწოდება: $K_{\text{აუც}} = Q/\sqrt{i}$;

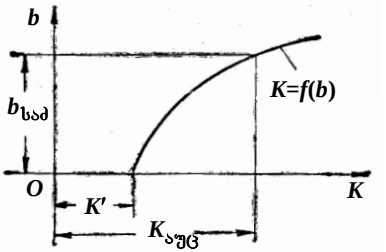
2. ყოველი h_0-სთვის გამოვთვლით შესაბამისი ხარჯის მახასიათებელს. გამოთვლებს ვატარებთ ცხრილური ფორმით:

№№	სიდიდე ან საანგარიშო ფორმულა	განზომილება	დაშვებული და საძიებელი სიდიდეების რიცხვითი მნიშვნელობები				შენიშვნა
1	h_0	მ	h_{01}	h_{02}		h_{0n}	
2	mh_0	მ					$m =$
3	$b + mh_0$	მ					$b =$
4	$\omega = (b + mh_0)h_0$	მ^2					
5	$h_0(2\sqrt{1+m^2})$	მ					$2\sqrt{1+m^2} =$
6	$\chi = b + h_0(2\sqrt{1+m^2})$	მ					
7	$R = \omega/\chi$	მ					
8	C	მ$^{0.5}$/წმ					ფორმულით, როცა $n =$
9	$\sqrt{R}$	მ$^{0.5}$					
10	$K = \omega C\sqrt{R}$	მ^3/წმ					

3. ცხრილის პირველი და მეათე სტრიქონის მონაცემებით ვაგებთ გრაფიკს (ნახ. 8.5) $K = f(h_0)$;



ნახ. 8.5.



ნახ. 8.6

4. გრაფიკიდან $K_{აუც}$ ხარჯის მახასიათებლის მიხედვით ვპოულობთ არხის შევსების საძიებელ $h_{0,საძ}$ სიღრმეს.

$K = f(h)$ მრუდი ამოზნექილობით მიმართულია ზემოთ და გადის კოორდინატთა სათავეზე. როცა $h_0 = 0$-ს, ხარჯის მახასიათებელიც ნულის ტოლია, $K = 0$.

ამოცანა 4. მოცემულია m, h_0, n, i, Q. განვსაზღვროთ არხის ფსკერის b სიგანე.

ამოცანის ამოხსნა:

1. ვპოულობთ $k_{აუც}$ ხარჯის მახასიათებელს: $K_{აუც} = Q/\sqrt{i}$;

2. ყოველი b-სთვის ზემოთ მოყვანილი ფორმულებით (ამოცანა 3) გამოვთვლით შესაბამისი ხარჯის მახასიათებელს;

3. ვაგებთ გრაფიკს (8.6) $K = f(b)$, რომლის საშუალებით ვპოულობთ საძიებელ b სიგანეს.

$K = f(b)$ მრუდი არ გადის კოორდინატთა სათავეზე. K' ხარჯის მახასიათებელი (ნახ. 8.6) შეესაბამება სამკუთხა კალაპოტს, რომლისთვისაც $b = 0$-ს.

ამოცანა 5. მოცემულია: m, n, i, Q, β. განვსაზღვროთ h_0 და b.

ამოცანის ამოხსნა:

1. განვსაზღვრავთ $k_{აუც}$ ხარჯის მახასიათებელს: $K_{აუც} = Q/\sqrt{i}$;

2. ვადგენთ ცხრილს (მე-3 ამოცანისათვის შედგენილი ცხრილის ფორმით), რომელსაც ვუმატებთ ერთ სტრიქონს $b = \beta h_0$. h_0 მნიშვნელობების შერჩევით გამოვთვლით b-ს და k-ს შესაბამის მნიშვნელობებს;

3. ვაგებთ გრაფიკს $K = f(h)$, რომლის საშუალებით ვპოულობთ $h_{0საძ}$ სიდიდეს;

4. $b_{საძ} = \beta h_{0საძ}$ ტოლობიდან გამოვთვლით $b_{საძ}$ სიდიდეს.

III. **ამოცანები, რომლებშიც მოცემული სიდიდეთაგან ერთერთი *v* საშუალო სიჩქარეა**.

ამოცანა 6. მოცემულია: m, b, h_0, n, v. განვსაზღვროთ i.

ამოცანის ამოხსნა:

1. (8.15) ფორმულით გამოვთვლით ω-ს;

2. (8.3) ფორმულით ვსაზღვრავთ Q ხარჯს;

3. (8.6) ფორმულით ვპოულობთ i ქანობს (C და R-ს გამოვთვლით ზემოთ მოყვანილი დამოკიდებულებებით. მაგალითად, იხ. ამოცანა 1).

ასევე მარტივად წყდება ამ ჯგუფის სხვა ამოცანებიც, რის გამო მათი ამოხსნა აღარ მოგვყავს.

§ 8.5. არხში წყლის მოძრაობის მინიმალური და მაქსიმალური დასაშვები სიჩქარეები. სიჩქარეთა განაწილება ნაკადის ცოცხალ კვეთში

საშუალო სიჩქარეები არხებში შემოფარგლულია ზედა და ქვედა ზღვრებით. ზღვრულ საშუალო სიჩქარეებს **დასაშვებს** უწოდებენ. დასაშვები სიჩქარის ზედა ზღვარი დამოკიდებულია არხის სამოსის (ან გრუნტის) უნარზე წინააღმდეგობა გაუწიოს მის წარეცხვას. მაქსიმალურ დასაშვებ სიჩქარეს ($v_{მაქს}$) **არაწამრეცხი** ეწოდება.

დასაშვები სიჩქარის ქვედა ზღვარს ადგენენ იმ პირობიდან, რომ არ მოხდეს არხის დალამვა შეტივტივებული ნატანით, რასაც მინიმალურ დასაშვებ სიჩქარეთა ($v_{მინ}$) **არადამლამავი სიჩქარე** ეწოდება.

არხის გრუნტებისა და ხელოვნურ გამაგრებათა მრავალგვაროვნება არ იძლევა არაწამრეცხი და არადამლამავი სიჩქარეების ნორმატივების ზუსტად დადგენის საშუალებას. თუმცა მრავალრიცხოვანი გამოკვლევები და არხების ექსპლუატაციის დიდი გამოცდილება უფლებას გვაძლევს ვიმსჯელოთ ზღვრულ სიჩქარეთა პრაქტიკულ მნიშვნელობებზე, ამა თუ იმ სახის გრუნტისა და გამაგრებისათვის.

ამგვარად, წყლის მოძრაობის v საშუალო სიჩქარე დასაპროექტებელ არხში უნდა აკმაყოფილებდეს შემდეგ ორ ძირითად

პირობას – საშუალო სიჩქარის მოცემული მნიშვნელობისას არ უნდა ხდებოდეს ნაკადის მიერ კალაპოტის გრუნტის (ან სამოსის, მოპირკეთების) წარეცხვა და ნაკადის ტრანსპორტირების უნარი არ უნდა შემცირდეს იმდენად, რომ მოხდეს შეტივტივებული ნატანის არხში დალამვა. ე.ი. v საშუალო სიჩქარე უნდა აკმაყოფილებდეს შემდეგ პირობას:

$$v_{\text{მინ}} < v < v_{\text{მაქს}}. \tag{8.32}$$

თვლიან, რომ როცა $v > v_{\text{მაქს}}$, არხის კალაპოტი წაირეცხება, როცა $v > v_{\text{მინ}}$, არხის კალაპოტი დაილამება შეტივტივებული ნატანით.

(8.32) პირობა იძლევა იმის გარანტიას, რომ არხი იქნება „სტატიკურად მდგრადი“ და ექსპლუატაციის პროცესში არ მოხდება მისი არსებითი დეფორმაცია.

ზოგჯერ არხის დაპროექტებისას არ ხერხდება $v > v_{\text{მინ}}$ პირობის დაცვა. ასეთ შემთხვევაში საჭირო ხდება არხის პერიოდული გაწმენდა დალექილი ნატანისაგან. რაც შეეხება $v < v_{\text{მაქს}}$ პირობას, ის ყოველთვის დაცული უნდა იყოს: თუ გაანგარიშების პირველ ეტაპზე აღმოჩნდა, რომ $v > v_{\text{მაქს}}$, საჭიროა, განვახორციელოთ ღონისძიება, რომელიც საშუალებას მოგვცემს გავზარდოთ $v_{\text{მაქს}}$ სიჩქარე ან შევამციროთ v საშუალო სიჩქარე, რათა მივაღწიოთ $v < v_{\text{მაქს}}$ პირობის შესრულებას. $v_{\text{მაქს}}$ სიჩქარის მნიშვნელობის გასაზრდელად არხის ფერდოებსა და ფსკერს ამაგრებენ სხვადასხვა კონსტრუქციის სამოსით. თუ v საშუალო სიჩქარის შესამცირებლად შეცვლიან არხის განივკვეთის ფორმას ისე, რომ მისი ჰიდრავლიკური რადიალური რადიუსი შემცირდეს, ქმნიან ხელოვნურ ხორკლიანობას ან ამცირებენ არხის ფსკერის ქანობს.

არაბმული გრუნტებისათვის (ქვიშოვანი, ხრეშიანი და სხვა) დასაშვები (არაწამრეცხი) $v_{\text{მაქს}}$ სიჩქარის გამოსათვლელად შეიძლება ვისარგებლოთ ი. ლევის ემპირიული ფორმულით:

$$v_{\text{მაქს}} = A\sqrt{gd}\,\lg\frac{R}{7d}, \tag{8.33}$$

სადაც R არის არხის კვეთის ჰიდრავლიკური რადიუსი; d – გრუნტის ნაწილაკების საშუალო დიამეტრი; A – კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს გრუნტის შემჭიდროებულობას (შემკვრივებულობას). კარგად შემკვრივებული გრუნტებისათვის $A = 3{,}2$, შედარებით ფხვიერი გრუნტებისათვის – $A = 2{,}8$.

(8.33) ფორმულა გამოიყენება $R/d = 50\cdots5000$ ფარგლებში.

მაქსიმალური დასაშვები $v_{მაქს}$ სიჩქარის მნიშვნელობები სხვადასხვა გრუნტისა და კონსტრუქციის მოპირკეთებისათვის მოცემულია საცნობარო ლიტერატურაში.

მინიმალური დასაშვები $v_{მინ}$ სიჩქარის გამოსათვლელად ასევე ვსარგებლობთ ი. ლევის ფორმულით:

$$v_{მინ} = 0{,}01\frac{\omega}{\sqrt{d}}\sqrt[4]{\frac{p}{0{,}01}}\frac{0{,}0225}{n}\sqrt{R}\,, \qquad (8.34)$$

სადაც ω არის შეტივტივებული ნაწილაკების **ჰიდრავლიკური სისხო[1],** მ/წმ; d – შეტივტივებული ნატანის ნაწილაკების საშუალო დიამეტრი, მმ; p – შეტივტივებული ნატანის იმ ნაწილაკების ნაჯერობა (პროცენტობით), რომელთა $d_{საშ} \geq 0{,}25$ მმ; n – კალაპოტის ხორკლიანობის კოეფიციენტი; R – ჰიდრავლიკური რადიუსი, მ.

მინიმალური დასაშვები სიჩქარის მნიშვნელობები შეიძლება განსაზღვრულ იქნეს სხვა ემპირიული დამოკიდებულებებითაც.

უნდა აღინიშნოს, რომ კალაპოტის წარეცხვაზე გავლენას ახდენს ადგილობრივი სიჩქარეები ფერდოებსა და ფსკერთან. კვეთში $v_{მინ}$ და $v_{მაქს}$ საშუალო სიჩქარეებით გაანგარიშება პირობითია და მართებული. თანაბარი მოძრაობისათვის, რომლისთვისაც საშუალო და ადგილობრივი სიჩქარეები დაკავშირებულია გარკვეული ნახევრად ემპირიული დამოკიდებულებებით. ასე, მაგალითად, ხორკლიანი ზედაპირებისათვის არხის ფსკერიდან y მანძილით დაცილებულ წერტილში გასაშუალებული ადგილობრივი სიჩქარე ასე შეიძლება განვსაზღვროთ:

$$\bar{u} = 5{,}75\frac{\sqrt{gR}}{W}v\lg\frac{30y}{\Delta_{ეკვ}}\,, \qquad (8.35)$$

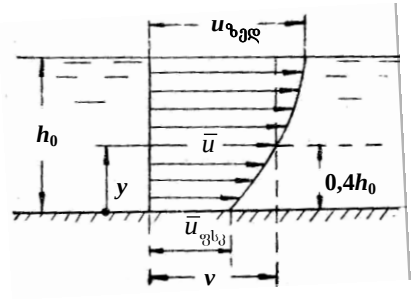
სადაც W არის სიჩქარის მოდული და გამოითვლება (8.11) ფორმულით; $\Delta_{ეკვ}$ – ეკვივალენტური ხორკლიანობა.

არხის ცოცხალ კვეთში სიჩქარეთა განაწილება ლოგარითმული კანონით (8.35 ფორმულის თანახმად) მოცემულია 8.7 ნახაზზე. (8.35) გამოსახულება ვერ ასახავს რეალურ სურათს უშუალოდ ფსკერთან მახლობლობაში. ამიტომ, ფსკერული სიჩქარე შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით:

$$\bar{u}_{ფსკ} = \frac{1{,}25v}{\lg\dfrac{6{,}15h_0}{\Delta_{ეკვ}}}\,. \qquad (8.36)$$

[1] ჰიდრავლიკური სისხო არის მდგარ წყალში მყარი ნაწილაკის თანაბარი ვარდნის სიჩქარე. ამ ცნებას მოგვიანებით გავეცნობით.

$\bar{u}_{\text{ფსკ}}$ ფსკერულ სიჩქარეში იგულისხმება სიჩქარე სასაზღვრო შრისა და ტურბულენტური ბირთვის საკონტაქტო ზედაპირის გასწვრივ. უშუალოდ ფსკერზე სიჩქარე ნულის ტოლია – სითხის ნაწილაკები ეკვრის ფსკერს და კედლებს.



ნახ. 8.7

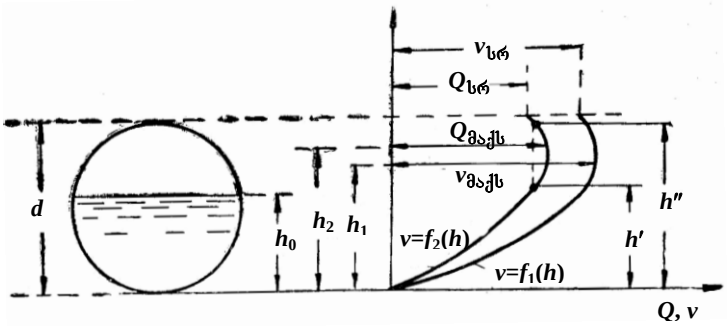
მაქსიმალური ადგილობრივი სიჩქარე $u_{\text{ზედ}}$ მიიღება სითხის თავისუფალ ზედაპირზე $(y = h_0)$, ფსკერიდან $y = 0{,}4h_0$ მანძილზე. ადგილობრივი სიჩქარე დაახლოებით საშუალო სიჩქარის ტოლია: $\bar{u} \approx v$.

§ 8.6. ჩაკეტილი განივკვეთის კალაპოტების (უდაწნეო მილების) ჰიდრავლიკური გაანგარიშება

საკანალიზაციო ქსელების, სადრენაჟო სისტემების, ქალაქის სანიაღვრო კოლექტორების, საგზაო მილების, ჰიდროელექტროსადგურების წყალსაგდები გვირაბების და სხვა ანალოგიურ ნაგებობათა განივკვეთის ფორმა შეიძლება იყოს წრიული, ოვალოიდური, ღარისებრი, ვარცლისებრი და სხვ. ეს წყალსადინარები მუშაობს უდაწნეოდ, ამიტომ, ჰიდრავლიკური თვალსაზრისით ისინი არაფრით არ განსხვავდება ღია არხებისაგან. შემოვიფარგლებით წრიული კვეთის უდაწნეო მილების განხილვით.

1. **საკანალიზაციო მილი**. h_0-ით აღვნიშნოთ მილის შევსების სიღრმე, ხოლო d-თი – დიამეტრი (ნახ. 8.8) $a = h_0/d$ ფარდობას **მილის შევსების ხარისხს** უწოდებენ, პრაქტიკაში, ჩვეულებრივ, 0,50÷0,75-ის შევსების ხარისხის ტოლად იღებენ. წრიული კვეთის მაგალითზე გავეცნოთ თავისებურებას, რომლითაც ხასიათდება ჩაკეტილი პროფილები.

ცოცხალი კვეთის დასაწყისში, შედარებით მცირე შევსებისას, სწრაფად იზრდება, რადგან ხდება პროფილის სიგანის ზრდა სიღრმესთან ერთად. შემდეგ, როდესაც შევსება ნახევარ წრეს გადასცილდება, ცოცხალი კვეთის ზრდის ინტენსიურობა კლებულობს, რადგანაც სიღრმის ზრდით პროფილის სიგანე კი არ იზრდება, არამედ მცირდება. ბოლოს, სრული შევსების სიახლოვეს, ცოცხალი კვეთის ფართობის ზრდა მინიმალური ხდება.



ნახ. 8.8

რაც შეეხება სველ პერიმეტრს, პირიქით, ცოცხალი კვეთის ფართობის მაქსიმალურ ზრდის ზონაში (კვეთის ცენტრზე გამავალი ჰორიზონტალური ღერძის ზონაში) სველი პერიმეტრის ზრდა მინიმალური იქნება და მიაღწევს მაქსიმუმს კვეთის სრული შევსების მომენტში.

აღნიშნულის გამო, ჰიდრავლიკური რადიუსი დასაწყისში იზრდება; გარკვეული შევსებისას მიაღწევს თავის მაქსიმუმს, შემდეგ კვლავ დაიწყებს შემცირებას კვეთის სრული შევსების მომენტამდე.

თეორიული ანალიზის საფუძველზე დადგენილია, რომ წრიული კვეთისათვის ჰიდრავლიკური რადიუსის და, მაშასადამე, დინების სიჩქარის მაქსიმალური მნიშვნელობა შეესაბამება $h_1 \approx (0{,}80\ldots0{,}85)d$ შევსების სიღრმეს, ხოლო ხარჯის მაქსიმალური მნიშვნელობა $h_2 \approx (0{,}93\ldots0{,}95)d$.

8.8 ნახაზზე მოცემულია $v = f_1(h)$ და $Q = f_2(h)$ დამოკიდებულებათა გრაფიკები. როგორც გრაფიკიდან ჩანს, Q ხარჯს, რომელიც მოთავსებულია $Q_{სრ} < Q < Q_{მაქს}$ ფარგლებში (სადაც $Q_{სრ}$ სრული შევსების შესაბამისი ხარჯია), უდაწნეო მილში თანაბარი მოძრაობისას შევსების ორი სიღრმე ($h' < h_2$ და $h'' < h_2$) შეესაბამება.

საკანალიზაციო მილებისათვის ხორკლიანობა (n) 0,012...0,014 ზღვრებშია, მიუხედავად მილსადენების კედლების მასალისა. ეს გამოწვეულია იმით, რომ საკანალიზაციო მილების კედლები დროთა განმავლობაში ნალექით იფარება, რაც მნიშვნელოვნად ამცირებს სხვადასხვა მასალის ხორკლიანობის განსხვავებას.

იმის გამო, რომ ჩაკეტილი პროფილების შემთხვევაში ცოცხალი კვეთის გეომეტრიული და ჰიდრავლიკური ელემენტების გამოთვლა რამდენადმე გართულებულია, პრაქტიკული გაანგარიშებისათვის სარგებლობენ საცნობარო ლიტერატურაში მოყვანილი საანგარიშო ცხრილებითა და გრაფიკებით.

წრიული კვეთის საკანალიზაციო მილების ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას ხშირად გვიხდება შემდეგი ორი სახის ამოცანის გადაწყვეტა:

1) მოცემულია: d, a, i. უნდა განვსაზღვროთ Q ხარჯი.

2) მოცემულია: d, a, Q. უნდა განვსაზღვროთ i ქანობი.

ამ ამოცანების ამოხსნის თანამიმდევრობა ასეთია:

სრული შევსების ($h=d$ ანუ $a=1$) შესაბამისი ხარჯისა და სიჩქარის მახასიათებლები (მოდულები) აღვნიშნოთ $K_{სრ}$ და $W_{სრ}$-ით:

$$K_{სრ}=\frac{Q_{სრ}}{\sqrt{i}}; \quad W_{სრ}=\frac{v_{სრ}}{\sqrt{i}}. \tag{8.37}$$

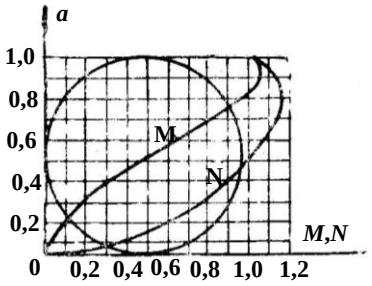
მოცემული d დიამეტრის მიხედვით საცნობარო ლიტერატურაში მოყვანილი ცხრილებიდან ვიპოვოთ $K_{სრ}=f(d)$ და $W_{სრ}=f(d)$.

შემოვიტანოთ აღნიშვნები:

$$\frac{K}{K_{სრ}}=M; \quad \frac{W}{W_{სრ}}=N, \tag{8.38}$$

სადაც K და W არის მილში ნამდვილი h სიღრმის შესაბამისი ხარჯი და მახასიათებლები.

M და N სიდიდეები დამოკიდებულია მხოლოდ მილის კვეთის ფორმასა და $a=h/d$ შევსების ხარისხზე. წრიული კვეთისათვის $M=f_1(a)$ და $N=f_2(a)$ მნიშვნელობები შეიძლება ავიღოთ გრაფიკიდან (ნახ. 8.9).



ნახ. 8.9

(8.9) და (8.10) ფორმულები ასეთი სახით წარმოვადგინოთ:

$$Q=K\sqrt{i}=K_{სრ}\frac{K}{K_{სრ}}\sqrt{i};$$

$$v=W\sqrt{i}=W_{სრ}\frac{W}{W_{სრ}}\sqrt{i}.$$

(8.38) გამოსახულებების გათვალისწინებით გვექნება:

$$Q=MK_{სრ}\sqrt{i}; \quad v=NW_{სრ}\sqrt{i}. \tag{8.39}$$

პირველი ტიპის ამოცანის ამოსახსნელად მოცემული d დიამეტრისათვის ცხრილებიდან ვპოულობთ $K_{სრ}$ და $W_{სრ}$; გრაფიკიდან (ნახ. 8.9) a შევსების ხარისხის მიხედვით M და N და (8.39) ფორმულებით გამოვთვლით Q და v.

საკანალიზაციო მილების გაანგარიშებისას მიიღება მინიმალური დასაშვები სიჩქარის შემდეგი მნიშვნელობები: $v_{მინ} = 0,7$ მ/წმ, თუ $d \le 0,5$ მ და $v_{მინ} = 0,8$ მ/წმ, თუ $d > 0,5$ მ. მაქსიმალური დასაშვები სიჩქარე ლითონის მილებისათვის მიიღება $v_{მაქს} = 8,0$ მ/წმ, ხოლო არალითონური მილებისათვის – 4,0 მ/წმ.

2. **სადრენაჟო მილი.** სადრენაჟო მილები გამოიყენება გრუნტის წყლების დასაშრობად. გრუნტის წყალი მილში შედის კედელში არსებული ნახვრეტებიდან, გაედინება მასში და გადადის წყალშემკრებ კოლექტორში.

სადრენაჟო მილის გაანგარიშება საკანალიზაციო მილის გაანგარიშების ანალოგიურია, მხოლოდ იმ განსხვავებით, რომ სადრენაჟო მილისათვის შევსების ხარისხს ღებულობენ ერთის ტოლად $(a = 1)$. მიუხედავად ამისა, სადრენაჟო მილს მაინც უდაწნეოდ თვლიან, რადგანაც კედელში არსებული ნახვრეტების გამო ნაკადის ზედაპირზე წნევა ატმოსფერულის ტოლად მიიღება.

წრიული კვეთის სადრენაჟო მილებისათვის გვექნება შემდეგი საანგარიშო დამოკიდებულებები:

$$h_0 = d\ ;\ \ \omega = \frac{\pi d^2}{4}\ ;\quad \chi = \pi d\ ;\quad R = d/4\ ; \tag{8.40}$$

$$v = c\sqrt{Ri} = c\sqrt{\frac{d}{4}}\sqrt{i} = 0,5c\sqrt{di}\ ; \tag{8.41}$$

$$Q = \frac{\pi d^2}{4}v = \frac{\pi d^2}{4}0,5c\sqrt{di} = \frac{5}{8}cd^{\frac{5}{2}}\sqrt{i}\ . \tag{8.42}$$

სადრენაჟო მილების ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას შეზის კოეფიციენტის გამოსათვლელად ხშირად სარგებლობენ კუტერის ემპირიული ფორმულით:

$$C = \frac{100}{1 + \dfrac{n}{\sqrt{R}}} = \frac{100}{1 + \dfrac{2n}{\sqrt{d}}}\ , \tag{8.43}$$

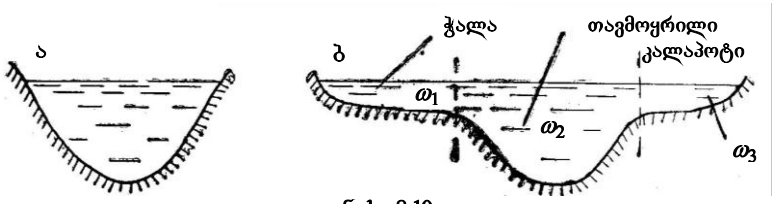
სადაც K არის ხორკლიანობის კოეფიციენტი (კუტერის მიერ შედგენილი ცხრილით) და თუნის მილებისათვის 0,27-ის ტოლია.

თუნის სადრენაჟო მილებისათვის მინიმალური დასაშვები სიჩქარე $v_{მინ} = 0,20$ მ/წმ, ხოლო მაქსიმალური დასაშვები სიჩქარე $v_{მაქს} = 1,0$ მ/წმ.

§ 8.7. ბუნებრივი კალაპოტების გაანგარიშება თანაბარი მოძრაობისას

ჩვეულებრივ, განასხვავებენ **თავმოყრილ** კალაპოტს (ნახ. 8.10, ა) და კალაპოტს ჭალით (ნახ. 8.10, ბ). ასეთ კალაპოტებში წყლის ნაკადის მოძრაობაზე მრავალი ფაქტორი მოქმედებს, რაც ართულებს ჰიდრავლიკური რადიუსისა და საშუალო სიჩქარის გამოთვლას. ასე, მაგალითად, კალაპოტის ხორკლიანობა როგორც მის ცალკეულ უბნებზე, ისე ძირითად კალაპოტსა და ჭალაში, შეიძლება ერთმანეთისაგან მკვეთრად განსხვავებული იყოს, რაც გამორიცხავს ნაკადის ჰიდრავლიკური ელემენტების ზუსტ მნიშვნელობათა განსაზღვრას.

ხშირ შემთხვევაში, თავმოყრილი კალაპოტი (ნახ. 8.10, ა) შეიძლება შევცვალოთ წესიერი გეომეტრიული ფიგურით და, საერთოდ, განვაზოგადოთ ბუნებრივი კალაპოტების სახეები:



ნახ. 8.10

ფართო მცირე სიღრმის მქონე კალაპოტი. თუ ნაკადის ფარდობითი სიღრმე $\frac{h_0}{B} < \frac{1}{20}$, მაშინ შეიძლება მივიღოთ, რომ $\chi \approx B$, $\omega \approx Bh_0$ და $R \approx h_0$. ასეთ შემთხვევაში საანგარიშო ფორმულებს ექნება შემდეგი სახე:

$$v = C\sqrt{h_0 i}\ ; \quad Q = CBh_0^{3/2} i^{1/2}. \tag{8.44}$$

ფართო პარაბოლური კალაპოტი. თუ ჩავთვლით, რომ კალაპოტს აქვს ფართო პარაბოლის სახე, ხოლო ნაკადის სიღრმე (h_0) სიგანესთან (B) შედარებით მცირეა, მაშინ შეიძლება მივიღოთ, რომ $\chi \approx B$. ასეთ შემთხვევაში საანგარიშო დამოკიდებულებებს ექნება შემდეგი სახე:

$$\left.\begin{aligned} &v = C\sqrt{\frac{2}{3}h_0 i};\ \omega = \frac{2}{3}Bh_0;\ R = \frac{2}{3}h_0; \\ &Q = 0{,}54CBh_0^{3/2} i^{1/2}. \end{aligned}\right\} \tag{8.45}$$

ფართო სამკუთხა კალაპოტი. ფართო სამკუთხა და მცირე სიღრმის კალაპოტისათვის $\chi \approx B$. მაშინ

$$\left.\begin{aligned} v &= C\sqrt{0{,}5h_{0i}}; \\ Q &= \frac{Bh_0}{2}C\sqrt{0{,}5h_{0i}} = 0{,}354C(m_1+m_2)h_0^{5/2}i^{1/2}, \end{aligned}\right\} \qquad (8.46)$$

სადაც m_1 და m_2 კალაპოტის ფერდოების (ნაპირების) კოეფიციენტებია.

კალაპოტი ჭალით (ნახ. 8.10, ბ). ასეთი კალაპოტის ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისათვის, როგორც წესი, გამოიყოფა ძირითადი კალაპოტი ω_2 ცოცხალი კვეთის ფართობით და ω_1 და ω_3 ჭალების ფართობებით. შემდეგ თითოეული ნაწილი განიხილება, როგორც დამოუკიდებელი კალაპოტი.

იმის გამო, რომ ძირითადი კალაპოტისა და ჭალების ხორკლიანობა ერთმანეთისაგან ძალზე განსხვავდება, საშუალო სიჩქარის მნიშვნელობებიც შესაბამის უბნებზე მკვეთრად განსხვავებული მიიღება.

თავი IX. სითხის დამყარებული არათანაბარი მოძრაობა ღია კალაპოტებში

§ 9.1. ზოგადი ცნობები

დამყარებული არათანაბარი ეწოდება სითხის ისეთ მოძრაობას, როდესაც დროის მიხედვით უცვლელ (მუდმივ) ხარჯს, ნაკადის გასწვრივ აღებულ სხვადასხვა განივკვეთში, სხვადასხვა საშუალო სიჩქარე შეესაბამება.

სითხის ნაკადში მოთავსებული ყოველგვარი წინაღობა (კაშხალი, სარეგულაციო დეზი, ვარდნილი და სხვ.), კალაპოტის ფსკერის ყოველი მეტნაკლებად მნიშვნელოვანი უსწორობა, ფსკერის ქანობისა და კალაპოტის კედლების ხორკლიანობის ცვლილება აუცილებლად იწვევს ცოცხალი კვეთების ფართობების (სიგანის და სიღრმის) ცვლილებას, რაც განაპირობებს არათანაბარ მოძრაობას.

წარმოვიდგინოთ, რომ ნაკადის ცოცხალი კვეთი შეზღუდულია ხიდის ბურჯებით. იმისათვის, რომ შემცირებულმა კვეთმა გაატაროს მოცემული ხარჯი, საშუალო სიჩქარე ნაგებობის ფარგლებში უნდა გაიზარდოს, რაც, თავის მხრივ, გამოიწვევს წყლის დონის აწევას და, მაშასადამე, საშუალო სიჩქარის შემცირებას

ხიდის წინ. ამგვარად, ნაგებობის წინ შეიმჩნევა წყლის შენელებული მოძრაობა, რომელიც შემდეგ გადადის აჩქარებულში და, ბოლოს, ნაგებობის შემდეგ, კვლავ ნელდება. როგორც ვხედავთ, ცოცხალი კვეთის ხიდის ბურჯებით შეზღუდვამ არსებითი ცვლილებები შეიტანა თანაბარი მოძრაობის პროცესში, თუ ასეთი (თანაბარი მოძრაობა) შეიმჩნეოდა ნაგებობის მოწყობამდე. ეს ცვლილებები ნაგებობიდან მნიშვნელოვან მანძილზე ვრცელდება.

ადრე აღვნიშნეთ (§ 6.2), რომ სითხის თანაბარი მოძრაობის შემთხვევაში მოძრაობის გამომწვევი ძალები გაწონასწორებულია წინაღობის ძალებით. არათანაბარი მოძრაობისას ძალთა ეს წონასწორობა დარღვეულია: ხახუნის ძალების მუშაობა შეიძლება აღმოჩნდეს დანარჩენი ძალების მუშაობაზე მეტი ან ნაკლები იმის მიხედვით, თუ როგორია მოძრაობა შენელებული თუ აჩქარებული. არათანაბარი მოძრაობის შესწავლას ართულებს სწორედ ის, რომ ამ შემთხვევაში ხახუნის ძალების სრულად შეფასება ვერ ხერხდება, რის გამოც იძულებული ვართ რამდენამდე გავამარტივოთ მოვლენის არსი. როგორც საანგარიშო დამოკიდებულებათა პრაქტიკაში გამოყენების შედეგები გვიჩვენებს ჩვენს მიერ მიღებული დაშვება არ ატარებს უხეში შეცდომის ხასიათს და ისინი სრულიად მისაღებია რეალური პირობებისათვის.

ისევე, როგორც წინა თავში, აქაც განვიხილავთ სითხის მხოლოდ ტურბულენტურ მოძრაობას წინაღობის კვადრატულ ზონაში. ამასთან, მხედველობაში მიიღება არათანაბარ **მდოვრედ ცვალებადი** მოძრაობა.

არათანაბარი მოძრაობა შეიძლება დამყარდეს ფსკერის როგორც დადებითი ანუ პირდაპირი $(i > 0)$, ისე ნულოვანი ანუ ჰორიზონტალური $(i = 0)$ და უარყოფით $(i < 0)$ ქანობების შემთხვევაში.

§ 9.2. წყლის არათანაბარი მოძრაობის ძირითადი დიფერენციალური განტოლება

განვიხილოთ წრფივად და არათანაბრად მოძრავი ნაკადის გრძივი ჭრილი (ნახ. 9.1).

შემოვიღოთ აღნიშვნები:

$i = \sin\theta$ არის კალაპოტის ფსკერის ქანობი;

p_0 – სითხის თავისუფალ ზედაპირზე მოქმედი წნევა. ცხადია, ღია კალაპოტების შემთხვევაში ის ატმოსფერული წნევის ტოლია, $p_0 = p_{ატ}$;

h – განსახილველ ცოცხალი კვეთის უდიდესი სიღრმე. მისი მნიშვნელობები სხვადასხვა კვეთისათვის სხვადასხვაა;

ω –ცოცხალი კვეთის ფართობი. მისი მნიშვნელობებიც სხვადასხვა კვეთისათვის აგრეთვე სხვადასხვაა, რადგანაც ნაკადის სიგრძეზე, ზოგად შემთხვევაში, იცვლება ცოცხალი კვეთის როგორც სიღრმე, ისე ზომები;

Q – ნაკადის მუდმივი ხარჯი;

$v = \dfrac{Q}{\omega}$ – საშუალო სიჩქარე ცოცხალ კვეში;

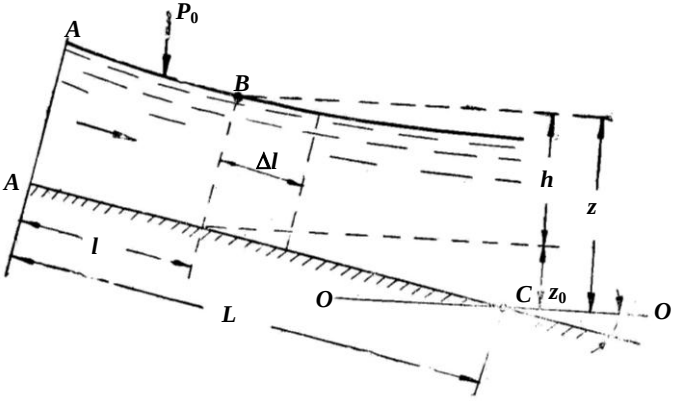
I – ჰიდრავლიკური ქანობი.

ვისარგებლოთ (5.63) განტოლებით

$$I = -\frac{d\left(z + \dfrac{p}{\gamma} + \dfrac{\alpha v^2}{2g}\right)}{d\ell}$$

და მივცეთ შემდეგი სახე:

$$\frac{d}{d\ell}\left(z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2}\right) + I = 0\,. \qquad (9.1)$$



ნახ. 9.1

ვიპოვოთ ფრჩხილებში მოთავსებული თითოეული წევრის წარმოებული ℓ-ით. ამისათვის განვიხილოთ სითხის თავისუფალ

ზედაპირზე მდებარე რაიმე B წერტილი, რომელიც ათვლის ნებისმიერი საწყისი A-A კვეთიდან ℓ მანძილით არის დაცილებული. გავატაროთ O-O საფარდი სიბრტყე კალაპოტის ფსკერზე მდებარე A-A კვეთიდან L მანძილით დაცილებულ ნებისმიერ C წერტილზე. მაშინ B წერტილის z კოორდინატი გამოისახება დამოკიდებულებით:

$$z = h + (L - l)i .$$

ამ უკანასკნელის წარმოებული ℓ-ით, თუ გავითვალისწინებთ, რომ $i = const$ და $L = const$, იქნება:

$$\frac{dz}{d\ell} = \frac{dh}{d\ell} + \frac{d}{d\ell}(L - \ell)i = \frac{dh}{d\ell} - i . \tag{9.2}$$

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ღია კალაპოტებში სითხის თავისუფალი ზედაპირის ყველა წერტილში ერთი და იგივე წნევა მოქმედებს, $p = const$, ამიტომ

$$\frac{d}{d\ell}\left(\frac{p}{\gamma}\right) = 0 . \tag{9.3}$$

ახლა ვიპოვოთ მესამე წევრის $\left(\frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2}\right)$ წარმოებული ℓ-ით

$$\frac{d}{d\ell}\left(\frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2}\right) = \frac{\alpha Q^2}{2g}\frac{d}{d\ell}\left(\frac{1}{\omega^2}\right). \tag{9.4}$$

მივიღოთ მხედველობაში, რომ კალაპოტის განივკვეთის კალაპოტის გასწვრივ იცვლება და, მაშასადამე, ω ორი დამოუკიდებელი ცვლადის $-\ell$-ის და h-ის ფუნქციაა – $\omega = f(\ell, h)$. ამ ფუნქციის სრული დიფერენციალი ტოლი იქნება:

$$d\omega = \frac{\partial \omega}{\partial \ell} d\ell + \frac{\partial \omega}{\partial h} dh . \tag{9.5}$$

ამიტომ, შეგვიძლია დავწეროთ:

$$d\left(\frac{1}{\omega^2}\right) = -2\omega^{-3} d\omega = -\frac{2}{\omega^3}\left(\frac{\partial \omega}{\partial \ell} d\ell + \frac{\partial \omega}{\partial h} dh\right).$$

ამ უკანასკნელის გათვალისწინებით (9.4) ტოლობა ასე ჩაიწერება:

$$\frac{d}{d\ell}\left(\frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2}\right) = \frac{\alpha Q^2}{2g}\frac{d}{d\ell}\left(\frac{1}{\omega^2}\right) = -\frac{\alpha Q^2}{g\omega^3}\left(\frac{\partial \omega}{\partial \ell} + \frac{\partial \omega}{\partial h}\frac{dh}{d\ell}\right). \tag{9.6}$$

არათანაბარი მოძრაობისას ნაკადის გასწვრივ ხდება გასაშუალებულ სიჩქარეთა ეპიურის ტრანსფორმაცია (ცვლილება),

ამიტომ დაწნევის დანაკარგის გამოსათვლელ ფორმულას, თანაბარი მოძრაობისათვის მიღებული ფორმულისაგან განსხვავებით, სხვა სახე უნდა ჰქონდეს. მაგრამ არათანაბარი მოძრაობის აღნიშნული თავისებურების გათვალისწინება დიდ სირთულებთან არის დაკავშირებული, რის გამოც **გარკვეული მიახლოებით ვუშვებთ, რომ დაწნევის დანაკარგები არათანაბარი მდორედ ცვალებადი მოძრაობისათვის გამოისახება ისეთივე დამოკიდებულებებით, როგორითაც თანაბარი მოძრაობის შემთხვევაში.** მიღებული დაშვების საფუძველზე, შეზის ფორმულიდან შეგვიძლია განვსაზღვროთ I ჰიდრავლიკური ქანობი:

$$I = \frac{v^2}{C^2R} = \frac{Q^2}{\omega^2C^2R} = i_{\text{ხახ}} . \tag{9.7}$$

არათანაბარი მოძრაობისას I-ს ხშირად $i_{\text{ხახ}}$-ით აღნიშნავენ და **ხახუნის ქანობს** უწოდებენ.

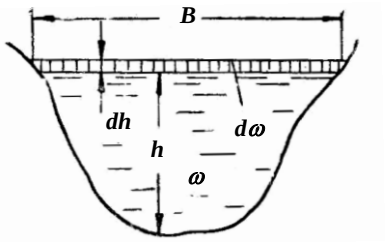
(9.2), (9.3), (9.6) და (9.7) გამოსახულებებით განსაზღვრული მნიშვნელობები ჩავსვათ (9.1) განტოლებაში:

$$\frac{dh}{d\ell} - i - \frac{\alpha Q^2}{g\omega^3}\left(\frac{\partial\omega}{\partial\ell} + \frac{\partial\omega}{\partial h}\frac{\partial h}{\partial\ell}\right) + \frac{Q^2}{\omega^2C^2R} = 0 .$$

$\frac{dh}{d\ell}$-ის მიმართ ამ განტოლების ამოხსნით მივიღებთ:

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{i + \frac{\alpha Q^2}{g\omega^3}\frac{\partial\omega}{\partial\ell} - \frac{Q^2}{\omega^2C^2R}}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g\omega^3}\frac{\partial\omega}{\partial h}} . \tag{9.8}$$

დავადგინოთ დამოკიდებულება თავისუფალი ზედაპირის B სიგანესა და ω ცოცხალი კვეთის ფართობს შორის. თუ h სიღრმეს მივცემთ უსასრულოდ მცირე dh ნამატს (ნახ. 9.2), მაშინ ცოცხალი კვეთის ფართობის $d\omega$ ნამატი ტოლი იქნება: $d\omega = Bdh$. $d\omega$-ს ეს მნიშვნელობა ჩავსვათ (9.5) ტოლობაში და გავითვალისწინოთ, რომ ℓ-ის ერთი გარკვეული მნიშვნელობისათვის $\omega = const$. გვექნება



ნახ. 9.2

$$Bdh = \frac{\partial\omega}{\partial h}dh ,$$

საიდანაც

$$\frac{\partial \omega}{\partial h} = B\,. \tag{9.9}$$

ამიტომ (9.8) განტოლება ასეთ სახეს მიიღებს:

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{i + \dfrac{\alpha Q^2}{g\omega^3}\dfrac{\partial \omega}{\partial \ell} - \dfrac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}}{1 - \dfrac{\alpha Q^2}{g}\dfrac{B}{\omega^3}}\,. \tag{9.10}$$

ბოლო გამოსახულებას ხშირად ასეთი სახით წერენ:

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{i - \dfrac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}\left(1 - \dfrac{\omega^2 C^2 R}{g\omega}\dfrac{\partial \omega}{\partial \ell}\right)}{1 - \dfrac{\alpha Q^2}{g}\dfrac{B}{\omega^3}}\,. \tag{9.11}$$

მიღებული დამოკიდებულება **ღია კალაპოტში წყლის დამყარებული მდოვრედ ცვალებადი არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებაა.**

(9.11) განტოლება ასახავს კალაპოტის ℓ სიგრძეზე ნაკადის h სიღრმის ცვლილების კანონზომიერებას – $h = f(\ell)$.

§ 9.3. კინეტიკურობის პარამეტრი

(9.11) განტოლების მნიშვნელში მიღებული სიდიდე $\dfrac{\alpha Q^2}{g}\dfrac{B}{\omega^3}$ ასეთი სახით ჩავწეროთ:

$$\frac{\alpha Q^2}{g}\frac{B}{\omega^3} = \frac{\alpha v^2}{g}\cdot\frac{B}{\omega^3} = 2\frac{\alpha v^2}{2g}\cdot\frac{B}{\omega} = \frac{2\dfrac{\alpha v^2}{2g}}{\omega/B} = \frac{2\dfrac{\alpha v^2}{2g}}{h_{სშ}}\,,$$

სადაც $h_{სშ} = \dfrac{\omega}{B}$ არის საშუალო სიღრმე ცოცხალ კვეთში.

მიღებული გამოსახულება ნაკადის კუთრი კინეტიკური ენერგიის $\left(\dfrac{\alpha v^2}{2g}\right)$ ფარდობაა საშუალო სიღრმით გამოთვლილ კუთრ პოტენციურ ენერგიასთან ($h_{სშ}$) და, მაშასადამე, ახასიათებს ნაკადის ენერგეტიკულ აღნაგობას. ამ უგანზომილებო სიდიდეს აღნიშნავენ $\Pi_к$-თი და მას **კინეტიკურობის პარამეტრს** უწოდებენ:

$$\frac{\alpha Q^2}{g}\frac{B}{\omega^3}=\frac{2\frac{\alpha v^2}{2g}}{h_{\text{საშ}}}=\frac{\alpha v^2}{gh_{\text{საშ}}}=\Pi_3. \qquad (9.12)$$

ზოგადად, $\frac{v^2}{g\ell}$ უგანზომილებო სიდიდეს, სადაც ℓ ნაკადის ნებისმიერი წრფივი მახასიათებელია (h, R, d და ა.შ.), **ფრუდის რიცხვი** ეწოდება და მსგავსების ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი კრიტერიუმია

$$Fr=\frac{v^2}{g\ell}. \qquad (9.13)$$

ამგვარად, კინეტიკურობის პარამეტრი (Π_3) ფრუდის რიცხვის ერთ-ერთი სახესხვაობაა, როდესაც ნაკადის წრფივი მახასიათებლის როლში გამოდის საშუალო სიღრმე, ხოლო $\alpha=1$-ს (საერთოდ, α კორიოლისის კოეფიციენტის მნიშვნელობა არათანაბარი მოძრაობისას აიღება ისეთივე სიდიდის, როგორიც თანაბარი მოძრაობის შემთხვევაში, ე.ი. $\alpha\approx1{,}0\cdots1{,}1$).

§ 9.4. პრიზმულ კალაპოტებში წყლის არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლება

საინჟინრო პრაქტიკაში გვხვდება სხვადასხვა მახასიათებლის მქონე ღია კალაპოტები. ზოგიერთ შემთხვევაში **კალაპოტის განივკვეთის ფორმა და ზომები სიგრძეში იცვლება** და, მაშასადამე, ნაკადის ცოცხალი კვეთის ფართობი ორი დამოუკიდებელი ცვლადის ℓ-ის და h-ის ფუნქციაა – $\omega=f(\ell,h)$, სადაც ℓ არის წრფივი მანძილი ათვლის საწყისი კვეთიდან (ნახ. 9.1) განსახილველ კვეთამდე. ასეთ კალაპოტებს **არაპრიზმულს (არაცილინდრულს)** უწოდებენ. ცხადია, არაპრიზმული კალაპოტისათვის $d\omega/d\ell$ სრული წარმოებული, რომელიც კალაპოტის გასწვრივ ცოცხალი კვეთის ცვლილებას ახასიათებს, ტოლი იქნება:

$$\frac{\partial\omega}{\partial\ell}=\frac{\partial\omega}{\partial\ell}+\frac{\partial\omega}{\partial h}\frac{dh}{d\ell}. \qquad (9.14)$$

ამ განტოლების მარჯვენა ნაწილის პირველი წევრი ითვალისწინებს ცოცხალი კვეთის ფართობის ცვლილებას, რომელიც გამოწვეულია ნაკადის გასწვრივ კალაპოტის ფორმის ცვლილებით, ხოლო მეორე წევრი – ცოცხალი კვეთის ფართობის ცვლილებას, გამოწვეულს ნაკადის h სიღრმის ცვლილებით, რომელიც, თავის

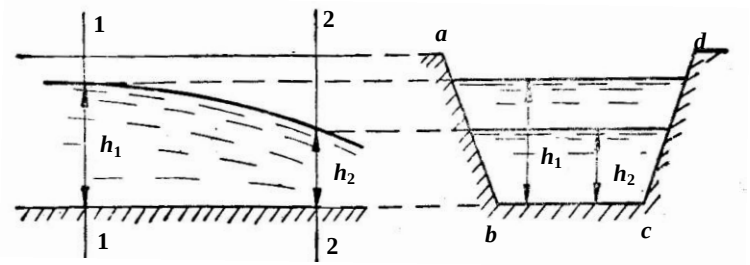
მხრივ, ℓ-ის ფუნქციაა და, მაშასადამე, კალაპოტის გასწვრივ იცვლება.

არაპრიზმული კალაპოტის მაგალითია ტრაპეციული კვეთის არხი, რომლის ფსკერის სიგანე ან ფერდოების კოეფიციენტები არხის სიგრძეზე იცვლება.

თუ კალაპოტის განივკვეთის ფორმა და ზომები ნაკადის მოძრაობის მთელ სიგრძეზე მუდმივია (ერთნაირია), მაშინ ცოცხალი კვეთის ფართობი მხოლოდ ნაკადის სიღრმის ფუნქციაა – $\omega = f(h)$. ასეთ კალაპოტებს **პრიზმულს (ცილინდრულს)** უწოდებენ. ცხადია, პრიზმული კალაპოტისათვის $\partial\omega/\partial\ell = 0$ და (9.14) განტოლება (9.9)-ის გათვალისწინებით ასეთ სახეს ღებულობს:

$$\frac{\partial\omega}{\partial\ell} = B\frac{dh}{d\ell}. \qquad (9.15)$$

როდესაც პრიზმულ კალაპოტებზე ვლაპარაკობთ, ერთმანეთში არ უნდა ავურიოთ **კალაპოტის** განივკვეთი და **ნაკადის** განივკვეთი (ანუ ცოცხალი კვეთი). თავისთავად ცხადია, რომ მუდმივად იგულისხმება კალაპოტის განივკვეთი, მისი ფორმა და ზომები, ხოლო კალაპოტის შევსების სიღრმე სხვადასხვა კვეთში არათანაბარი მოძრაობისას სხვადასხვაა, ამიტომ სხვადასხვა იქნება ცოცხალი კვეთის ფართობებიც. 9.3 ნახაზზე ნაჩვენებია პრიზმული კალაპოტი, რომელსაც ყველგან ერთი და იგივე *abcd* განივკვეთი აქვს, მაგრამ $h_1 \neq h_2$ და, მაშასადამე, $\omega_1 \neq \omega_2$.



ნახ. 9.3

დია კალაპოტები **განივკვეთის (პროფილის) ფორმის** მიხედვით იყოფა **სწორი** და **არასწორი** ფორმის კალაპოტებად. სწორი ფორმისას მიეკუთვნება ისეთი კალაპოტები, რომლისთვისაც ნაკადის გეომეტრიული და ჰიდრავლიკური ელემენტები ნებისმიერ განივკვეთში ნაკადის სიღრმის უწყვეტ ფუნქციებს წარმოადგენს და შესაძლებელია ამ ფუნქციების ანალიზური გამოსახვა

სიღრმის ცვლილების მთელი დიაპაზონისათვის. ამ პირობას აკმაყოფილებს სწორკუთხა, ტრაპეციული, სამკუთხა, პარაბოლური, ნახევარწრიული და სხვა კალაპოტები. **შედგენილი** (პოლიგონური) პროფილის კალაპოტები აღნიშნულ პირობას არ აკმაყოფილებს და, მაშასადამე, ისინი მიეკუთვნება არასწორი ფორმის კალაპოტებს.

ბუნებრივი კალაპოტები (მდინარეები) არასწორი ფორმისაა, თუმცა, ზოგ შემთხვევაში, მათი ცალკეული უბნები შეიძლება გარკვეული მიახლოებით შევცვალოთ სწორი ფორმის პრიზმული კალაპოტებით.

წყლის არათანაბარი მოძრაობის თეორიის ძირითადი ამოცანაა ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის წირის აგება ნებისმიერი კონკრეტული კალაპოტისათვის ნებისმიერ პირობებში, ე.ი. ამოცანა დაიყვანება $h = f(\ell)$ ფუნქციური დამოკიდებულების მოძებნაზე. მაგრამ ასეთი ამოცანის ზოგადი ამოხსნა ძალზე ძნელია ბუნებრივი კალაპოტების გეომეტრიული ფორმის სირთულის გამო. ამიტომ ქვემოთ განვიხილავთ სწორი ფორმის პრიზმულ კალაპოტებს.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, პრიზმული კალაპოტისათვის[1] $\frac{\partial \omega}{\partial \ell} = 0$. ამიტომ (7.11) განტოლება მნიშვნელოვნად მარტივდება და ასეთ სახეს ღებულობს:

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{i - \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g}\frac{B}{\omega}} = \frac{1 - \frac{Q^2}{K^2}}{1 - \Pi_3}, \qquad (9.16)$$

სადაც $K = \omega C\sqrt{R}$.

ახლა წარმოვიდგინოთ, რომ მოცემული ქანობის შემთხვევაში მოცემული ფორმის პრიზმულ კალაპოტში არათანაბარი მოძრაობის ნაცვლად გვაქვს თანაბარი მოძრაობა ისეთი h_0 ნორმალური სიღრმით (იხ. § 8.1), რომელიც უზრუნველყოფს მოცემული Q ხარჯის გატარებას. მაშინ ხარჯი შეიძლება განვსაზღვროთ ფორმულით (თანაბარი მოძრაობის h_0 ნორმალური სიღრმის შესაბამისი ჰიდრავლიკური ელემენტები, არათანაბარი მოძრაობის მსგავსი ელემენტებისაგან განსხვავების მიზნით, აღინიშნება ინდექსით „0“):

[1] შემდგომში, თუ სპეციალურად არ იქნა მითითებული, ვიგულისხმებთ სწორი ფორმის კალაპოტს.

$$Q = \omega_0 C_0 \sqrt{R_0}\sqrt{i} = K_0\sqrt{i}\,. \tag{9.17}$$

აღნიშნულის გათვალისწინებით (9.16) განტოლება ასე ჩაიწერება:

$$\frac{dh}{d\ell} = \frac{i - \left(\frac{K_0\sqrt{i}}{K}\right)^2}{1-\Pi_{ჯ}} = i\frac{1-\left(\frac{K_0}{K}\right)^2}{1-\Pi_{ჯ}}\,. \tag{9.18}$$

ჩვეულებრივ, (9.16) და (9.18) **განტოლებებით სარგებლობენ პრიზმულ კალაპოტებში არათანაბარი მოძრაობის საკითხების განხილვისას.**

შევნიშნავთ, რომ თუ (9.16) განტოლებაში დავუშვებთ, $dh/d\ell = 0$, მივიღებთ ჩვენთვის კარგად ცნობილი თანაბარი მოძრაობის განტოლებას.

ასევე ყურადღება უნდა მივაქციოთ იმას, თუ (9.16) ან (9.18) განტოლებაში კინეტიკურობის პარამეტრი $\Pi_k = 1$-ს, მაშინ ამ გამოსახულებათა მნიშვნელი უტოლდება ნულს და $h = f(\ell)$ ფუნქცია განიცდის წყვეტას, რაც მხედველობაში უნდა მივიღოთ დიფერენციალურ განტოლებათა ინტეგრირებისას.

§ 9.5. კვეთის კუთრი ენერგია. კრიტიკული სიღრმე. კრიტიკული ქანობი

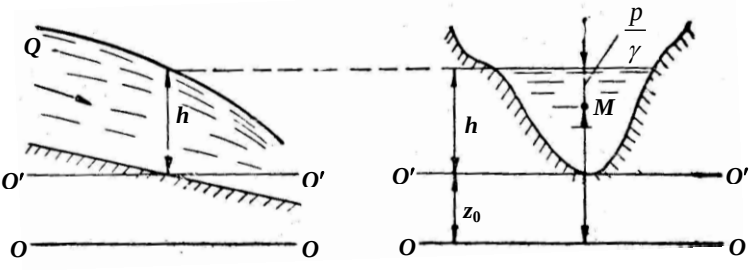
1. **კვეთის კუთრი ენერგია.** კრიტიკული სიღრმე. განვიხილოთ ნაკადის ნებისმიერი განივი კვეთი (ნახ. 9.4). უდიდესი სიღრმე კვეთში აღვნიშნოთ *h*-ით, ხოლო მოძრაობის საშუალო სიჩქარე *v*-თი. მაშინ **ნაკადის კუთრი ენერგია** მოცემული ცოცხალი კვეთისათვის რაიმე ჰორიზონტალური 0-0 საფარდი სიბრტყის მიმართ, როგორც ჩვენთვის ცნობილია, განისაზღვრება დამოკიდებულებით:

$$E = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g}\,. \tag{9.19}$$

ღია კალაპოტებისათვის თავისუფალ ზედაპირზე მოქმედ ატმოსფერულ წნევას მხედველობაში არ ვღებულობთ და (9.19) გამოსახულებაში *p*-ს მივიჩნევთ ჭარბ (მანომეტრულ) წნევად. რადგანაც მდოვრედ ცვალებადი მოძრაობისას ჰიდროდინამიკური წნევა კვეთში ნაწილდება ჰიდროსტატიკური კანონით, ამიტომ ცოცხალი კვეთის ნებისმიერი *M* წერტილისათვის გვექნება:

$$z + \frac{p}{\gamma} = z + h' = z_0 + h\,,$$

სადაც z_0 არის კვეთის უდაბლესი წერტილის დაცილება O-O საფარდი სიბრტყიდან.



ნახ. 9.4

აღნიშნულის გათვალისწინებით (9.19) გამოსახულება ასეთ სახეს მიიღებს:

$$E = z_0 + h + \frac{\alpha v^2}{2g}. \qquad (9.20)$$

(9.19) და (9.20) გამოსახულებებიდან ჩანს, რომ ნაკადის კუთრი ენერგიის მნიშვნელობა (E) მოცემული კვეთისათვის დამოკიდებულია O-O საფარდი სიბრტყის მდებარეობაზე. ამიტომ, ღია კალაპოტებში არათანაბარი მოძრაობის მრავალი საკითხის ფიზიკური არსის გასარკვევად ნაკადის კუთრ ენერგიას ხშირად გამოითვლიან არა O-O საფარდის სიბრტყის მიმართ, არამედ ცოცხალი კვეთის უდაბლეს წერტილზე გამავალი O′-O′ საფარდი სიბრტყის (ნახ. 7.4) მიმართ ($z_0 = 0$). ასეთ შემთხვევაში ყველა განივკვეთს თავისი საფარდი სიბრტყეს აქვს და შესაბამისი კუთრი ენერგიების სიდიდეებიც ამ სიბრტყეების მიმართ ტოლფასი კრიტერიუმებით ფასდება.

ცოცხალი კვეთის უდაბლეს წერტილზე გამავალი საფარდი სიბრტყის მიმართ გამოთვლილ კუთრ ენერგიას **კვეთის კუთრი ენერგია** ეწოდება და აღინიშნება Э ასოთი, ე.ი.

$$Э = h + \frac{\alpha v^2}{2g}. \qquad (9.21)$$

ეს განტოლება შეიძლება სხვა სახითაც ჩავწეროთ (თუ გავითვალისწინებთ, რომ $v = Q/\omega$)

$$Э = h + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2}. \qquad (9.22)$$

ადრე აღვნიშნეთ, რომ რეალური სითხის დამყარებული მოძრაობისას ნაკადის კუთრი ენერგია დინების მიმართულებით ყოველთვის მცირდება, $dE/d\ell < 0$, რადგანაც სწორედ ამ ენერგიის ხარჯზე ხდება მოძრაობა.

(9.20) და (9.21) გამოსახულებათა შედარებიდან ჩანს, რომ $\Theta = E - z_0$. მაგრამ (9.1) ნახაზის მიხედვით, $z_0 = z - h = (L - \ell)i$. ამიტომ

$$\Theta = E - (L - \ell)i .$$

განვიხილოთ Θ სიდიდის ცვლილება ნაკადის სიგრძეზე

$$\frac{d\Theta}{d\ell} = \frac{dE}{d\ell} + i = -I + i$$

ანუ (9.7) და (9.18) ფორმულების თანახმად

$$\frac{d\Theta}{d\ell} = -\frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R} + i = -\frac{Q^2}{K^2} + i = -\frac{K_0^2 i}{K^2} + i = i\left(1 - \frac{K_0^2}{K^2}\right). \qquad (9.23)$$

მიღებული განტოლებიდან ჩანს, რომ თანაბარი მოძრაობისას $(K = K_0)$

$$\frac{d\Theta}{d\ell} = 0 \quad \text{ანუ} \quad \Theta = const , \qquad (9.24)$$

ხოლო არათანაბარი მოძრაობისას $(K \neq K_0)$ კვეთის კუთრი ენერგია დინების მიმართულებით შეიძლება კლებულობდეს ან მატულობდეს იმის მიხედვით, თუ როგორია $\frac{K_0}{K}$ ფარდობა.

გავარკვიოთ ამ საკითხის ფიზიკური არსი.

თანაბარი მოძრაობისას სიმძიმის ძალის მუშაობა, რომელიც i სიდიდით ხასიათდება, მთლიანად იხარჯება ჰიდრავლიკურ წინაღობათა დაძლევაზე. ამიტომ, ნაკადის ყოველ კვეთში კუთრი ენერგია მუდმივი რჩება.

თუ ნაკადს არათანაბარი მოძრაობისას აქვს უფრო ნაკლები სიჩქარე, ვიდრე მას ექნებოდა იგივე კალაპოტში თანაბარი მოძრაობისას, მაშინ შემცირებულ ჰიდრავლიკურ წინაღობათა დაძლევაზე სიმძიმის ძალის მუშაობა მთლიანად არ იხარჯება და ყოველ მომდევნო კვეთში კუთრი ენერგია მეტია, ვიდრე წინა კვეთში.

პირიქით, თუ ნაკადს არათანაბარი მოძრაობისას აქვს უფრო მეტი სიჩქარე, ვიდრე ექნებოდა იგივე კალაპოტში თანაბარი მოძრაობისას, მაშინ გაზრდილ ჰიდრავლიკურ წინაღობათა დაძლევაზე სიმძიმის ძალის მუშაობა არ არის საკმარისი, რის

გამოც ნაკადი კვეთის კუთრი ენერგიიდან „სესხულობს“ დამატებით საჭირო ენერგიას. ყოველ მომდევნო კვეთში კუთრი ენერგია იქნება ნაკლები, ვიდრე წინა კვეთში, ე.ი. ამ შემთხვევაში ნაკადის მოძრაობის მიმართულებით კვეთის კუთრი ენერგია კლებულობს.

კალაპოტის ნულოვანი ($i = 0$) და უარყოფითი ($i < 0$) ქანობების მქონე უბნებზე ნაკადის მოძრაობისას კვეთის კუთრი ენერგია ყოველთვის მცირდება.

ახლა გამოვიკვლიოთ, თუ როგორ იცვლება კვეთის კუთრი ენერგია h სიღრმის ცვლილების მიხედვით. ჩავთვალოთ, რომ ხარჯი $Q = const$ და კალაპოტის განივკვეთი მოცემულია, ე.ი. Ე არის მხოლოდ h-ის ფუნქცია: $Э = f(h)$.

(9.21) და (9.22) განტოლებებიდან ჩანს, რომ როცა $h \to 0$, მაშინ $\omega \to 0$ და $Э \to \infty$ (რადგანაც აღნიშნულ განტოლებათა მარჯვენა ნაწილის მეორე შესაკრები მიისწრაფვის უსასრულობისაკენ); როცა $h \to \infty$, მაშინ $\omega \to \omega$ და ასევე $Э \to \infty$. ამგვარად, როცა $h = 0$ და $h = \infty$, კვეთის კუთრი ენერგია ასიმპტოტურად მიისწრაფვის უსასრულობისაკენ, მაშინ, როდესაც h-ის სასრული მნიშვნელობებისათვის Ე სასრული სიდიდეა.

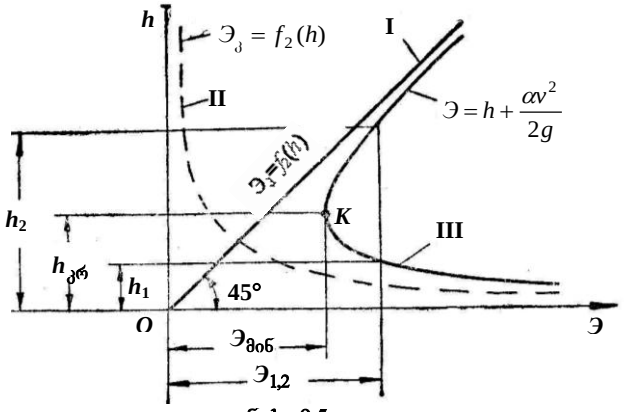
ცნობილია, რომ თუ უწყვეტი ფუნქცია დამოუკიდებელი ცვლადის სასაზღვრო მნიშვნელობებისათვის მიისწრაფვის უსასრულობისაკენ, მაშინ მას ცვლადის ცვლილების შუალედში უნდა ჰქონდეს მინიმუმი. ამიტომ, შეიძლება იმის დამტკიცება, რომ არსებობს ნაკადის რაიმე სიღრმე, რომლის დროსაც Ე ფუნქციას ექნება მინიმალური მნიშვნელობა ($Э_{მინ}$).

ნაკადის სიღრმეს, რომელიც შეესაბამება კვეთის კუთრი ენერგიის მინიმუმს, **კრიტიკული სიღრმე** ეწოდება და აღინიშნება $h_{კრ}$-ით.

$Э = f(h)$ ფუნქცია შეიძლება წარმოვადგინოთ გრაფიკის სახით (ნახ. 9.5). ამისათვის ორდინატთა ღერძზე გადავზომით h სიღრმის, ხოლო აბსცისთა ღერძზე – კვეთის სრული კუთრი ენერგიის მნიშვნელობები (პოტენციური + კინეტიკური). ნახაზზე I წრფე, რომელიც აბსცისთა ღერძის მიმართ დახრილია 45°-იანი კუთხით, გამოსახავს კუთრი პოტენციური ენერგიის ცვლილებას. II წირი წარმოადგენს ჰიპერბოლას და გამოსახავს კუთრი კინეტიკური ენერგიის ცვლილებას. რაც შეეხება კვეთის სრული კუთრი ენერგიის ცვლილებას, ის გრაფიკზე მოცემულია III წირის სახით, რომლის ასიმპტოტებსაც I წრფე და ОЭ აბსცისთა ღერძი წარმოადგენს.

$Э = f(h)$ გრაფიკის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ K წერტილი, რომელიც კვეთის კუთრი ენერგიის მინიმუმს ($Э_{მინ}$) და, მაშასადამე, სიღრმეს ($h_{კრ}$) შეესაბამება, III წირს ორ შტოდ ჰყოფს. ქვედა შტო შეესაბამება ნაკადის ისეთ მდგომარეობას, რომლის დროსაც სიღრმის ზრდით კვეთის კუთრი ენერგია მცირდება, ხოლო ზედა შტო, პირიქით, – ნაკადის ისეთ მდგომარეობას, რომლის დროსაც სიღრმის ზრდით კვეთის კუთრი ენერგია იზრდება. როგორც ვხედავთ, კვეთის კუთრი ენერგიის ერთი და იგივე მარაგი ($Э_{1,2}$) ნაკადს შეიძლება ჰქონდეს სიღრმის ორი განსხვავებული ($h_1 \neq h_2$) მნიშვნელობის დროს (ნახ. 9.5).

აღნიშნულთან დაკავშირებით, განიხილება ღია ნაკადების შემდეგი სამი მდგომარეობა:



ნახ. 9.5

ა) **ნაკადის მძაფრი მდგომარეობა,** რომელსაც შეესაბამება კვეთის კუთრი ენერგიის მრუდის ქვედა შტო და რომლისთვისაც $h < h_{კრ}$. ნაკადის ამ მდგომარეობაში კვეთის კუთრი ენერგიის ზრდა ხდება კინეტიკური ენერგიის ზრდის და პოტენციურის შემცირების შედეგად.

ბ) **ნაკადის წყნარი მდგომარეობა,** რომელსაც შეესაბამება კვეთის კუთრი ენერგიის ზედა შტო და რომლითვისაც $h > h_{კრ}$. ნაკადის ამ მდგომარეობაში კვეთის კუთრი ენერგიის ზრდა ხდება პოტენციური ენერგიის ზრდის და კინეტიკურის შემცირების შედეგად.

გ) **ნაკადის კრიტიკული მდგომარეობა**, რომლის დროსაც ნაკადის სიღრმე კრიტიკულის ტოლია: $h = h_{კრ}$.

ამგვარად, ნაკადის მდგომარეობის გასარკვევად საჭიროა განვსაზღვროთ კრიტიკული სიღრმე და შევადაროთ ის ნაკადის რეალურ სიღრმეს.

კრიტიკული სიღრმის საპოვნელად გავაწარმოოთ (9.22) გამოსახულება:

$$\frac{d\Im}{d\ell}=1+\frac{d}{dh}\left(\frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2}\right)=1+\frac{\alpha Q^2}{2g}\frac{d}{dh}\left(\frac{1}{\omega^2}\right)=1-\frac{\alpha Q^2}{g\omega^3}\frac{d\omega}{dh}.$$

მაგრამ $\frac{d\omega}{dh}=B$, ამიტომ

$$\frac{d\Im}{d\ell}=1-\frac{\alpha Q^2}{g}\frac{B}{\omega^3}=1-\Pi_{ჯ}. \qquad (9.25)$$

როცა $h=h_{კრ}$-ს, მაშინ $\frac{d\Im}{d\ell}=0$-ს და

$$1-\frac{\alpha Q^2}{g}=\frac{B_{კრ}}{\omega^3_{კრ}}=0; \qquad (9.26)$$

$$1-\Pi_{ჯკრ}=0, \qquad (9.26')$$

ანუ

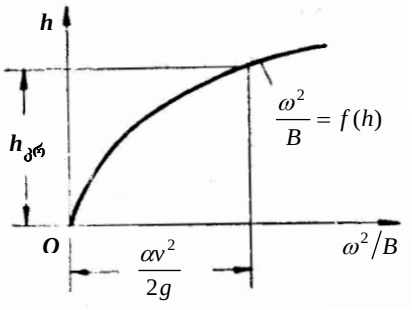
$$\frac{\alpha Q^2}{g}=\frac{\omega^3_{კრ}}{B_{კრ}}; \qquad (9.27)$$

$$\Pi_{ჯკრ}=1, \qquad (9.27')$$

სადაც $\omega_{კრ}$ და $B_{კრ}$ არის კრიტიკული სიღრმის შესაბამისი ცოცხალი კვეთის ფართობი და ზედა სიგანე.

(9.27) განტოლება, რომელსაც **ნაკადის კრიტიკულობის პირობას** უწოდებენ, საშუალებას იძლევა ვიპოვოთ $h_{კრ}$ კრიტიკული სიღრმე ნებისმიერი ფორმის კვეთისათვის გრაფიკულად ან შერჩევის მეთოდით. ვთქვათ, მოცემული გვაქვს კალაპოტის განივკვეთი და Q ხარჯი. გრაფიკულად $h_{კრ}$-ის მოსაძებნად ვუშვებთ $h_1,h_2,h_3,\cdots,h_n$ სიღრმის მნიშვნელობებს და გამოვთვლით შესაბამის $\frac{\omega_1^3}{B},\frac{\omega_2^3}{B},\frac{\omega_3^3}{B},\cdots,\frac{\omega_n^3}{B}$ ფარდობებს. ვაგებთ $\frac{\omega^3}{B}=f(h)$ ფუნქციის გრაფიკს (ნახ. 9.6), საიდანაც $\frac{\alpha Q^2}{g}$ ცნობილი სიდიდის მიხედვით ვპოულობთ $h_{კრ}$ სიღრმეს.

კალაპოტის ზოგიერთი ფორმის განივკვეთისათვის კრიტიკული სიღრმე განისაზღვრება ანალიზურად ან დამხმარე ცხრილებისა და გრაფიკების საშუალებით. ასე, მაგალითად, სწორკუთხა კვეთის კალაპოტისათვის კრიტიკული სიღრმე შეიძლება განვსაზღვროთ უშუალოდ (9.27) ფორმულიდან, თუ გავითვალისწინებთ, რომ ამ დროს $b = B_{კრ}$ და $\omega_{კრ} = bh_{კრ}$:



ნახ. 9.6

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{b^3 \omega_{კრ}^3}{b},$$

საიდანაც

$$h_{კრ} = \sqrt{\frac{\alpha Q^2}{b^2 g}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}. \qquad (9.28)$$

აქ $q = \frac{Q}{b}$ არის ე.წ. **კუთრი ხარჯი**.

(9.27′) გამოსახულებიდან გამომდინარეობს, რომ ნაკადის კრიტიკული მდგომარეობისას $\Pi_3 = 1$. ადვილი მისახვედრია, რომ ნაკადის წყნარი მდგომარეობისას $\Pi_k < 1$, ხოლო მძაფრი მდგომარეობისას – $\Pi_k > 1$.

2. **კრიტიკული ქანობი**. თანაბარი მოძრაობისას ფსკერის i ქანობის მქონე კალაპოტში გამავალ Q ხარჯს შეესაბამება სრულიად გარკვეული h_0 სიღრმე, რომელსაც ნორმალური სიღრმე ვუწოდეთ. i ქანობის ცვლილებით შეიცვლება h_0 ნორმალური სიღრმეც. რაც შეეხება $h_{კრ}$ კრიტიკულ სიღრმეს, ის მოცემული ხარჯისათვის ფსკერის ქანობზე დამოკიდებული არ არის (ეს 9.28 გამოსახულებიდან ჩანს). კრიტიკული სიღრმე დამოკიდებულია მხოლოდ ხარჯსა და კალაპოტის განივკვეთის ზომებზე.

როგორც ვხედავთ, კალაპოტის ფსკერის i ქანობის და, მაშასადამე, h_0 სიღრმის ცვლილებით შეგვიძლია შევარჩიოთ ფსკერის ისეთი ქანობი, რომლის დროსაც ადგილი ექნება $h_0 = h_{კრ}$ ტოლობას. ასეთ ქანობს **კრიტიკული** ეწოდება და აღინიშნება $i_{კრ}$-ით.

ამგვარად, კრიტიკული ქანობი არის კალაპოტის ფსკერის ისეთი ქანობი, რომლის დროსაც მოცემული Q ხარჯი თანაბარი

მოძრაობისას კალაპოტში გაედინება $h_0 = h_{კრ}$ სიღრმით.

კრიტიკული ქანობის მქონე კალაპოტში თანაბარი მოძრაობისას ერთდროულად უნდა დაკმაყოფილდეს (9.17) და (9.27) ტოლობები:

$$\left.\begin{aligned} Q &= \omega_0 C_0 \sqrt{R_0 i} = \omega_{კრ} C_{კრ} \sqrt{R_{კრ} i}; \\ \frac{\alpha Q^2}{g} &= \frac{\omega_{კრ}^3}{B_{კრ}}. \end{aligned}\right\} \tag{9.29}$$

ამ სისტემის ამოხსნით მივიღებთ:

$$i_{კრ} = \frac{g\chi_{კრ}}{\alpha C_{კრ}^2 B_{კრ}}. \tag{9.30}$$

თუ კალაპოტის ქანობი კრიტიკულზე ნაკლებია $(i < i_{კრ})$, მაშინ ნორმალური სიღრმე მეტია კრიტიკულზე $(h_0 > h_{კრ})$ და ნაკადი იმყოფება წყნარ მდგომარეობაში, ხოლო თუ $i > i_{კრ}$, მაშინ $h_0 < h_{კრ}$ და ნაკადი მძაფრ მდგომარეობაშია. $i = i_{კრ}$ შემთხვევაში ნაკადი კრიტიკულ მდგომარეობაშია $(h_0 < h_{კრ})$.

§ 9.6. ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ფორმები პირდაპირი ქანობის ($i > 0$) პრიზმულ კალაპოტებში

ვისარგებლოთ პრიზმულ კალაპოტში წყლის არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებით (§ 9.4):

$$\frac{dh}{d\ell} = i\frac{1-(K_0/K)^2}{1-\Pi_ჯ}. \tag{9.18}$$

ეს განტოლება გამოსახავს ნაკადის სიღრმის ცვლილებას კალაპოტის სიგრძეზე. მისმა ანალიზმა უნდა გვაჩვენოს, თუ რა ფორმებს მიიღებს თავისუფალი ზედაპირის წირი არათანაბარი მოძრაობის პირობებში. ამისათვის დაგვჭირდება იმის გახსენება, რომ ნაკადის კრიტიკული მდგომარეობისას კინეტიკურობის პარამეტრი $\Pi_ჯ = 1$-ს, ხოლო წყნარი და მძაფრი მდგომარეობისას, შესაბამისად, $\Pi_ჯ < 1$ და $\Pi_ჯ > 1$.

შევნიშნავთ, რომ არათანაბარი მოძრაობა თანაბარი მოძრაობისგან აღმოცენდება ან მისკენ მიისწრაფვის. ამიტომ, ნორმა-

ლურ სიღრმეთა წირი ყოველთვის თავისუფალი ზედაპირის წირის ასიმპტოტას წარმოადგენს.

(9.18) განტოლების მრიცხველიც და მნიშვნელიც ნიშანცვლადი სიდიდეებია, რომლებიც თავიანთი ცვლილების შუალედში ნულოვან მნიშვნელობასაც ღებულობს. როგორც ზემოთ ვნახეთ (§ 9.4), მრიცხველის ნულთან ტოლობა პასუხობს კალაპოტში წყლის თანაბარ მოძრაობას, რომლის დროსაც ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის წირი კალაპოტის ფსკერის პარალელურია. თუ მნიშვნელი უტოლდება ნულს ($\Pi_3 = 1$), მაშინ $h = f(\ell)$ ფუნქცია განიცდის წყვეტას და ამ დროს ადგილი აქვს ჰიდრავლიკისათვის ძალზე საინტერესო მოვლენას, რომელსაც ჰიდრავლიკურ ნახტომს უწოდებენ. (9.18) განტოლება თავისი არსით უწყვეტი ფუნქციაა, ამიტომ წყვეტის წერტილში ($\Pi_k = 1$ ან, რაც იგივეა, $h = h_{კრ}$) ის აზრს კარგავს.

ყველა დანარჩენ შემთხვევაში (9.18) გამოსახულება დადებითი ან უარყოფითი სიდიდეა და დამოკიდებულია მრიცხველისა და მნიშვნელის ნიშნების შეხამებაზე. თუ h სიღრმე დინების მიმართულებით მდოვრედ იზრდება, ე.ი. $\frac{dh}{d\ell} > 0$, ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის წირს **შეტბორვის წირს (მრუდს)** უწოდებენ, ხოლო მოძრაობას – **შენელებულს.** თუ h სიღრმე დინების მიმართულებით მდოვრედ მცირდება, ე.ი. $\frac{dh}{d\ell} < 0$, ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის წირს **დაცემის წირს (მრუდს)** უწოდებენ, ხოლო მოძრაობას - **აჩქარებულს**.

ახლა, ვთქვათ, კალაპოტში გაედინება ნაკადი Q ხარჯით. იმის მიხედვით, თუ როგორია კალაპოტის ფსკერის ქანობი, ნაკადი თანაბარი მოძრაობისას შეიძლება იმყოფებოდეს (ნახ. 9.7):

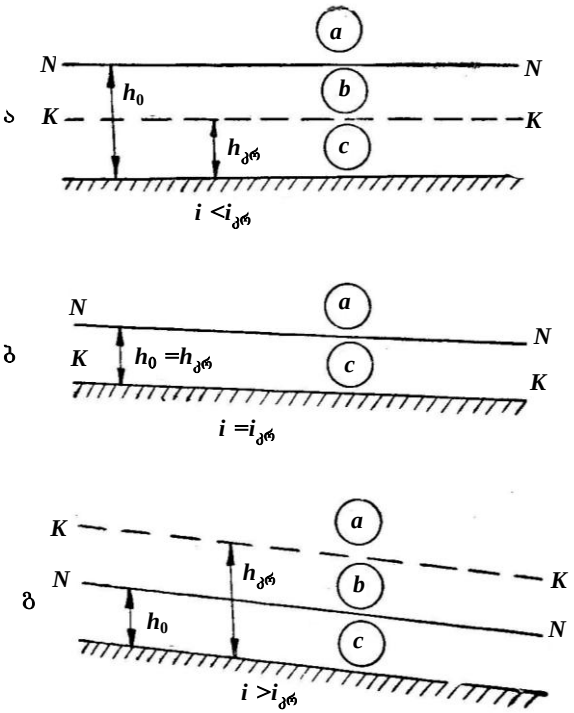
ა) წყნარ მდგომარეობაში ($h_0 > h_{კრ}, i < i_{კრ}$);

ბ) კრიტიკულ მდგომარეობაში ($h_0 = h_{კრ}, i = i_{კრ}$);

გ) მძაფრ მდგომარეობაში ($h_0 < h_{კრ}, i > i_{კრ}$).

არათანაბრად მოძრავი ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის წირის ფორმების ანალიზის გაადვილების მიზნით კალაპოტის გრძივ პროფილზე (ნახ. 9.7) დავიტანოთ ნორმალური და კრიტიკული სიღრმეების შესაბამისი $N - N$ და $K - K$ წირები. მაშინ მთელი სივრცე კალაპოტის ფსკერის ზემოთ დაიყოფა სამ ზონად: a ზონა – $N - N$ და $K - K$ წირების ზემოთ; b ზონა – N - N და

$K-K$ წირებს ქვემოთ. $i < i_{კრ}$ და $i > i_{კრ}$ შემთხვევებში (ნახ. 9.7, ა, გ) გვექნება სამ-სამი ზონა, ე.ი. სულ ექვსი, ხოლო $i = i_{კრ}$ შემთხვევაში (ნახ. 9.7, ბ) – ორი ზონა, რადგანაც ამ დროს $N-N$ და $K-K$ წირები ერთმანეთთან შეთავსებულია. მაშასადამე. კალაპოტის ფსკერის პირდაპირი ქანობისათვის $(i > 0)$ გვექნება რვა ზონა, რომელთაგან თითოეულში ამა თუ იმ მიზეზის გამო შეიძლება აღმოჩნდეს ნაკადის თავისუფალი ზედაპირი. განვიხილოთ ცალკეული შემთხვევები:



ნახ. 9.7

I. **ნაკადი თანაბარი მოძრაობისას წყნარ მდგომარეობაშია** $(h_0 > h_{კრ}, i < i_{კრ})$; ნახ. 9.7, ა).

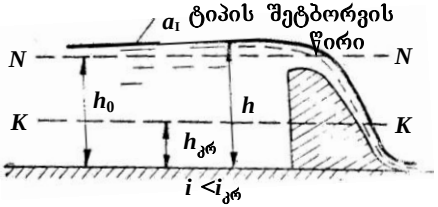
1. ვთქვათ, კალაპოტში კაშხლის აგების შედეგად ნაკადის თანაბარი მოძრაობა გადავიდა არათანაბარ მოძრაობაში, ხოლო სითხის თავისუფალი ზედაპირი აღმოჩნდა *a* ზონაში (ნახ. 9.8).

ცხადია, ამ დროს ადგილი აქვს შემდეგ უტოლობას: $h_0 > h > h_{კრ}$, სადაც h არის არათანაბარი მოძრაობის შესაბამისი ცვლადი სიღრმე, რომლის მნიშვნელობაც სხვადასხვა კვეთში სხვადასხვაა. ასევე ცვლადი იქნება ცოცხალი კვეთის ფართობიც და, მაშასადამე, ხარჯის მახასიათებელიც ნაკადის გასწვრივ. რადგანაც განსახილველ შემთხვევაში $h > h_0$, ამიტომ $\omega > \omega_0$ და $K < K_0$, ხოლო იმის გამო, რომ $h > h_{კრ}$-ზე, ნაკადი წყნარ მდგომარეობაშია და კინეტიკურობის პარამეტრი $\Pi_k < 1$.

განვსაზღვროთ $\frac{dh}{d\ell}$ წარმოებულის ნიშანი, რისთვისაც ვისარგებლოთ (9.18) განტოლებით. ზემოთ აღნიშნულის გამო, ფარდობა ერთზე ნაკლებია და ამიტომ (9.18)-ის მრიცხველი დადებითია; ასევე დადებითია მნიშვნელიც. მაშასადამე, $\frac{dh}{d\ell} > 0$. ეს ნიშნავს, რომ ნაკადის სიღრმე დინების მიმართულებით იზრდება და თავისუფალი ზედაპირის წირს ექნება **შეტბორვის წირის სახე.** ის მთლიანად მოთავსებულია a ზონაში და აქვს ჩაზნექილი წირის ფორმა. მას a_I ტიპის შეტბორვის წირს უწოდებენ.

განვიხილოთ სასაზღვრო პირობები. დინების მიმართულებით h სიღრმე იზრდება და ზღვარში მიისწრაფვის უსასრულობისაკენ $(h \to \infty)$. ასეთ შემთხვევაში $K \to \infty$ და $\Pi_k \to 0$, ამიტომ $\frac{dh}{d\ell} \to i$. ეს ნიშნავს, რომ შეტბორვის წირი დინების მიმართულებით ასიმპტოტურად უახლოვდება ჰორიზონტალურ წრფეს, რადგანაც $dh = id\ell$ ტოლობის შემთხვევაში, სიღრმის dh სიდიდით გაზრდას შეესაბამება კალაპოტის ვარდნა $id\ell$ სიდიდით.

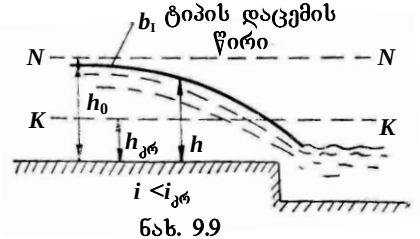
დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით ნაკადის სიღრმე მცირება და მიისწრაფვის ნორმალური სიღრმისაკენ: $h \to h_0$ (h სიღრმე არ შეიძლება h_9-ზე ნაკლები აღმოჩნდეს, რადგან a_I შეტბორვის წირი მთლიანად a ზომაშია მოთავსებული). ასეთ შემთხვევაში $K \to K_0$ და, მაშასადამე,



ნახ. 9.8

$\frac{dh}{d\ell} \to 0$, ე.ი. დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით შეტბორვის წირი ასიმპტოტურად უახლოვდება $N - N$ წირს. როგორც ვხედავთ, ნაგებობის მიერ შექმნილი შეტბორვა თეორიულად უსასრულოდ ვრცელდება. საინჟინრო გაანგარიშებებში შეტბორვის წირის სიგრძეს განსაზღვრავენ ნაგებობიდან იმ კვეთამდე, რომელშიც სიღრმე პრაქტიკულად ნორმალურს (h_0-ს) უახლოვდება.

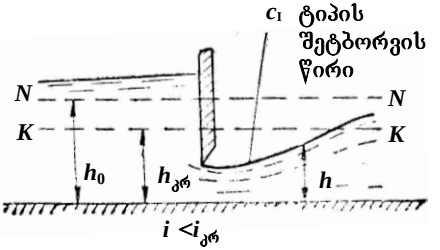
2. ვთქვათ, კალაპოტში ვარდნილის მოწყობის შედეგად თანაბარი მოძრაობა დაირღვა და გადავიდა არათანაბარ მოძრაობაში, ხოლო სითხის თავისუფალი ზედაპირი აღმოჩნდა b ზონაში (ნახ. 9.9). ცხადია, ამ შემთხვევაში გვექნება $h > h_0 > h_{კრ}$ და, როგორც ყველა წყნარი ნაკადისათვის, $\Pi_k < 1$. მაშასადამე, $\frac{dh}{d\ell} < 0$. ეს ნიშნავს, რომ ნაკადის სიღრმე დინების მიმართულებით მცირდება და თავისუფალი ზედაპირის წირს ექნება **დაცემის წირის სახე.** ის მთლიანად მოთავსებულია b ზონაში და აქვს ამოზნექილი წირის ფორმა. მას b_I ტიპის დაცემის წირს უწოდებენ.



ნახ. 9.9

დინების მიმართულებით h სიღრმე მცირდება და მიისწრაფვის კრიტიკული სიღრმისაკენ ($h \to h_{კრ}$). ასეთ შემთხვევაში $k \to k_{კრ} < k_0$ და $\Pi_k \to 1$. ამიტომ $\frac{dh}{d\ell} \to \infty$, ე.ი. $h = h_{კრ}$ წერტილში თავისუფალი ზედაპირის წირის მხები ვერტიკალურია.

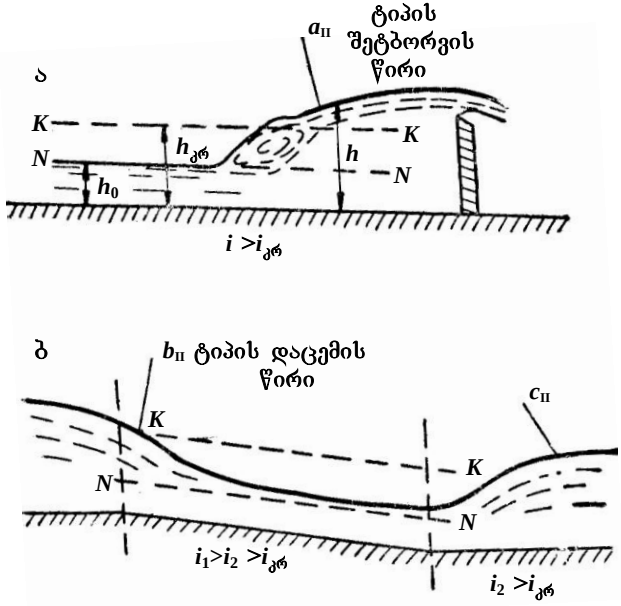
დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით ნაკადის სიღრმე იზრდება და მიისწრაფვის ნორმალური სიღრმისაკენ: $h \to h_0$. ასეთ შემთხვევაში $K \to K_0$ და, მაშასადამე, $\frac{dh}{d\ell} \to 0$, ე.ი. დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით დაცემის წირი ასიმპტოტურად უახლოვდება ნორმალური სიღრმის $N - N$ წირს. დაცემის წირის დასაწ-



ნახ. 9.10

ყისი უსასრულობაშია და წინა პუნქტში გამოთქმული მოსაზრება წირის სიგრძის შესახებ ამ შემთხვევაშიც ძალაში რჩება.

3. (9.10) ნახაზზე ნაჩვენებია კალაპოტის უბანი, რომელზეც თანაბარი მოძრაობისას ნაკადი იმყოფება წყნარ მდგომარეობაში. ახლა, ვთქვათ, ფარის მოწყობის შედეგად თანაბარი მოძრაობა დაირღვა და გადავიდა არათანაბარში, ხოლო სითხის თავისუფალი ზედაპირი აღმოჩნდა *c* ზომაში. ამ შემთხვევაში გვექნება: $h_0 > h_{კრ} > h$. რადგან $h < h_{კრ}$-ზე, კინეტიკურობის პარამეტრი $\Pi_k > 1$.



ნახ. 9.11

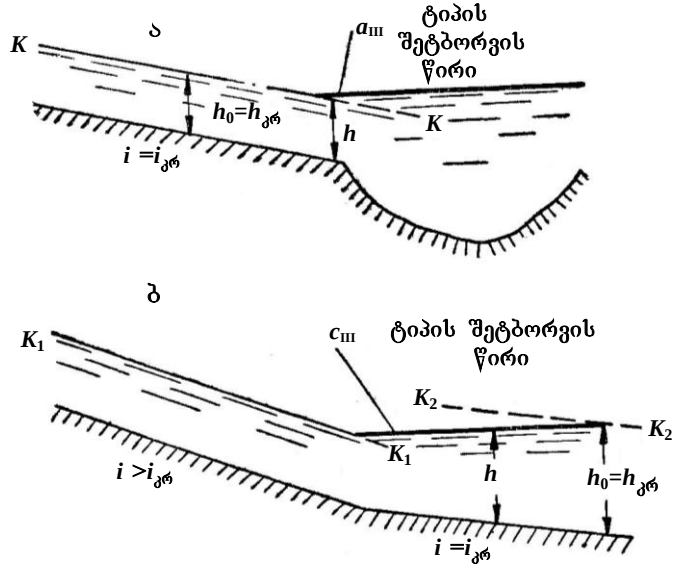
ზემოთ განხილულის ანალოგიურად, ადვილად დავადგენთ, რომ $dh/d\ell > 0$. მაშასადამე, თავისუფალი ზედაპირის წირს ექნება **შეტბორვის წირის სახე,** რომელიც მთლიანად მოთავსებულია *c* ზონაში და აქვს ჩაზნექილი წირის ფორმა. მას c_I ტიპის შეტბორვის წირს უწოდებენ.

დინების მიმართულებით $h \to h_{კრ}$, $K \to K_{კრ} < K_0$ და $\Pi_k \to 1$. ამიტომ $dh/d\ell \to \infty$, ე.ი. $h = h_{კრ}$ წერტილში თავისუფალი ზედაპირის წირის მხები ვერტიკალურია.

დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით $h \to 0$, რასაც ფიზიკური აზრი არ გააჩნია (როცა $h = 0$-ს, მაშინ $Q = 0$-ს).

ამგვარად, პირდაპირი ქანობის ($i > 0$) მქონე კალაპოტში ნაკადის თავისუფალ ზედაპირს შეიძლება ჰქონდეს მხოლოდ სამი შესაძლო ფორმა.

ანალოგიური მსჯელობით დავადგენთ თავისუფალი ზედაპირის წირის ფორმებს II და III შემთხვევისათვის, როცა ნაკადი თანაბარი მოძრაობისას იმყოფება მძაფრ ($h_0 < h_{კრ}, i > i_{კრ}$) და კრიტიკულ ($h_0 = h_{კრ}; i = i_{კრ}$) მდგომარეობაში. 9.11 და 9.12 ნახაზებზე მოცემულია თავისუფალი ზედაპირის შესაძლო ფორმები აღნიშნული შემთხვევებისათვის.



ნახ. 9.12

§ 9.7. ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ფორმები ნულოვანი და უარყოფითი ქანობის ($i = 0; i < 0$) პრიზმულ კალაპოტებში

თანაბარი მოძრაობის განტოლებიდან (შეზის ფორმულიდან) ჩანს, რომ ნულოვანი და უარყოფითი ქანობის კალაპოტებში სითხის თანაბარი მოძრაობა შეუძლებელია. ამიტომ, ნახაზზე ვერ დავიტანთ ვერც თანაბარი მოძრაობის h_0 ნორმალურ სიღრმეს და

ვერც მის შესაბამის $N-N$ წირს. სქემაზე გვექნება მხოლოდ $h_{კრ}$ კრიტიკული სიღრმის შესაბამისი $K-K$ წირი, რადგან კრიტიკული სიღრმის მნიშვნელობა კალაპოტის ქანობზე დამოკიდებული არ არის. მაშასადამე, განსახილველ შემთხვევაში გვექნება მხოლოდ b და c ზონები.

კალაპოტის ნულოვანი ან უარყოფითი ქანობის მქონე უბანზე წყალი მოძრაობს იმ კუთრი ენერგიის (E) ხარჯზე, რომელიც ნაკადს აქვს ასეთ უბანზე შესვლის მომენტში. ეს ენერგია გზადაგზა მცირდება, რადგან ნაკადს უხდება ჰიდრავლიკურ წინაღობათა გადალახვა. ასევე მცირდება კვეთის $\mathcal{E}$ კუთრი ენერგიაც (იხ. § 9.5).

$i=0$ ან $i<0$ ქანობის მქონე უბანზე ნაკადის შესვლა კრიტიკულ მდგომარეობაში ფიზიკურად შეუძლებელია, რადგან ამ დროს ნაკადს აქვს კვეთის კუთრი ენერგიის მინიმუმი და არ არსებობს ენერგიის წყარო ჰიდრავლიკურ წინაღობათა დასაძლევად. ამიტომ ნილოვანი ან უარყოფითი ქანობის მქონე უბანზე ნაკადი შეიძლება შევიდეს მხოლოდ წყნარ ან მძაფრ მდგომარეობაში, განვიხილოთ ეს ორი შემთხვევა.

I. **ნაკადი წყნარ მდგობარეობაში** $(h>h_{კრ})$. კვეთის კუთრი ენერგია ასეთ ნაკადში ხასიათდება $\mathcal{E}=f(h)$ ფუნქციის გრაფიკის ზედა შტოთი (ნახ. 9.5), საიდანაც ჩანს, რომ კვეთის კუთრი ენერგიის შემცირებას შეესაბამება სიღრმის შემცირება დინების მიმართულებით. აქედან დავასკვნით, რომ ნულოვანი და უარყოფითი ქანობის მქონე უბანზე ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ფორმა იქნება **დაცემის წირი.**

II. **ნაკადი მძაფრ მდგომარეობაშია** $(h<h_{კრ})$. კვეთის კუთრი ენერგია ასეთ ნაკადში ხასიათდება $\mathcal{E}=f(h)$ ფუნქციის გრაფიკის ქვედა შტოთი, საიდანაც ჩანს, რომ კვეთის კუთრი ენერგიის შემცირებას შეესაბამება სიღრმის ზრდა დინების მიმართულებით. მაშასადამე, განსახილველ შემთხვევაში ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ფორმა იქნება **შეტბორვის წირი**.

როგორც ვხედავთ, პრიზმულ კალაპოტებში წყლის არათანაბარი მოძრაობისას გვექნება ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის სულ თორმეტი შესაძლო ფორმა. შევნიშნავთ, რომ თავისუფალი ზედაპირის წირები $N-N$ წირს ასიმპტოტურად უახლოვდება, ხოლო $K-K$ წირს ისე, რომ $h=h_{კრ}$ სიღრმისას თავისუფალი ზედაპირის წირის მხები ვერტიკალურია. ამასთან, ეს წირები არასოდეს კვეთს $N-N$ და $K-K$ წრფეებს.

§ 9.8. მაჩვენებლიანი დამოკიდებულება ხარჯის მოდულების ფარდობისათვის. კალაპოტის ჰიდრავლიკური მაჩვენებელი

არათანაბარი მოძრაობის განტოლებაში შედის ფარდობა $(K_0/K)^2$, რომელიც h სიღრმის საკმარისად რთული ფუნქციაა, რადგანაც $K=\omega C\sqrt{R}$ გამოსახულებაში შემავალი სიდიდეების გამოსახვა h-ის საშუალებით გაძნელებულია. ამიტომ, პრაქტიკაში ხშირად სარგებლობენ ბ. ბახმეტევის მაჩვენებლიანი დამოკიდებულებით:

$$(K_0/K)^2=(h_1/h_2)^x, \tag{9.31}$$

სადაც h_1 და h_2 არის ნებისმიერი სიღრმეები მოცემულ პრიზმულ კალაპოტში; K_1 და K_2 – ამ სიღრმეების შესაბამისი ხარჯის მახასიათებლები; x – ე.წ. **კალაპოტის ჰიდრავლიკური მაჩვენებელი**.

x ხარისხის მაჩვენებელს სხვადასხვა ფორმის განივკვეთის კალაპოტისათვის სხვადასხვა მნიშვნელობა აქვს, მაგრამ სწორი ფორმის პრიზმული კალაპოტისათვის ის შეიძლება მუდმივად ჩავთვალოთ. თუ გავალოგარითმებთ (9.31) გამოსახულებას, მივიღებთ x-ის მნიშვნელობას:

$$x=\frac{2(\lg K_1-\lg K_2)}{\lg h_1-\lg h_2}. \tag{9.32}$$

ფართო სწორკუთხა კალაპოტისათვის $x=3$; ფართო პარაბოლური კალაპოტისათვის $x=4$; სამკუთხა კალაპოტისათვის $x=5$; შეზღუდული სიგანის სწორკუთხა და ტრაპეციული კალაპოტებისათვის x შეიძლება გამოვთვალოთ რ. ჩუგაევის ფორმულებით.

სწორკუთხა კალაპოტისათვის:

$$x=3{,}4-\frac{2{,}8}{b/h_{\text{საშ}}+2}. \tag{9.33}$$

ტრაპეციული კალაპოტისათვის:

$$x=3{,}4\left(1+\frac{m}{b/h_{\text{საშ}}+m}\right)-1{,}4\frac{2\sqrt{1-m^2}}{b/h_{\text{საშ}}+2\sqrt{1-m^2}}, \tag{9.34}$$

სადაც $h_{\text{საშ}}$ არის საშუალო სიღრმე; m – კალაპოტის ფერდოს ქვედებულის კოეფიციენტი; b – ფსკერის სიგანე.

არის კალაპოტების ჯგუფი, რომელთათვისაც (9.31) დამოკიდებულება საერთოდ არ გამოდგება (მაგალითად, ჩაკეტილი და შედგენილი პროფილის კალაპოტები).

§ 9.9. პრიზმულ კალაპოტებში წყლის არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლების ინტეგრირება (ბ. ბახმეტევის მეთოდი)

აღნიშნული განტოლება დიფერენციალური ფორმით იძლევა დინების ღერძის გასწვრივ ნაკადის სიღრმის ცვლილების კანონს. მისი ინტეგრირებით მივიღებთ საანგარიშო ფორმულებს შეტბორვისა და დაცემის წირების ასაგებად.

შევნიშნავთ, რომ არაპრიზმულ კალაპოტში წყლის არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებას (9.11) ამოხსნა არა აქვს, რადგანაც, ზოგად შემთხვევაში, არ არის ცნობილი $\omega = f(\ell)$ ფუნქცია. რაც შეეხება პრიზმულ კალაპოტებში არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლების ინტეგრირებას, ეს საკითხი რადიკალურად იქნა გადაწყვეტილი რუსი და საბჭოთა მეცნიერების – ბ. ბახმეტევის, ნ. პავლოვსკის და სხვათა მიერ.

1. **განტოლების ინტეგრირება, როცა** $i > 0$. (9.18) განტოლება ასეთი ფორმით ჩავწეროთ:

$$\frac{dh}{d\ell} = i\frac{1-(K_1/K_2)^2}{1-\dfrac{\alpha Q^2}{g}\dfrac{B}{\omega^3}}. \tag{9.35}$$

ამ გამოსახულებაში K, B და ω სიდიდეები h სიღრმის ფუნქციებია, ხოლო დანარჩენი სიდიდეები მუდმივია. ამიტომ შეგვიძლია ვიგულისხმოთ, რომ (9.35) განტოლების მარჯვენა ნაწილი h-ის რაიმე ფუნქციაა და მაშინ ცვლადთა დაცალკევებით გვექნება: $d\ell = F(h)dh$. მაშასადამე, (9.35) განტოლება ჩვეულებრივი დიფერენციალური განტოლებაა დაცალკევებული ცვლადებით. მისი ინტეგრირებისათვის გარდავქმნათ მარჯვენა ნაწილი.

ვისარგებლოთ ბ. ბახმეტევის (9.31) მაჩვენებლიანი დამოკიდებულებით და განსახილველი შემთხვევისათვის დავწეროთ:

$$(K_0/K)^2 = (h_0/h)^x.$$

მაშინ (9.35) გამოსახულების მრიცხველი ასეთ სახეს მიიღებს:

$$1-(K_0/K)^2 = 1-(h_0/h)^x.$$

მნიშვნელის მეორე შესაკრები ასეთნაირად გარდავქმნათ:

$$\frac{\alpha Q^2 B}{g\omega^3} = \frac{\alpha i K_0^2 B}{g\omega^2\omega} = \frac{\alpha i K_0^2 B}{g\omega^2\omega}\cdot\frac{c^2}{c^2}\frac{\chi}{\chi} = \frac{\alpha c^2 i}{g}\frac{B}{\chi}\frac{K_0^2\chi}{\omega^2 c^2\omega} =$$

$$= \frac{\alpha c^2 i}{g}\frac{B}{\chi}\frac{K_0^2}{\omega^2 c^2 R} = \frac{\alpha c^2 i}{g}\frac{B}{\chi}\left(\frac{K_0}{K}\right)^2 .$$

მაშინ მნიშვნელი ასე ჩაიწერება:

$$1-\frac{\alpha Q^2}{g}\frac{B}{\omega^2} = 1-\frac{\alpha c^2 i}{g}\frac{B}{\chi}\left(\frac{K_0}{K}\right)^2 = 1-\frac{\alpha c^2 i}{g}\frac{B}{\chi}\left(\frac{h_0}{h}\right)^x .$$

აღნიშნულის გათვალისწინებით, (9.35) განტოლება ასეთ სახეს მიიღებს:

$$\frac{dh}{d\ell} = i\frac{1-(K_0/K)^2}{1-\dfrac{\alpha Q^2}{g}\dfrac{B}{\omega^3}} = i\frac{1(h_0/h)^x}{1-\dfrac{\alpha c^2 i}{g}\dfrac{B}{\chi}\left(\dfrac{h_0}{h}\right)^x} .$$

ჩაწერის გამარტივების მიზნით, აღვნიშნოთ: $\frac{\alpha c^2 i}{g}\frac{B}{\chi} = j$. ახლა ბოლო გამოსახულების მრიცხველიც და მნიშვნელიც გავყოთ $\left(\frac{h_0}{h}\right)^x$-ზე, მივიღებთ

$$\frac{dh}{d\ell} = i\frac{(h/h_0)^x}{(h/h_0)^x - j} . \qquad (9.36)$$

(9.36) განტოლებაში შემოვიტანოთ ახალი ცვლადი (ფარდობითი სიღრმე): $\eta = h/h_0$, მაშინ $d\eta = d\,h/h_0$, საიდანაც $dh = h_0 d\eta$, ამიტომ

$$\frac{h_0 d\eta}{d\ell} = i\frac{\eta^x - 1}{\eta^x - j} . \qquad (9.37)$$

ცვლადთა დაცალკევებით მივიღებთ

$$\frac{id\ell}{h_0} = \frac{\eta^x - j}{\eta^x - 1}d\eta = d\eta + (1-j)\frac{d\eta}{\eta^x - 1} .$$

ინტეგრირებით

$$\frac{i(\ell_2 - \ell_1)}{h_0} = \eta_2 - \eta_1 - \int_{\eta_1}^{\eta_2}(1-j)\frac{d\eta}{1-\eta^x} .$$

აღვნიშნოთ

$$\int \frac{d\eta}{1-\eta^x} = \varphi(\eta) + c .$$

შევნიშნოთ, რომ j სიდიდე h სიღრმის ცვლილებით, ჩვეულებრივ, მცირედით იცვლება. ამიტომ, შეგვიძლია ჩავთვალოთ, რომ $j \approx j_{საშ} = const$ და გამოვიტანოთ ინტეგრალის ნიშნის გარეთ.

მაშინ საბოლოოდ

$$\frac{i(\ell_2 - \ell_1)}{h_0} = \eta_2 - \eta_1 - (1 - j_{საშ})\left[\varphi(\eta_2) - \varphi(\eta_1)\right], \qquad (9.38)$$

სადაც $\ell_2 - \ell_1 = \ell$ არის ორ განსახილველ კვეთს შორის კალაპოტის უბნის სიგრძე (ნახ. 9.13);

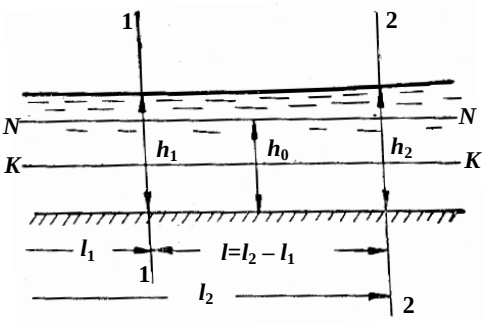
η_1 და η_1 – შესაბამისად, h_1/h_0 და h_2/h_0;

$\varphi(\eta_1)$ და $\varphi(\eta_2) - \varphi(\eta)$ ფუნქციის მნიშვნელობები უბნის ბოლო კვეთებში η_1 და η_2 სიდიდეებისათვის;

$j_{საშ} = \frac{\alpha C^2_{საშi}}{g} \frac{B_{საშ}}{\chi_{საშ}}$; $C_{საშ}$, $B_{საშ}$ და $\chi_{საშ}$ სიდიდეები გამოითვლება საშუალო სიღრმისათვის $h_{საშ} = \frac{h_1 + h_2}{2}$.

აქ h_1 და h_2 სიღრმეებია განსახილველი უბნის ბოლო კვეთებში.

$\varphi(\eta) = \int \frac{d\eta}{1 - \eta^x} + c$ ფუნქციის რიცხვითი მნიშვნელობების საპოვნელად ნ. პავლოვსკის მიერ შედგენილია ცხრილები კალაპოტის ჰიდრავლიკური მაჩვენებლის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის ($x = 2{,}0$ -დან $x = 5{,}4$ -მდე $\Delta x = 0{,}25$ ინტერვალით).



ნახ. 9.13

(9.38) განტოლების საშუალებით შეიძლება გადავწყვიტოთ h_2 (ან h_1) სიღრმე, რომელიც პირველი კვეთიდან (ან მეორედან) დაცილებულია ℓ მანძილით (კვეთი h_2 სიღრმით მდებარეობს დინების მიმართულებით ქვემოთ);

ბ) მოცემულია h_1 და h_2. უნდა განვსაზღვროთ ℓ მანძილი პირველ და მეორე კვეთებს შორის;

გ) გარკვეულ კვეთში მოცემულია h_1 ან h_2. უნდა ავაგოთ ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის წირი.

2. **განტოლების ინტეგრირება, როცა** $i=0$. ამ შემთხვევაში (7.16) განტოლება ასეთ სახეს ღებულობს:

$$\frac{dh}{d\ell}=\frac{\dfrac{Q^2}{\omega^2c^2R}}{\dfrac{\alpha Q^2}{g}\dfrac{B}{\omega^3}-1}. \tag{9.39}$$

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, როცა $i=0$-ს, ნაკადის თანაბარი მოძრაობა შეუძლებელია. ამიტომ (9.39) განტოლების გარდაქმნისას h_0 ნორმალური სიღრმის ნაცვლად სარგებლობენ კრიტიკული სიღრმის ცნებით.

დავუშვათ, რომ მოცემულ ჰორიზონტალურ კალაპოტში გამავალი Q ხარჯი სიდიდით იმ ხარჯის ტოლია, რომელიც გაედინება თანაბარი მოძრაობის პირობებში ასეთივე ფორმისა და ზომების კალაპოტში ფსკერის ქანობი რომ კრიტიკული ყოფილიყო. მაშინ $Q=K_{კრ}\sqrt{i_{კრ}}$, სადაც $K_{კრ}=\omega_{კრ}c_{კრ}\sqrt{R_{კრ}}$ არის კრიტიკული სიღრმის შესაბამისი ხარჯის მახასიათებელი. აღნიშნულის გათვალისწინებით, (9.39) განტოლება ასეთ სახეს მიიღებს:

$$\frac{dh}{d\ell}=\frac{i_{კრ}K_{კრ}^2/K^2}{\dfrac{i_{კრ}K_{კრ}^2B}{g\omega^3}}=i_{კრ}\frac{\left(K_{კრ}/K\right)^2}{\dfrac{\alpha i_{კრ}K_{კრ}^2}{g\omega^3}-1}. \tag{9.40}$$

გარდავქმნათ ამ გამოსახულების მნიშვნელი ისე, როგორც ეს წინა შემთხვევაში $(i>0)$ გვქონდა:

$$\frac{\alpha i_{კრ}K_{კრ}^2B}{g\omega^3\omega}\frac{c^2}{c^2}\frac{\chi}{\chi}-1=\frac{\alpha c^2i_{კრ}}{g}\frac{B}{\chi}\frac{K_{კრ}^2}{K^2}-1.$$

(9.40) განტოლება ასეთ სახეს მიიღებს:

$$\frac{dh}{d\ell}=i_{კრ}\frac{\left(K_{კრ}/K\right)^2}{\dfrac{\alpha c^2i_{კრ}}{g}\dfrac{B}{\chi}\left(\dfrac{K_{კრ}}{K}\right)^2-1}. \tag{9.41}$$

აღვნიშნოთ: $\dfrac{\alpha c^2i_{კრ}}{g}\dfrac{B}{\chi}=j_{კრ}$. ბ. ბახმეტევის მაჩვენებლიან დამოკიდებულებას განსახილველი შემთხვევისათვის ასეთი სახით ვწერთ:

$$(K_{კრ}/K)^2 = \left(h_{კრ}/h\right)^x . \qquad (9.42)$$

აღნიშნულის გათვალისწინებით, (9.41) გამოსახულება მიიღებს სახეს:

$$\frac{dh}{d\ell} = i_{კრ}\frac{\left(h_{კრ}/h\right)^x}{j_{კრ}\left(h_{კრ}/h\right)^x - 1} = \frac{i_{კრ}}{j_{კრ} - \left(h_{კრ}/h\right)^x} . \qquad (9.43)$$

შემოვიტანოთ ახალი ცვლადი: $\xi = h/h_{კრ}$, მაშინ $d\xi = d\,h/h_{კრ}$, საიდანაც $dh = h_{კრ}d\xi$, ამიტომ

$$\frac{h_{კრ}d\xi}{d\ell} = \frac{i_{კრ}}{j_{კრ} - \xi^x} . \qquad (9.44)$$

ცვლადთა დაცალკევებით მივიღებთ:

$$\frac{i_{კრ}d\xi}{h_{კრ}} = (j_{კრ} - \xi^x)d\xi .$$

ინტეგრირებით (ჩავთვალოთ, რომ $j_{კრ} = const$)

$$\frac{i_{კრ}(\ell_2 - \ell_1)}{h_{კრ}} = j_{კრ}(\xi_2 - \xi_1) - \frac{1}{x+1}\left(\xi_2^{x+1} - \xi_1^{x+1}\right). \qquad (9.45)$$

ეს განტოლება შეიძლება ასეთ სახეზე დავიყვანოთ:

$$\frac{i_{კრ}(\ell_2 - \ell_1)}{h_{კრ}} = (\xi_2 - \xi_1)(j_{კრ} - 1) - \left[\varphi(\xi_2) - \varphi(\xi_1)\right], \qquad (9.46)$$

სადაც $\varphi(\xi)$ ფუნქციის მნიშვნელობები $\left[\varphi(\xi_1)\right.$ და $\left.\varphi(\xi_2)\right]$ მოიძებნება ცხრილებიდან, ξ_1 და ξ_2 სიდიდეების მიხედვით წინასწარ დადგენილი x-სთვის. $j_{კრ}$ გამოითვლება განსახილველ უბანზე საშუალო სიღრმისათვის. ხშირ შემთხვევაში უშვებენ, რომ $j_{კრ} \approx 1{,}0$.

3. **განტოლების ინტეგრირება, როცა** $i < 0$. გამოყვანის გარეშე მოგვყავს საბოლოო შედეგი:

$$\frac{i'(\ell_2 - \ell_1)}{h'_0} = -(\xi_2 - \xi_1) + (1 + j'_{საშ})\left[\varphi(\xi_2) - \varphi(\xi_1)\right]. \qquad (9.47)$$

აქ $\xi_1 = h_1/h'_0$ და $\xi_2 = h_2/h'_0$ არის ფარდობითი სიღრმეები; $i' - $კალაპოტის ფსკერის ქანობის აბსოლუტური მნიშვნელობა $i' = |i|$; $h'_0 - $წარმოსახვითი ნორმალური სიღრმე, რომელიც დამყარდებოდა თანაბარი მოძრაობის პირობებში მოცემული უარყოფითი ქანობის მქონე კალაპოტში, წყალს რომ დინების ნამდვილი მიმართულების საწინააღმდეგოდ ემოძრავა; $j'_{საშ} - $გა-

მოითვლება ისევე, როგორც პირდაპირი ქანობის ($i<0$) შემთხვევაში. რაც შეეხება $\varphi(\xi)$ ფუნქციას, მისი მნიშვნელობები მოიძებნება ცხრილებიდან, ξ_1 და ξ_2 სიდიდეების მიხედვით წინასწარ დადგენილი x-სთვის.

§ 9.10. წყლის მდოვრედ ცვალებადი არათანაბარი მოძრაობა არაპრიზმულ ხელოვნურ კალაპოტებში (არხებში). ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის წირის აგება ბერნულის განტოლებით (ვ.ჩარნომსკის მეთოდი)

განვიხილოთ არაპრიზმული ხელოვნური კალაპოტი, რომელიც სიგრძეზე ფართოვდება ან ვიწროვდება. ასეთ შემთხვევაში არათანაბარი მოძრაობის (9.11) დიფერენციალური განტოლება ძალზე რთულ სახეს ღებულობს და მისი ინტეგრირება ზოგად შემთხვევაში მიახლოებითაც კი ვერ ხერხდება. საქმეს ართულებს ისიც, რომ ჯერ კიდევ სრულად არ არის შესწავლილი, თუ რა ფორმები შეიძლება ჰქონდეს სითხის თავისუფალ ზედაპირს აღნიშნულ კალაპოტებში.

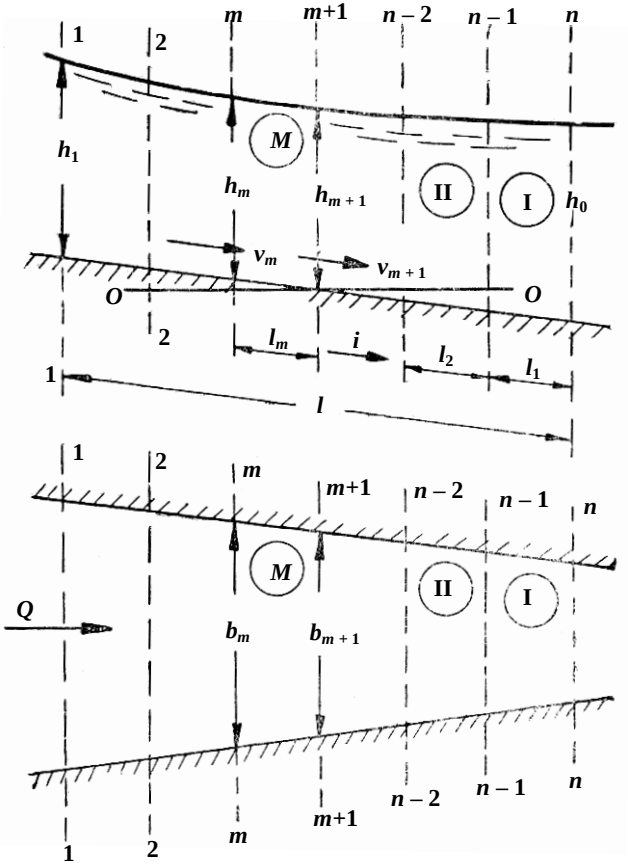
1914 წელს ვ. ჩარნომსკიმ გამოაქვეყნა ამოცანის გადაწყვეტის თავისი მეთოდი (სასრულ სხვაობათა მეთოდი), რომელიც ეყრდნობა ბერნულის განტოლების გამოყენებას.

ვთქვათ, $i>0$ შემთხვევაში მოცემულია: არხის კალაპოტი, Q ხარჯი და h_n სიღრმე. $n-n$ კვეთებს (ნახ. 7.14) შორის L მანძილს დავყობთ **შედარებით მცირე** ℓ **სიგრძის** ტოლ უბნებად, რის შემდეგაც თითოეულ უბანს გავიანგარიშებთ ცალ-ცალკე დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით (ჯერ I უბანს, შემდეგ II-ს და ა.შ.).

მაგალითისათვის განვიხილოთ m და $m+1$ კვეთებით შემოფარგლული ℓ_m სიგრძის M უბანი. გაანგარიშება მდგომარეობს (ერთ-ერთი ვარიანტი): შემდეგში i-ის, ℓ_m-ისა და h_{m+1}-ის მიხედვით გამოვთვალოთ ნაკადის h_m სიღრმე უბნის დასაწყისში. გავატაროთ O-O საფარდი სიბრტყე $(m+1)$ კვეთში ფსკერის უდაბლეს წერტილზე და შევადგინოთ ბერნულის განტოლება m და $(m+1)$ კვეთებისათვის:

$$h_m + i\ell_m + \frac{\alpha v_m^2}{2g} = h_{m+1} + \frac{\alpha v_{m+1}^2}{2g} + h_{\text{დან}}, \qquad (9.47)$$

სადაც $i\ell_m$ არის კალაპოტის ფსკერის ვარდნა m კვეთიდან $(m+1)$ კვეთამდე;



ნახ. 9.14

v_m და v_{m+1} – საშუალო სიჩქარეები;

$h_{დან}$ – დაწნევის დანაკარგი განსახილველ კვეთებს შორის. მდოვრედ ცვალებადი მოძრაობისას დაწნევის ადგილობრივ დანაკარგებს უგულებელვყოფთ, ამიტომ $h_{დან} = h_{სიგ}$.

როგორც გვახსოვს, ჰიდრავლიკური ქანობი არის დაწნევის დანაკარგი სიგრძის ერთეულზე და, (9.7) ფორმულის თანახმად, ტოლია: $I = \frac{v^2}{C^2 R}$. ამიტომ ℓ_m სიგრძის უბანზე დაწნევის დანაკარგი იქნება:

$$h_{სიგ} = I_{საშ} \ell_m = i_{ხახასაშ.} \ell_m , \qquad (9.48)$$

სადაც $i_{\text{ხახ.საშ.}}$ არის ხახუნის ქანობის საშუალო მნიშვნელობა l_m სიგრძეზე.

მაშინ ბერნულის განტოლება (9.47) შეიძლება ასეთი სახით ჩავწეროთ:

$$\ell_m = \frac{Э_{m+1} - Э_m}{i - i_{\text{ხახ.საშ.}}}. \tag{9.49}$$

ამ გამოსახულებაში, რომელიც ძირითად საანგარიშო განტოლებას წარმოადგენს, $Э_m$ და $Э_{m+1}$ კვეთის კუთრი ენერგიის მნიშვნელობებია, შესაბამისად, m და $(m+1)$ კვეთებისათვის:

$$Э_m = h_m + \frac{\alpha v_m^2}{2g}; \quad Э_{m+1} = h_{m+1} + \frac{\alpha v_{m+1}^2}{2g}; \tag{9.50}$$

$i_{\text{ხახ.საშ.}}$ გამოითვლება ფორმულით (9.7 გამოსახულების თანახმად):

$$i_{\text{ხახ.საშ.}} = \frac{v_{\text{საშ}}^2}{C_{\text{საშ}}^2 R_{\text{საშ}}}, \tag{9.51}$$

სადაც $v_{\text{საშ}}$, $C_{\text{საშ}}$, $R_{\text{საშ}}$ არის $h_{\text{საშ}} = \frac{h_m + h_{m+1}}{2}$ საშუალო სიღრმით გამოთვლილი ჰიდრავლიკური ელემენტები.

(9.49) განტოლებას ვხსნით შერჩევის მეთოდით. m კვეთში ვუშვებთ სიღრმის სხვადასხვა მნიშვნელობას: $h_{m_1}, h_{m_2}, h_{m_2}, \cdots, h_{m_i}$ და თითოეული სიღრმისთვის (9.50) და (9.51) ფორმულებით განვსაზღვრავთ $Э_m$ და $i_{\text{ხახ}}$ სიდიდეებს. საძიებელი h_m სიღრმე იქნება ის, რომელიც დააკმაყოფილებს (9.49) ტოლობას.

შემდეგ გავიანგარიშებთ დინების საწინააღმდეგოდ (ზემოთ) მდებარე მომდევნო უბანს, რომლისთვისაც უკვე ცნობილი იქნება h_m სიღრმე და ა.შ. ნაპოვნი სიღრმეებით განსაზღვრულ წერტილებს შევაერთებთ მდოვრე წირით. ეს უკანასკნელი იქნება თავისუფალი ზედაპირის საძიებელი წირი (AB).

მოცემული რომ იყოს h_1 სიღრმე 1-1 კვეთში, მაშინ გაანგარიშებას ჩავატარებთ იგივე (9.49) განტოლებით, მხოლოდ ნაკადის დინების მიმართულებით, ე.ი. განსახილველი M უბნის ℓ_m სიგრძისა და h_m სიღრმის მიხედვით ვიპოვოთ h_{m+1} სიღრმეს.

(9.49) განტოლება მართებულია ნულოვანი $(i = 0)$ და უარყოფითი ქანობების შემთხვევაშიც:

როცა $i = 0$-ს, მაშინ

$$\ell_m = \frac{Э_{m+1} - Э_m}{i_{\text{ხახ.საშ.}}}; \tag{9.52}$$

როცა $i<0$, მაშინ

$$\ell_m = \frac{Э_{m+1} - Э_m}{|i| - i_{\text{ხახ.}}}, \qquad (9.53)$$

სადაც $|i|$ არის i უარყოფითი ქანობის აბსოლუტური მნიშვნელობა.

იმის გამო, რომ პრიზმული კალაპოტი არაპრიზმულის კერძო შემთხვევაა, (9.49) განტოლებით შეიძლება ვისარგებლოთ პრიზმულ კალაპოტში ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის წირის ასაგებადაც. ამ შემთხვევაში განტოლება ამოიხსნება შერჩევის გარეშე.

§ 9.11. წყლის მოძრაობა ბუნებრივ კალაპოტებში. ზოგადი ცნობები

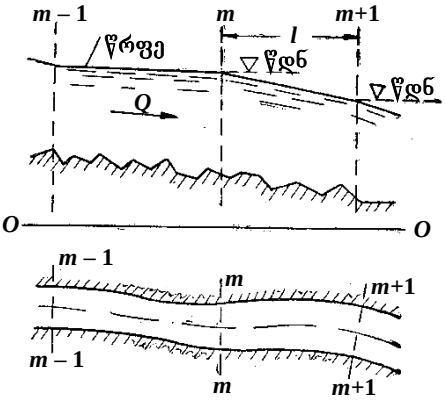
ხელოვნური კალაპოტებისაგან (არხებისაგან) განსხვავებით, ბუნებრივი კალაპოტები (მდინარეები) ხასიათდება განივკვეთების უაღრესად არასწორი გეომეტრიული ფორმით, კლაკნილობით, ფსკერის ქანობის, ხორკლიანობისა და სიღრმის ცვალებადობით. ამიტომ, წყლის მოძრაობა მათში არათანაბარია. იშვიათ შემთხვევაში მდინარის ამა თუ იმ უბანზე მოძრაობა პირობითად შეიძლება თანაბრად ჩავთვალოთ.

სხვადასხვა წყალსამეურნეო ღონისძიების განხორციელება მდინარეებზე არღვევს მათ ბუნებრივ რეჟიმს. მაგალითად, კაშხლის აგების შედეგად მდინარეში იქმნება შეტბორვა, რომელიც, ზოგ შემთხვევაში, მდინარის დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით ათეულ და ასეულ კილომეტრზე ვრცელდება. ამასთან დაკავშირებით, იქმნება აუცილებლობა, ვიცოდეთ შემტბორავი ნაგებობის ზემოთ სიღრმეები, შესაძლო დატბორვის ზონა და სხვ., რათა მიღებულ იქნეს საჭირო ზომები. მაშასადამე, ამ შემთხვევაში ამოცანა დაიყვანება შეტბორვის წირის აგებასა და მისი სიგრძის განსაზღვრაზე.

პირიქით, მდინარის კალაპოტის გაწმენდისას იზრდება მისი გამტარობის უნარი, იცვლება ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ქანობი, რის შედეგადაც იქმნება დაცემის წირის აგებისა და მისი სიგრძის განსაზღვრის აუცილებლობა.

ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის წირის ასაგებად მდინარის კალაპოტს ცალკეულ **საანგარიშო უბნებად** ყოფენ; ყოველი ასეთი უბნის ფარგლებში თავისუფალი ზედაპირის წირს ამა თუ იმ ქანობის მქონე სწორ ხაზად თვლიან (ნახ. 9.15). კალაპოტის საანგარიშო უბნებად დაყოფისას მაქსიმალურად ცდილობენ თითოეული უბანი, რამდენადაც ეს შესაძლებელია, ერთტიპური

გეომეტრიული და ჰიდრავლიკური ელემენტებს შეიცავდეს. თავისუფალი ზედაპირის ნიშნულების მნიშვნელოვანმა სხვაობამ საანგარიშო უბნის თავსა და ბოლოში შეიძლება დიდ უზუსტობამდე მიგვიყვანოს, თავისუფალი ზედაპირის წირის აგებისას. ეს სხვაობა არ უნდა იყოს 0,5-1,0 მ-ზე მეტი (ოპტიმალური მნიშვნელობა 0,2-0,3 მ-ს შეადგენს). თავისუფალი ზედაპირის ვარდნის ოპტიმალური მნიშვნელობა განაპირობებს სხვადასხვა მდინარეზე სხვადასხვა უბნის სიგრძის სხვადასხვაობას; ზოგჯერ ეს სიგრძე რამდენიმე კილომეტრს აღწევს.



ნახ. 9.15.

ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის აგებისას[1] ჩვენი ამოცანა მდგომარეობს იმაში, რომ მოცემული Q ხარჯისათვის განვსაზღვროთ წყლის დონის ნიშნული m კვეთში (ნახ. 9.15), თუ ცნობილია წყლის დონის ნიშნული $(m+1)$ კვეთში, ამ უკანასკნელის მიხედვით ვსაზღვრავთ ნიშნულს $(m-1)$ კვეთში და ა.შ.

ამ ამოცანის გადასაწყვეტად არსებობს **ორი სხვადასხვა მეთოდი**:

პირველი მეთოდის არსი იმაში მდგომარეობს, რომ მდინარის რეალურ საანგარიშო უბანს (შემოფარგლულს m და $m+1$ კვეთებით) ცვლიან რაიმე ფიქტიური პრიზმული კალაპოტით, რომლისთვისაც ზემოთ განხილული ხერხებით (§ 9.9) პოულობენ კვეთში (m) წყლის დონის საძიებელ ნიშნულს;

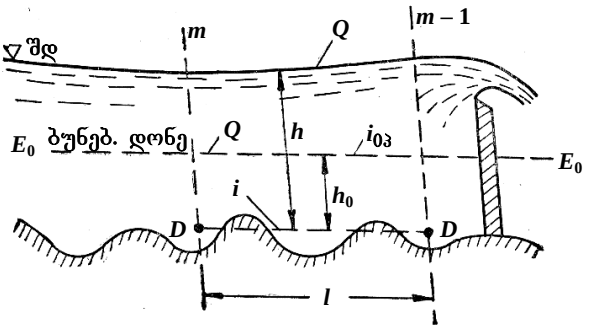
მეორე მეთოდი გულისხმობს არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლების გამოყენებას საანგარიშო უბნისათვის.

პირველი მეთოდი გამოიყენება ძირითადად საორიენტაციო გაანგარიშებისას.

[1] იგულისხმება ნაკადის თავისუფალი ზედაპირი უკვე არა ბუნებრივ პირობებში, არამედ ამა თუ იმ წყალსამეურნეო ღონისძიების განხორციელების შემდეგ. 9.15 ნახაზზე მოცემულია მდინარის გრძივი ჭრილი ბუნებრივ პირობებში. აქვე შევნიშნავთ, რომ ჭრილის ჰორიზონტალური და ვერტიკალური მასშტაბები დამახინჯებულია.

მეორე მეთოდი უფრო ზუსტია, მაგრამ დაკავშირებულია დიდი მოცულობის გამოთვლით სამუშაოებთან.

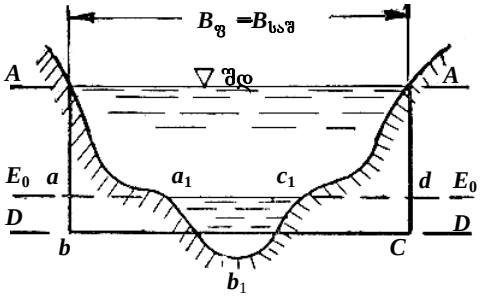
1. **ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის წირის აგება ბუნებრივი კალაპოტის ფიქტიური პრიზმული კალაპოტით შეცვლით (პირველი მეთოდი).** მოცემული ბუნებრივი კალაპოტი შეიძლება შეიცვალოს სწორკუთხა, ტრაპეციული და სხვა ნებისმიერი პრიზმული კალაპოტით. იმის გამო, რომ განსახილველი მეთოდი ძალზე მიახლოებითია, ბუნებრივი კალაპოტის საანგარიშო უბანს ცვლიან ფიქტიური **ფართო სწორკუთხა** და **პარაბოლური** კალაპოტით (ფიქტიური კალაპოტის სხვა ფორმას, როგორც წესი, არ განიხილავენ) იმის მიხედვით, თუ რომელია უფრო ახლოს თავისი განივკვეთის ფორმით ბუნებრივი კალაპოტის განივკვეთთან. ფიქტიური კალაპოტის ფსკერის ქანობს იღებენ $i = i_{03} = \frac{\Delta_0}{\ell}$ სიდიდის ტოლს, სადაც ℓ არის განსახილველი საანგარიშო უბნის სიგრძე; Δ_0 – ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის $(E_0 - E_0)$ ვარდნა ℓ მანძილზე ბუნებრივ მდგომარეობაში იმ Q ხარჯისათვის, რომლისთვისაც უნდა ავაგოთ თავისუფალი ზედაპირის წირი (ნახ. 7.16); i_{03} – თავისუფალი ზედაპირის $(E_0 - E_0)$ ქანობი (პიეზომეტრული ქანობი) ბუნებრივ მდგომარეობაში. მაშასადამე, ფიქტიური კალაპოტის ფსკერის *D-D* წრფე $E_0 - E_0$ წრფის პარალელურია. ამასთან, *D-D* წრფე $E_0 - E_0$ წრფიდან დაცილებულია ფიქტიური კალაპოტისათვის გამოთვლილი Q ხარჯის შესაბამისი



ნახ. 9.16

h_0 ნორმალური სიღრმის ტოლი მანძილით. ეს უკანასკნელი ფართო სწორკუთხა კალაპოტისათვის $(x \approx B)$ შეიძლება განვსაზღვროთ ტოლმანის მეთოდით.

განვიხილოთ საანგარიშო უბნის რაიმე შუალედური კვეთი (ნახ. 7.17). $E_0 - E_0$-ით აღნიშნულია წყლის დონე ბუნებრივ მდგომარეობაში მოცემული ხარჯისთვის, ხოლო *A-A* – წყლის დონე (შეტბორვის დონე) კაშხლის აგების შემდეგ. ნაკადის საშუალო სიგანე $B_{საშ}$ შეტბორილ მდგომარეობაში წინასწარ ცნობილი არ არის, რადგან არ ვიცით *A-A* დონის მდებარეობა. თუმცა, ტოლმანის მიხედვით, $B_{საშ}$ შეიძლება დავადგინოთ გარკვეული მიახლოებით ვიზუალურად. ვთვლით, რომ ფიქტიური სწორკუთხა კალაპოტის სიგანე $B_ფ = B_{საშ}$ და *abcd* ცოცხალი კვეთი თანაბარი მოძრაობისას ატარებს ისეთივე ხარჯს, როგორსაც ბუნებრივი კალაპოტის $a_1b_1c_1$ ცოცხალი კვეთი. ამ პირობიდან გამომდინარე, გვექნება:



ნახ. 9.17

$$Q = \omega_ფ C_ფ \sqrt{R_ფ i}\ , \tag{9.54}$$

სადაც $\omega_ფ = B_{საშ} h_0$; $R_ფ = h_0$; $i = i_{03}$ (ინდექსი „ფ“ აღნიშნავს ფიქტიური კალაპოტის შესაბამის ჰიდრავლიკურ და გეომეტრიულ ელემენტებს).

აღნიშნულის გათვალისწინებით, (9.54) განტოლება ასეთ სახეს მიიღებს:

$$Q = h_0 B_{საშ} C_ფ \sqrt{h_0 i_{03}}\ ,$$

საიდანაც

$$h_0 = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B_{საშ}^2 C_ფ^2 i_{03}}}\ . \tag{9.55}$$

ფიქტიური ფართო პარაბოლური კალაპოტისათვის h_0 სიღრმის გამოსათვლელი ფორმულა, რომელიც უფრო რთულ სახეს ღებულობს, აქ არ მოგვყავს.

თუ გავითვალისწინებთ მიღებულს და დავუშვებთ, რომ შეზის კოეფიციენტი არ იცვლება კალაპოტში სითხის ცვლილებით, ე.ი. $C = const$, $j = 0$, $x = 3$ ფიქტიური სწორკუთხა კალაპოტისათვის და $x = 4$ ფიქტიური პარაბოლური კვეთისათვის,

ბ.ბახმეტევის არათანაბარი მოძრაობის განტოლება მიიღებს შედარებით მარტივ სახეს:

ფიქტიური ფართო სწორკუთხა კალაპოტისათვის (დიუპუირულმანის განტოლება)

$$\frac{i\ell}{h_0} = D\left(\frac{a_{\text{ზ}}}{h_0}\right) - D\left(\frac{a_{\text{საწ}}}{h_0}\right), \tag{9.56}$$

სადაც $a_{\text{ზ}}$ და $a_{\text{საწ}}$ არის თავისუფალი ზედაპირის წირის დაცილება h_0 ნორმალური სიღრმის შესაბამისი წირიდან საანგარიშო უბნის ბოლო და საწყის კვეთებში.

ფიქტიური ფართო პარაბოლური კალაპოტისათვის (ტოლკმიტის განტოლება)

$$\frac{i\ell}{h_0} = T(\eta_{\text{ზ}}) - T(\eta_{\text{საწ}}), \tag{9.57}$$

სადაც $\eta_{\text{ზ}}$ და $\eta_{\text{საწ}}$ არის ფიქტიური კალაპოტის ბოლო და საწყის კვეთებში ფარდობითი სიღრმეები.

(956) და (9.57) გამოსახულებებში შემავალი $D\left(\frac{a}{h_0}\right)$ და $T(\eta)$ ფუნქციების მნიშვნელობები აიღება სპეციალურ ლიტერატურაში მოყვანილი ცხრილებიდან.

2. **ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის წირის აგება არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლების უშუალოდ გამოყენების გზით**[1]. ვისარგებლოთ (3.82) განტოლებით:

$$I = -\frac{d}{d\ell}\left(z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g}\right)$$

და მივცეთ მას შემდეგი სახე (გავითვალისწინოთ, რომ ღია კალაპოტებისათვის $\frac{d}{d\ell}\left(\frac{p}{\gamma}\right) = 0$):

$$I = -\frac{dz}{d\ell} - \frac{d}{d\ell}\left(\frac{\alpha v^2}{2g}\right). \tag{9.58}$$

ვიგულისხმოთ, რომ $\alpha = const$ და მხედველობაში მივიღოთ (3.80) და (7.7) გამოსახულებები, გვექნება:

[1] პარაგრაფის პირველ პუნქტში მოყვანილი ზოგადი ცნობები და მითითებები მთლიანად ეხება მესამე პუნქტს.

$$i_3 = -\frac{dz}{d\ell} = \alpha \frac{d}{d\ell}\left(\frac{v^2}{2g}\right) + \frac{v^2}{C^2 R}, \qquad (9.59)$$

სადაც $I_3 = -\frac{dz}{d\ell}$ არის პიეზომეტრული ქანობი; $I = \frac{v^2}{C^2 R}$ – ჰიდრავლიკური ქანობი.

(7.59) წყლის **არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებაა** სხვა ფორმით. ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის წირების ასაგებად ვისარგებლოთ სწორედ ამ განტოლებით, რომელიც ასეთი სახით ჩავწეროთ:

$$-dz = \alpha d\left(\frac{v^2}{2g}\right) + \frac{v^2}{C^2 R} d\ell . \qquad (9.60)$$

ამ განტოლების ინტეგრირება ბუნებრივი კალაპოტებისათვის ვერ ხერხდება, ამიტომ შემოიფარგლებიან მისი მიახლოებითი ინტეგრირებით; განსაკუთრებით ფართოდ გამოიყენება მიახლოებითი უშუალო ინტეგრირების მეთოდი, რომელიც გულისხმობს (9.60) განტოლების შეცვლას სასრული სხვაობების განტოლებით.

$$\Delta z = \Delta\left(\alpha \frac{v^2}{2g}\right) + \int_0^{\ell} \frac{v^2}{C^2 R} d\ell , \qquad (9.61)$$

სადაც $\Delta z = z_m - z_{m+1}$ არის საანგარიშო უბნის საწყის და ბოლო კვეთებში წყლის დონეთა ნიშნულების სხვაობა;

ℓ – უბნის სიგრძე.

$$\Delta\left(\frac{\alpha v^2}{2g}\right) = \alpha \frac{v_{m+1}^2 - v_m^2}{2g} .$$

(9.61) განტოლებაში შემავალი ინტეგრალი შეიძლება ასეთი სახით წარმოვადგინოთ:

$$\int_0^{\ell} \frac{v^2}{C^2 R} d\ell = \int_0^{\ell} \frac{Q^2}{K^2} d\ell = Q^2 \frac{\ell}{K_{საშ}^2} .$$

მაშინ (9.61) განტოლება შემდეგ სახეს მიიღებს:

$$\Delta z = \alpha \frac{v_{m+1}^2 - v_m^2}{2g} + Q^2 \frac{\ell}{K_{საშ}^2} , \qquad (9.62)$$

სადაც $\frac{\ell}{K_{საშ}^2}$ არის ე.წ. კალაპოტის საანგარიშო უბნის **წინაღობის მოდული,** რომელიც შეიძლება გამოვთვალოთ ფორმულით:

$$\frac{\ell}{K^2_{\text{საშ}}} = \frac{\dfrac{1}{K_m^2} + \dfrac{1}{K_{m+1}^2}}{2}\,. \qquad (9.63)$$

აქ K_m და K_{m+1} ხარჯის მახასიათებლებია, შესაბამისად, m და $(m+1)$ კვეთებში $K_m = \omega_m C_m \sqrt{R_m}$; $K_{m+1} = \omega_{m+1} C_{m+1} \sqrt{R_{m+1}}$. ცხადია, ω_m, C_m, R_m და ω_{m+1}, C_{m+1}, R_{m+1} სიდიდეები უნდა განისაზღვროს წყლის დონის z_m და z_{m+1} ნიშნულების მიხედვით.

შევნიშნავთ, რომ $\dfrac{\ell}{K^2_{\text{საშ}}}$ ფარდობა მოცემული ხორკლიანობის მქონე კალაპოტის განსახილველი უბნისათვის დამოკიდებულია წყლის დონის $z_{\text{საშ}} = \dfrac{z_m + z_{m+1}}{2}$ საშუალო ნიშნულზე და არ არის დამოკიდებული თავისუფალი ზედაპირის ქანობზე. ამ პირობას ნ. პავლოვსკიმ **წინაღობის მოდულის ინვარიანტულობის (უცვლელობის) პოსტულატი** უწოდა.

თუ ვიგულისხმებთ, რომ

$$\frac{v_{m+1}^2 - v_m^2}{2g} \approx 0\,,$$

მაშინ (9.62) განტოლება ასეთ სახეს მიიღებს:

$$z_m - z_{m+1} = Q^2 \frac{\ell}{K^2_{\text{საშ}}}\,. \qquad (9.64)$$

ამ განტოლებით სარგებლობენ ძირითადად ბუნებრივ კალაპოტებში ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის წირების ასაგებად. მისი საშუალებით შეიძლება ვიპოვოთ (შერჩევის გზით) m კვეთში წყლის დონის z_m ნიშნული, თუ ცნობილია z_{m+1} ნიშნული $(m+1)$ კვეთში და Q ხარჯი.

გაანგარიშება ((9.64) ფორმულით) შემდეგი თანამიმდევრობით სრულდება. გადავწეროთ ეს განტოლება ასეთი სახით:

$$z_m - Q^2 \frac{\ell}{K^2_{\text{საშ}}} = z_{m+1}\,. \qquad (9.65)$$

გამოსახულების მარცხენა ნაწილი z_m-ის ფუნქციას წარმოადგენს, ე.ი.

$$z_m - Q^2 \frac{\ell}{K^2_{\text{საშ}}} = f(z_m)\,. \qquad (9.66)$$

ხოლო მარჯვენა ნაწილი (z_{m+1}) უკვე ცნობილია.

აღნიშნულის გათვალისწინებით (9.65) განტოლება z_m-ის მიმართ შერჩევით ამოიხსნება. გამოთვლების შედეგები შეგვაქვს ცხრილში.

z_m	K_m^2	$K_{m\text{საშ}}^2 = \dfrac{K_m^2 + K_{m+1}^2}{2}$	$\dfrac{\ell}{K_{\text{საშ}}^2}$	$Q^2 \dfrac{\ell}{K_{\text{საშ}}^2}$	$f(z_m)$
z'_m z''_m z'''_m					

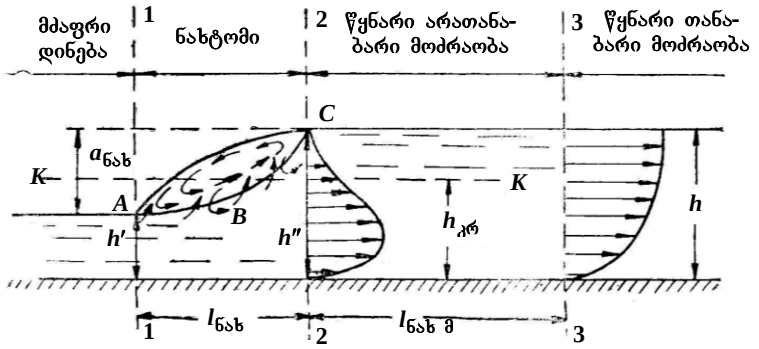
დასასრულ, შევნიშნავთ, რომ ზემოთ აღნიშნულის გარდა, ლიტერატურაში მოყვანილია ამოცანის გადაწყვეტის სხვა მრავალი მეთოდიც. ამ მეთოდების ერთი ჯგუფი საშუალებას იძლევა ამოვხსნათ ამოცანა შერჩევის გარეშე (მაგალითად, ნ. პავლოვსკის მეთოდი); მეორე ჯგუფი ეყრდნობა ჰიდრომეტრიულ დაკვირვებათა მონაცემებს და გვერდს უვლის ხარჯის მახასიათებლისა და შეზის კოეფიციენტის მნიშვნელობათა გამოთვლას (მაგალითად, ა. რახმანოვის მეთოდი) და ა.შ.

თავი X. ჰიდრავლიკური ნახტომი

§ 10.1. ზოგადი ცნობები. ჰიდრავლიკური ნახტომის კლასიფიკაცია

არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლების გამოკვლევის საფუძველზე ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის წირების ანალიზისას ვნახეთ, რომ, როდესაც კინეტიკურობის პარამეტრი $\Pi_k = 1$-ს ანუ $h = h_{კრ}$-ს, $h = f(\ell)$ ფუნქცია განიცდის წყვეტას და $dh/d\ell = \infty$, ე.ი. **თავისუფალი ზედაპირის მხები აღნიშნულ წერტილში ნაკადის ღერძის პერპენდიკულარულია.**

დადგენილია, რომ თავისუფალი ზედაპირის ფორმის აღნიშნული მკვეთრი (ნახტომისებრი) ცვლილება შეიმჩნევა ყოველთვის, როცა ნაკადი მძაფრი მდგომარეობიდან, ამა თუ იმ მიზეზის გამო, გადადის წყნარ მდგომარეობაში. ასეთ ჰიდრავლიკურ მოვლენას **ჰიდრავლიკური ნახტომი** ეწოდება (ნახ. 10.1). მაშასადამე, ჰიდრავლიკური ნახტომის შემთხვევაში h' ნაკადის სიღრმე, რომელიც $h_{კრ}$ კრიტიკულ სიღრმეზე ნაკლებია, მკვეთრად იზრდება $h'' > h_{კრ}$ სიღრმემდე.



ნახ. 10.1

განვიხილოთ ნაკადის მოძრაობის ხასიათი ჰიდრავლიკური ნახტომის ფარგლებში. სპეციალური გამოკვლევები გვიჩვენებს, რომ ნახტომის სტრუქტურაში ნათლად გამოიკვეთება ორი ზონა: **სატრანზიტო ჭავლის ზონა** (გაყოფის *ABC* ზედაპირის ქვემოთ) და **ზედაპირული ზონა** (გაყოფის *ABC* ზედაპირის ზემოთ); ამ უკანასკნელს ზედაპირულ ვალცს (რგოლს) უწოდებენ.

ზედაპირული რგოლის სტრუქტურა ძალზე რთულია. ის გაჯერებულია ჰაერის ბუშტულებით, რის გამოც მასში ნაკადის უწყვეტობის პირობა დარღვეულია; თუმცა წყლის ნაწილაკების მოძრაობა ზედაპირულ რგოლში რამდენადმე ცირკულაციური ხასიათისაა და არ არის იზოლირებული სატრანზიტო ჭავლისაგან. ეს უკანასკნელი წარიტაცებს ნაწილაკებს ზედაპირული რგოლიდან, რომელთა შეცვლა ხდება სხვა ნაწილაკებით სატრანზიტო ჭავლიდან. საერთოდ, ზედაპირული ზონის სტრუქტურის შესწავლა გვაინტერესებს იმდენად, რამდენადაც მასთან დაკავშირებულია ნახტომში ენერგიის დანაკარგის საკითხი.

ნახტომის მთელი მოვლენა რთული დინამიკური პროცესია. ნახტომი განუწყვეტლივ იცვლის ფორმას, ზომებს, ადგილმდებარეობას; ასრულებს შედარებით მცირე სიდიდის გადატანით მოძრაობას წინ და უკან. ამგვარად, როდესაც ვლაპარაკობთ ჰიდრავლიკური ნახტომის მუდმივ (უცვლელ) სტრუქტურულ აღნაგობასა და თვისებებზე, ვგულისხმობთ რაღაც საშუალო მნიშვნელობას დროის გარკვეულ შუალედში.

ზედაპირული რგოლის ჰორიზონტალური გეგმილის სიგრძეს ($\ell_{ნახ}$) **ნახტომის სიგრძე** ეწოდება (ნახ. 10.1). ნახტომის შემომფარგვლელ 1-1 და 2-2 კვეთებში ნაკადის სიღრმის h' და h'' მნიშვნელობები ცნობილია **შეუღლებული სიღრმეების** სახელწო-

დებით. ამასთან h'-ს **პირველ შეუღლებულ სიღრმეს** უწოდებენ, ხოლო h''-ს – **მეორე შეუღლებულ სიღრმეს.** შეუღლებულ სიღრმეთა $a_{\text{ნახ}} = h'' - h'$ სხვაობა ახასიათებს **ნახტომის სიმაღლეს**.

ჰიდრავლიკურ ნახტომს მნიშვნელოვანი ცვლილებები შეაქვს ნაკადის კინემატიკურ სტრუქტურაში, იწვევს ადგილობრივ სიჩქარეთა პულსაციის მკვეთრ ზრდას, რის გამოც ნახტომის შემდეგ ნაკადი ხასიათდება ინტენსიური ტურბულენტურობით.

ნახტომის მომდევნო უბანს უწოდებენ ნაკადის უბანს 2-2 და 3-3 კვეთებს შორის, რომლის ფარგლებში ხდება პულსაციის მილევა (შემცირება) თანაბარი მოძრაობისათვის დამახასიათებელ სიდიდემდე, აგრეთვე სიჩქარეთა ეპიურის ცვლილება (გათანაბრება) ისეთი ფორმის ეპიურამდე, რომელიც ასევე პასუხობს თანაბარ მოძრაობას.

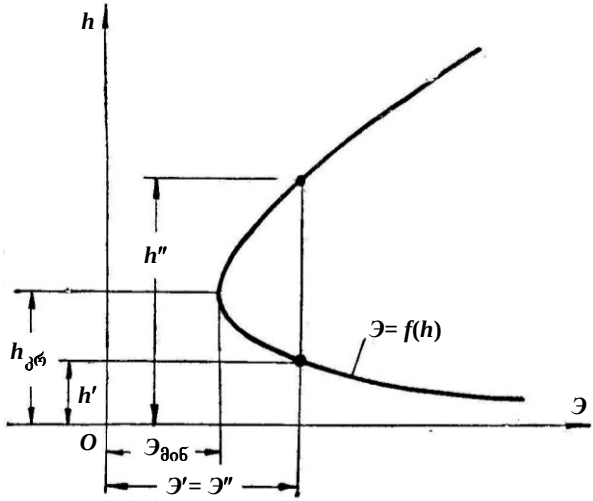
2-2 კვეთში გასაშუალებულ ადგილობრივ სიჩქარეთა ეპიურას აქვს 10.1 ნახაზზე ნაჩვენები სახე: ცოცხალი კვეთის c წერტილში სიჩქარე ნულის ტოლია, ხოლო ფსკერული სიჩქარეები – საკმაოდ დიდი. ამიტომ, ნაკადის წამრეცხი უნარიც 2-2 კვეთში შედარებით დიდია. შემდეგ, იმის გამო, რომ ნახტომის მომდევნო უბნის გასწვრივ სიჩქარეთა განაწილების ეპიურის ფორმა თანდათან ემსგავსება თანაბარი მოძრაობის შესატყვისი ეპიურის ფორმას, ნაკადის წამრეცხი უნარიც ასევე თანდათანობით მცირდება და 3-3 კვეთში აღწევს იმ მნიშვნელობას, რომელიც მოძრაობის თანაბარი რეჟიმისთვისაა დამახასიათებელი.

ბევრი ჰიდროტექნიკური ნაგებობის დაპროექტებისას ნაკადის მძაფრიდან წყნარ მდგომარეობაში გადასვლის ზონაში, კალაპოტის წარეცხვის საწინააღმდეგო ღონისძიებათა განხორციელების მიზნით, საჭიროა, ვიცოდეთ, როგორც ნახტომის სიგრძე ($\ell_{\text{ნახ}}$), ისე ნახტომის მომდევნო უბნის სიგრძეც ($\ell_{\text{ნახმ}}$).

ახლა გავარკვიოთ, რატომ ხდება ნაკადის მძაფრი მდგომარეობიდან წყნარ მდგომარეობაში გადასვლა ჰიდრავლიკური ნახტომის ფორმით? შესაძლებელია, თუ არა მძაფრი და წყნარი ნაკადების უნახტომო შეუღლება მდოვრე წირის სახით? შევეცადოთ ამ კითხვებზე ვუპასუხოთ მოვლენის ახსნის ენერგეტიკული თვალსაზრისის პოზიციიდან.

ამისათვის განვიხილოთ ნაკადის მოძრაობა ნულოვანი ქანობის კალაპოტში და დავუშვათ, რომ ჰიდრავლიკურ ნახტომში **ენერგია არ იკარგება.** ცხადია, რომ ნულოვანი ქანობის შემთხვევაში ნაკადის (E) და კვეთის კუთრი ენერგიები (Э) ერთმანეთის ტოლი იქნება ($E = \text{Э}$), თუ საფარდ სიბრტყეს კალაპო-

ტის ჰორიზონტალურ ფსკერს შევუთავსებთ, მაშინ კუთრი ენერგია (ნაკადისაც და კვეთისაც, რადგანაც $E = Э$) ნახტომის წინ და შემდეგ ერთი და იგივე იქნება (დავუშვით, რომ ნახტომში ენერგია არ იკარგება). კვეთის კუთრი ენერგიის გრაფიკიდან (ნახ. 10.2) ჩანს, რომ $h' < h_{კრ}$ სიღრმიდან $h'' > h_{კრ}$ სიღრმეზე გადასვლა უნდა მოხდეს $h_{კრ}$ სიღრმის გავლით. ამასთან, კუთრი ენერგია ჯერ უნდა შემცირდეს h' სიღრმის შესაბამის $Э'$ მნიშვნელობიდან $h_{კრ}$ სიღრმის შესაბამის $Э_{მინ}$ მინიმალურ მნიშვნელობამდე, შემდეგ კვლავ გაიზარდოს $Э_{მინ}$-დან h'' სიღრმის შესაბამის $Э'' = Э'$ მნიშვნელობამდე ($Э'' = Э' > Э_{მინ}$). კუთრი ენერგიის ასეთი ცვლილება ნაკადში ფიზიკურად შეუძლებელია. შეიძლება წარმოვიდგინოთ მოძრაობა $Э_{მინ}$ ენერგიით (მაგალითად, ვარდნილის წინ), მაგრამ ყოვლად შეუძლებელია ნაკადის მოძრაობა კუთრი ენერგიის მინიმუმით ნულოვანი ან არაკრიტიკული ქანობის მქონე კალაპოტში და, მით უმეტეს, მოძრაობა კუთრი ენერგიის მატებით.



ნახ. 10.2

ამგვარად, მძაფრი და წყნარი ნაკადების თავისუფალი ზედაპირების შეუღლება მდოვრე, წირის სახით, ფიზიკურად შეუძლებელია. ნაკადის მძაფრიდან წყნარ მდგომარეობაში გადასვლის საზღვარზე მოძრაობის ერთადერთი შესაძლო ფორმა ჰიდრავლიკური ნახტომია.

მსჯელობის სიმარტივისათვის დავუშვით, რომ ჰიდრავლიკურ ნახტომში ენერგია არ იკარგება. სინამდვილეში, როგორც ყველა სხვა სახის მოძრაობისას, აქაც კუთრი ენერგიის დაკარგვა გარდაუვალია. ამასთან, ნახტომის წინ ნაკადს უნდა ჰქონდეს მინიმალური კუთრი ენერგიისა და ნახტომში ენერგიის დანაკარგის ჯამის სიდიდეზე რამდენადმე მეტი ენერგია.

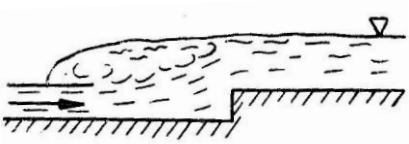
ჰიდროტექნიკურ პრაქტიკაში ჰიდრავლიკური ნახტომი ძალზე გავრცელებული მოვლენაა. მაგალითად, კაშხალზე წყლის გადადინება, ფარქვეშ გამოდინება, კრიტიკულზე მეტი და ნაკლები ქანობების კალაპოტის უბნების შეუღლება და სხვა, უმეტეს შემთხვევაში, ჰიდრავლიკური ნახტომის წარმოქმნასთან არის დაკავშირებული.

მძაფრ ნაკადს აქვს დიდი კინეტიკური ენერგია, რაც იწვევს კალაპოტის წარეცხვას. ამიტომ, კალაპოტის ის უბნები, რომლებზეც მძაფრი ნაკადი გაედინება, ხშირად სპეციალურ გამაგრებას მოითხოვს. პირიქით, წყნარი ნაკადი, რომელიც მცირე სიჩქარეებით და, მაშასადამე, მცირე კინეტიკური ენერგიით ხასიათდება, უმეტეს შემთხვევაში, არ იწვევს კალაპოტის ეროზიას. ამიტომ, ჰიდროტექნიკურ პრაქტიკაში ყოველთვის ცდილობენ, რომ ნაკადი წყნარ მდგომარეობაში იმყოფებოდეს. ის, რომ ნაკადის მძაფრიდან წყნარ მდგომარეობაში გადასვლა ნახტომის სახით შედარებით მოკლე უბანზე ხდება, საშუალებას იძლევა შევამციროთ კალაპოტის იმ მონაკვეთის სიგრძე, რომელიც სპეციალურ გამაგრებას მოითხოვს.

იმის მიხედვით, თუ რა პირობებში ხდება ჰიდრავლიკური ნახტომის წარმოქმნა, შეიძლება განვასხვაოთ:

1) **სრულყოფილი ნახტომი** (ნახ. 10.6). იგი წარმოიქმნება ერთნაირი განივკვეთებისა და მუდმივი ქანობის მქონე კალაპოტებში ჩვეულებრივი ხორკლიანობისას. ასეთი ნახტომის ჰიდრავლიკურ სტრუქტურაში მკვეთრად არის გამოყოფილი ზედაპირული და სატრანზიტო ჭავლის ზონები. სრულყოფილი ნახტომის შემთხვევაში ნახტომის ტალღის სიმაღლე $a > h'$ ანუ $h'' \geq 2h'$.

2) **ტალღოვანი ნახტომი (ნახტომი-ტალღა).** ასეთი ნახტომის ტალღის სიმაღლე შედარებით მცირეა $a < h'$; მასში არ არის ზედაპირული ზონა. ტალღოვანი ნახტომი ღებულობს თანდათანობით მილევადი ტალღების ფორმას (ნახ. 10.8).

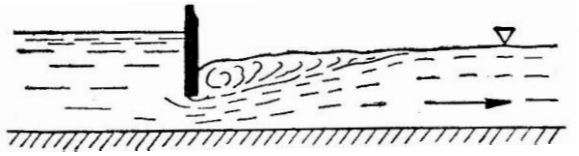


ნახ. 10.3

3) **შეტბორილი ნახტომი** (ნახ. 10.3). იგი ხასიათდება მკვეთრად

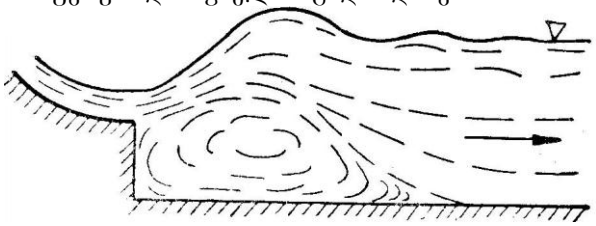
გამოყოფილი ზედაპირული ზონით. ასეთი ნახტომი შეიმჩნევა წყალსაცემ ჭაში და წყალსაცემი კედლის წინ.

4) **დაძირული (დატბორილი) ნახტომი.** ასეთი ნახტომიც მკვეთრად გამოყოფილი ზედაპირული ზონით ხასიათდება, რომელიც ვერტიკალურ წინაღობას ებჯინება. ასეთი ნახტომი შეიმჩნევა ფარქვეშ გამოდინებისას **წამოწეული ნახტომის** ფორმით (ნახ. 10.4).



ნახ. 10.4

5) **ზედაპირული ნახტომი** (ნახ. 10.5). ასეთი ნახტომი ხასიათდება განვითარებული ფსკერული რგოლით. იგი წარმოიქმნება კაშხლის საფეხურიდან ჭავლის გადმოდინებისას.



ნახ. 10.5

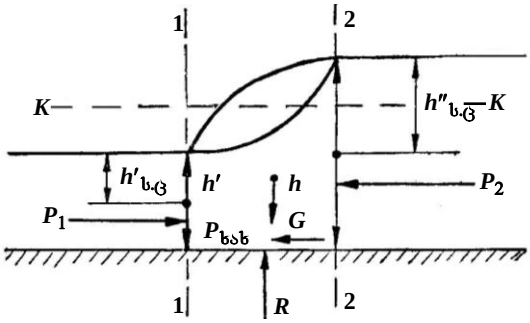
§ 10.2. ჰიდრავლიკური ნახტომის ძირითადი განტოლება

განვიხილოთ სრულყოფილი ჰიდრავლიკური ნახტომი ნულოვანი ან ძალზე მცირე ქანობის[2] პრიზმულ კალაპოტში (ნახ. 10.6). დავუშვათ, რომ 1-1 და 2-2 კვეთებში ნაკადის მოძრაობა მდოვრედ ცვალებადია.

ჩვენი მიზანია ვიპოვოთ ანალიზური დამოკიდებულება h' და h'' შეუღლებულ სიღრმეებს შორის. ამ ამოცანის გადასაწყვეტად

[2] ჰიდრავლიკური ნახტომის შედარებით მცირე სიგრძის გამო, ფსკერის ვარდნა ამ უბანზე (i-ს მცირე მნიშვნელობებისთვის) შეიძლება უგულებელვყოთ.

ვისარგებლოთ თეორემით მოძრაობის რაოდენობის შესახებ (§§5.16; 6.10).



ნახ. 10.6

ნაკადის ცოცხალ კვეთში დროის ერთეულში გამავალი სითხის მოძრაობის რაოდენობა, (5.55) და (5.58) ფორმულების თანახმად, ტოლია:

$$(მ.რ)_a = \rho\int_{\omega} u^2 d\omega = \alpha'(მ.რ)_v = \alpha'\rho\omega v^2 .$$

1-1 და 2-2 კვეთებით შემოსაზღვრული ნაკვეთურის მოძრაობის რაოდენობის ნამატი დროის ერთეულში იქნება:

$$\alpha'_2\rho\omega_2 v_2^2 - \alpha'_1\rho\omega_1 v_1^2 = \alpha'_2\rho Q v_2 - \alpha'_1\rho Q v_1 \approx \alpha'\rho Q(v_2 - v_1),$$

სადაც ω_1, ω_2 და v_1, v_2 არის ცოცხალი კვეთის ფართობები და საშუალო სიჩქარეები აღნიშნულ კვეთებში; $\alpha'_1 \approx \alpha'_2 = \alpha'$ – ბუსინესკის კოეფიციენტი[1].

გარე ძალებს, რომლებიც მოძრაობის რაოდენობის ცვლილებას იწვევს, მიეკუთვნება: 1-1 და 2-2 კვეთებში მოქმედი ჰიდროდინამიკური წნევის P_1 და P_2 ძალები; ნაკვეთურის G წონა; ნაკვეთურის შემომფარგვლელ ზედაპირზე მოქმედი $P_{ხახ}$ ძალა; ფსკერის R რეაქციის ძალა.

ჰორიზონტალურ კალაპოტში G-სა და R-ის გეგმილები ნაკადის მოძრაობის მიმართულებაზე ნულის ტოლია, ხოლო $P_{ხახ}$ ძალა – შეიძლება უგულებელვყოთ მათი სიმცირის გამო, რადგანაც ნახტომის უბნის სიგრძე დიდი არ არის. მაშინ მოძრაობის რაოდენობის თეორემის საფუძველზე შეგვიძლია დავწეროთ:

[1] ჰიდრავლიკური ნახტომის გაანგარიშებისას α' კოეფიციენტს მიახლოებით ვღებულობთ ერთის ტოლად.

$$\alpha'\rho Q(v_2 - v_1) = P_1 - P_2 . \qquad (10.1)$$

მაგრამ, ჩვენი დაშვების თანახმად, მოძრაობა 1-1 და 2-2 კვეთებში მდოვრედ ცვალებადია, ამიტომ წნევების განაწილება ამ კვეთებში შეიძლება მივიღოთ ჰიდროსტატიკის კანონით, ე.ი.

$$P_1 = \gamma h'_{სც}\omega_1 \quad \text{და} \quad P_2 = \gamma h''_{სც}\omega_2 ,$$

სადაც $h'_{სც}$ და $h''_{სც}$ არის ნაკვეთურის შემომფარგვლელი ცოცხალი კვეთების სიმძიმის ცენტრების დაცილება სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან.

მაშინ, იმის გათვალისწინებით, რომ $\gamma = \rho g$, (10.1) განტოლება ასეთ სახეს მიიღებს:

$$\frac{\alpha' Q^2}{g\omega_1} + \omega_1 h'_{სც} = \frac{\alpha' Q^2}{g\omega_2} + \omega_2 h''_{სც} . \qquad (10.2)$$

ამ განტოლებას **ჰიდრავლიკური ნახტომის ძირითად განტოლებას** უწოდებენ.

§ 10.3. ნახტომის ფუნქცია. შეუღლებული სიღრმეების განსაზღვრა

(10.2) განტოლების მარცხენა ნაწილი მოცემული ხარჯისა და კალაპოტის მოცემული ფორმისათვის h' სიღრმის ფუნქციაა, ხოლო მარჯვენა ნაწილი – h''-ის. ასეთი ტიპის განტოლებებს მათემატიკაში სიმეტრიულ განტოლებებს უწოდებენ, ხოლო h' და h'' სიღრმეებს, რომლებიც ამ განტოლების ფესვებია, შეუღლებულს.

აღვნიშნოთ

$$\frac{\alpha' Q^2}{g\omega} + \omega h'_{სც} = \Pi(h) . \qquad (10.3)$$

$\Pi(h)$ ფუნქციას **ნახტომის ფუნქციას** უწოდებენ. ნახტომის ძირითადი განტოლება შეიძლება ასეთი სახით ჩავწეროთ:

$$\Pi(h') = \Pi(h'') , \qquad (10.4)$$

სადაც $\Pi(h')$ და $\Pi(h'')$ არის h' და h'' სიღრმეების შესაბამისი ნახტომის ფუნქციების მნიშვნელობები.

მაშასადამე, როგორც (10.4) ტოლობიდან ჩანს, შეუღლებული სიღრმეების შესაბამისი ნახტომის ფუნქციების მნიშვნელობები ტოლია.

ნახტომის ფუნქციის ამ თვისებით ვსარგებლობთ ერთ-ერთი შეუღლებული სიღრმის განსაზღვრისას, როდესაც ცნობილია

მეორე. ვთქვათ, მოცემული გვაქვს h' პირველი შეუღლებული სიღრმე და უნდა განვსაზღვროთ h'' სიღრმე. ამისათვის გამოვითვლით $\Pi(h')$ ფუნქციის მნიშვნელობას და გავუტოლებთ $\Pi(h'')$-ს, ე.ი.

$$\frac{\alpha' Q^2}{g\omega_2} + \omega_2 h''_{\text{სც}} = \Pi(h') .$$

ამ განტოლებიდან, რომელშიც $\Pi(h')$ უკვე ცნობილია, ვიპოვით h'' მეორე შეუღლებულ სიღრმეს. მისი ამოხსნა შედარებით მარტივია გრაფიკული ხერხით. გრაფიკის ასაგებად გამოვიკვლიოთ (10.3) განტოლებით მოცემული ნახტომის ფუნქცია. როგორც ამ განტოლებიდან ჩანს, $h \to 0$ ან $h \to \infty$, მაშინ ორივე შემთხვევაში $\Pi(h) \to \infty$. როგორც ცნობილია, ასეთ შემთხვევაში ფუნქცია ღებულობს მინიმალურ მნიშვნელობას არგუმენტის რაიმე მნიშვნელობისათვის. ამ უკანასკნელის მოსაძებნად ვიპოვოთ ნახტომის ფუნქციის წარმოებული და გავუტოლოთ ნულს:

$$\frac{d[\Pi(h)]}{dh} = -\frac{\alpha' Q^2}{g\omega^2}\frac{d\omega}{dh} + \frac{d}{dh}(h_{\text{სც}}\omega) = 0 .$$

მიღებული გამოსახულების გარდაქმნით (რომელიც აქ არ მოგვყავს) გვექნება:

$$1 - \frac{\alpha' Q^2}{g}\frac{B}{\omega^3} = 0 \qquad (10.5)$$

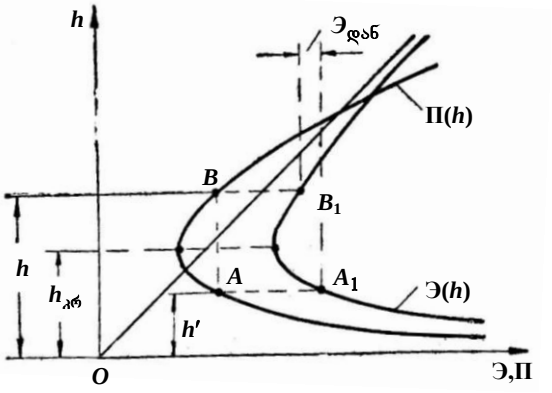
ანუ

$$\frac{\alpha' Q^2}{g}\frac{\omega^3}{B} . \qquad (10.6)$$

თუ დავუშვებთ, რომ $\alpha' = \alpha$ (რიცხობრივად ისინი ახლოს არიან ერთმანეთთან), მაშინ შევნიშნავთ, რომ (10.6) განტოლება ნაკადის კრიტიკულობის (9.27) პირობის იგივურია. მაშასადამე, $\Pi(h)$ ნახტომის ფუნქციას მინიმუმი აქვს იმ სიღრმეზე, რომელიც კვეთის კუთრი ენერგიის $\Theta(h)$ ფუნქციის მინიმუმს შეესაბამება, ე.ი. კრიტიკულ სიღრმეზე (ნახ. 10.7).

10.7 ნახაზზე მოცემულია $\Pi(h)$ ნახტომის ფუნქციის გრაფიკი. ორდინატთა ღერძის პარალელური ნებისმიერი ვერტიკალური წრფე ფუნქციის მრუდს ორ წერტილში კვეთს. გამონაკლისს წარმოადგენს მრუდის მხები კრიტიკული სიღრმის შესაბამის წერტილში. ეს ნიშნავს, რომ მძაფრი ნაკადის ყოველ h' სიღრმეს, რომელიც $h_{\text{კრ}}$ სიღრმეზე ნაკლებია, შეესაბამება წყნარი ნაკადის

მხოლოდ ერთი h'' სიღრმე, რომელიც $h_{კრ}$ სიღრმეზე მეტია და პირიქით. ამასთან, რაც ნაკლებია h' პირველი შეუღლებული სიღრმე, მით მეტია h'' მეორე შეუღლებული სიღრმე. მაშასადამე, მოცემული ხარჯისათვის მოცემულ კალაპოტში ჰიდრავლიკური ნახტომი წარმოიქმნება იქ, სადაც მძაფრი და წყნარი ნაკადების სიღრმეები ურთიერთშეუღლებულია.



ნახ. 10.7

სწორკუთხა პრიზმული კალაპოტისათვის ნახტომის ძირითადი განტოლება საგრძნობლად მარტივდება.

მართლაც, სწორკუთხა კვეთისათვის

$$h'_{სც} = \frac{h}{2}; \quad \omega = bh; \quad h_{კრ} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}; \quad Q = qb. \qquad (10.7)$$

თუ $h'_{სც}$ და ω-ს მნიშვნელობებს შევიტანთ (10.2) განტოლებაში და $\frac{\alpha' Q^2}{gb^2}$ სიდიდეს გამოვსახავთ $h^3_{კრ}$-ით, გვექნება:

$$\frac{(h')^2}{2} + \frac{h^3_{კრ}}{h'} = \frac{(h'')^2}{2} + \frac{h^3_{კრ}}{h''}$$

ანუ

$$(h')^2 - (h'')^2 = 2h^3_{კრ}\frac{h'-h''}{h'h''}.$$

რადგანაც $h' \neq h''$, ამიტომ ბოლო გამოსახულების $(h'-h'')$ სიდიდეზე შეკვეცით და მარტივი გარდაქმნებით მივიღებთ:

$$(h'')^2 + h''h' = \frac{h^3_{კრ}}{h'} = 0.$$

ამ კვადრატული განტოლების ამოხსნით ვიპოვით შემდეგ ორ განტოლებას:

$$h' = \frac{h''}{2}\left[\sqrt{1+8\left(\frac{h_{კრ}}{h''}\right)}-1\right]; \qquad (10.8)$$

$$h'' = \frac{h'}{2}\left[\sqrt{1+8\left(\frac{h_{კრ}}{h'}\right)}-1\right]. \qquad (10.9)$$

მიღებული განტოლებები საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ h', თუ ცნობილია h'' და პირიქით.

(10.8) და (10.9) განტოლებები შეიძლება გამოვსახოთ კინეტიკურობის პარამეტრის (Π_k) ან ფრუდის რიცხვის (Fr) საშუალებით. (10.7) ფორმულების თანახმად და იმის გათვალისწინებით, რომ $Q = \omega v = nhv$, ვპოულობთ

$$\left(\frac{h_{კრ}}{h'}\right)^3 = \frac{\alpha Q^2}{gb^2h'^2}\cdot\frac{1}{h'} = \frac{\alpha v_1^2}{gh'} = \Pi_{k1} = Fr_1, \qquad (10.10)$$

$$\left(\frac{h_{კრ}}{h''}\right)^3 = \frac{\alpha Q^2}{gb^2h''^2}\cdot\frac{1}{h''} = \frac{\alpha v_2^2}{gh''} = \Pi_{k2} = Fr_2. \qquad (10.11)$$

მაშინ (10.8) და (10.9) ფორმულები ასეთ სახეს მიიღებს:

$$h' = \frac{h''}{2}\left(\sqrt{1+8\Pi_{k2}}-1\right) = \frac{h''}{2}\left(\sqrt{1+8\Pi r_{k2}}-1\right); \qquad (10.12)$$

$$h'' = \frac{h'}{2}\left(\sqrt{1+8\Pi_{k1}}-1\right) = \frac{h'}{2}\left(\sqrt{1+8\Pi r_{k1}}-1\right), \qquad (10.13)$$

სადაც Π_{k1} და Π_{k2} არის კინეტიკურობის პარამეტრის, ხოლო Fr_1 და Fr_2 – ფრუდის რიცხვის მნიშვნელობები შესაბამისად 1-1 და 2-2 კვეთებში (ნახტომის წინ და შემდეგ).

(10.12) და (10.13) განტოლებებიდან ჩანს, რომ, როცა $\Pi_{k1} \geq 3$ ან $\Pi_{k2} \leq 0{,}375$, მაშინ $h' \geq 2h'$, ე.ი. ვღებულობთ სრულყოფილი ჰიდრავლიკური ნახტომის პირობას.

ხშირად (10.8) და (10.9) ფორმულებს ასეთი სახითაც წერენ:

$$h' = \frac{h''}{2}\left[\sqrt{1+8\frac{\alpha' q^2}{g(h'')^3}}-1\right]; \qquad (10.14)$$

$$h'' = \frac{h'}{2}\left[\sqrt{1+8\frac{\alpha' q^2}{g(h')^3}}-1\right]. \qquad (10.15)$$

§ 10.4. ჰიდრავლიკური ნახტომისა და ნახტომის მომდევნო უბნის სიგრძე. ენერგიის დანაკარგი ნახტომში

შიგა ტურბულენტური პროცესების სირთულე და ადგილობრივ სიჩქარეთა პულსაციის ინტენსიურობა საშუალებას არ იძლევა დავსახოთ მოვლენის რაციონალური ფიზიკური სქემა, რომელიც საფუძვლად დაედება ჰიდრავლიკური ნახტომის სიგრძისა ($\ell_{\text{ნახ}}$) და ნახტომის მომდევნო უბნის სიგრძის ($\ell_{\text{ნახმ}}$) განსაზღვრის თუნდაც მიახლოებით თეორიულ ანალიზს. ამიტომ, ამ საკითხის შესწავლა ყოველთვის ატარებდა სუფთა ექსპერიმენტულ ხასიათს. ქვემოთ მოგვყავს ის ემპირიული ფორმულები, რომლებითაც შედარებით ხშირად სარგებლობენ საინჟინრო პრაქტიკაში.

ნახტომის სიგრძის გამოსათვლელი ფორმულები:

1. ნ. პავლოვსკის ფორმულა

$$\ell_{\text{ნახ}} = 2{,}5(1{,}9h'' - h'); \tag{10.16}$$

2. მ. ჩერტოუსოვის ფორმულა

$$\ell_{\text{ნახ}} = 10{,}3h'\left[\sqrt{\left(\frac{h_{\text{კრ}}}{h'}\right)^3} - 1\right]^{0{,}81}; \tag{10.17}$$

3. ვ. შაუმიანის ფორმულა

$$\ell_{\text{ნახ}} = 3{,}6h''\left(1 - \frac{h'}{h''}\right)\left(1 + \frac{h'}{h''}\right)^2. \tag{10.18}$$

ნახტომის მომდევნო უბნის სიგრძის გამოთვლა:

1. მ. ჩერტოუსოვის ფორმულა

$$\ell_{\text{ნახ}} = (2{,}5\cdots 3)\ell_{\text{ნახ}}; \tag{10.19}$$

2. მ. ვიზგოს ფორმულა

$$\ell_{\text{ნახ}} = \frac{0{,}4}{n}h'', \tag{10.20}$$

სადაც n არის ხორკლიანობის კოეფიციენტი.

ჰიდრავლიკურ ნახტომში, მოძრაობის რეჟიმის მკვეთრი ცვლილების გამო, ხდება ენერგიის (დაწნევის) დიდი რაოდენობით კარგვა. ა. ახუტინის მონაცემებით, ენერგიის დანაკარგმა ჰიდრავლიკურ ნახტომში შეიძლება მიაღწიოს იმ ენერგიის 64–67%-ს, რომელიც ნაკადს ჰქონდა ნახტომის წინ.

დაწნევის დანაკარგი ჰიდრავლიკურ ნახტომში სწორკუთხა კვეთის ჰორიზონტალური კალაპოტისათვის შეიძლება გამოვთვალოთ ფორმულით:

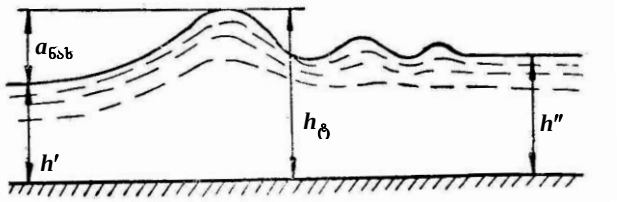
$$h_{\text{დან}} = \frac{(h'' - h')^3}{4h'h''} = \text{Э}_{\text{დან}} . \qquad (10.21)$$

10.7 ნახაზზე $\Pi(h)$ ნახტომის ფუნქციის გრაფიკთან ერთად დატანილია Э კვეთის კუთრის ენერგიის გრაფიკი (იგივე E ნაკადის კუთრი ენერგიის გრაფიკი, რადგანაც, როცა $i = 0$-ს, $E = \text{Э}$-ს). ამ გრაფიკის საშუალებით მოცემული h' და h'' შეუღლებული სიღრმეების მიხედვით შეიძლება განისაზღვროს $\text{Э}_{\text{დან}}$ კუთრი ენერგიის მნიშვნელობა.

ჩვენ მიერ მიღებული დამოკიდებულებები მართებულია ჰორიზონტალური ან მცირე ქანობის პრიზმული (უმეტეს შემთხვევაში სწორკუთხა) კალაპოტებისათვის. **დიდი ქანობის კალაპოტისათვის** ნახტომის განტოლების მიღება თეორიული გზით ვერ ხერხდება, რადგან მოძრაობის რაოდენობის ცვლილების განტოლებაში უნდა შევიყვანოთ სიმძიმის ძალის გეგმილი, რომლის სიდიდე ცნობილი არ არის. ამიტომ, განსახილველ შემთხვევაში ჰიდრავლიკური ნახტომის ელემენტების გამოსათვლელად სარგებლობენ მიახლოებითი ემპირიული ფორმულებით.

§ 10.5. ტალღოვანი ნახტომი (ნახტომი-ტალღა)

სწორკუთხა კვეთის კაპალოტებში, როცა $\Pi_{k1} < 3$ (ან $\Pi_{k2} > 0{,}375$), რაც შეესაბამება შეუღლებული სიღრმეების ფარდობას $h''/h' < 2$, ჰიდრავლიკური ნახტომი ღებულობს თანდათანობით მილევადი ტალღების ფორმას (ნახ. 10.8). ასეთ ნახტომს **ტალღოვან ნახტომს** უწოდებენ. მასში არ არის გამოკვეთილი ზედაპირული ზონა.



ნახ. 10.8

პირველი ტალღის სიმაღლე შეიძლება განისაზღვროს მ. კრასნიტსკის ფორმულით

$$a = 0{,}72h'(\Pi_{k1} - 1), \tag{10.22}$$

ხოლო შეუღლებული სიღრმეების თანაფარდობა, როცა $\Pi_{k1} = 1{,}5 \div 3{,}0$, ა. მოძალევსკის ფორმულით

$$\frac{h''}{h'} = 1{,}15\sqrt{\Pi_{k1}} - 0{,}15. \tag{10.23}$$

როცა $\Pi_{k1} \le 1{,}5$, სარგებლობენ ფორმულებით:

$$h'' = h'\Pi_{k1}; \tag{10.24}$$

$$h' = h''\sqrt{\Pi_{k2}}. \tag{10.25}$$

მხედველობაში უნდა მივიღოთ, რომ ტალღები არღვევს წნევის ჰიდროსტატიკური განაწილების კანონს. ამიტომ, h' მეორე შეუღლებულ სიღრმეს ღებულობენ იმ კვეთში, სადაც ტალღური მოძრაობა პრაქტიკულად აღარ შეიმჩნევა.

ტალღოვანი ნახტომის სიგრძე (შეუღლებული სიღრმეების შესაბამის კვეთებს შორის) საკმაოდ დიდია და რამდენიმე ასეულ h'-ს აღწევს. თუ ნახტომის სიგრძედ ($\ell_{\text{ნახ}}$) მივიჩნევთ კალაპოტის იმ უბნის სიგრძეს, რომელზედაც ხდება წარეცხვა, მაშინ $\ell_{\text{ნახ}}$ მნიშვნელოვნად მცირეა და შეიძლება განვსაზღვროთ გ.დმიტრიევის ფორმულით

$$\ell_{\text{ნახ}} = 10{,}6h'(\Pi_{k1} - 1). \tag{10.26}$$

თავი XI. სითხის გამოდინება ნახვრეტებისას და ნაცმებიდან

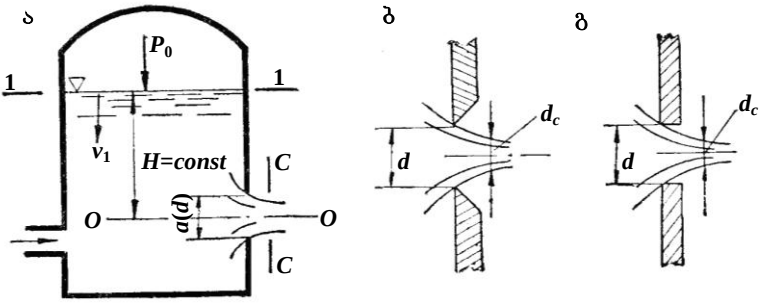
§ 11.1. სითხის გამოდინება თხელკედლიანი მცირე ნახვრეტიდან მუდმივი დაწნევისას

1. **ზოგადი ცნობები**. სითხის გამოდინება ნახვრეტებისა და ნაცმებიდან მიეკუთვნება მოძრაობის იმ კატეგორიას, რომლის ფორმირებაშიც არსებით როლს ადგილობრივი ჰიდრავლიკური წინაღობები ასრულებს. ასეთი მოძრაობისას ბერნულის განტოლების ბოლო წევრი ($h_{\text{დან}}$) გამოსახავს კუთრი ენერგიის (დაწნევის) იმ მნიშვნელობას, რომელიც იკარგება ადგილობრივ წინაღობათა დასაძლევად.

განასხვავებენ **მცირე და დიდ ნახვრეტებს.** ჩვეულებრივ, ნახვრეტებს, რომელთა სიმაღლე 0,1H-ს არ აღემატება, უწოდებენ **მცირეს**. აქ H არის დაწნევა ხვრეტის ცენტრში (ნახ. 11.1, ა). მაგალითად, d დიამეტრის წრიული ნახვრეტი და a სიმაღლის

სწორკუთხა ნახვრეტი იქნება მცირე, თუ $d < 0{,}1H$ და $a < 0{,}1H$. ასეთ შემთხვევაში H გეომეტრიული დაწნევა ნახვრეტის ყველა წერტილისათვის შეიძლება მუდმივად ჩავთვალოთ. რაც ნიშნავს, რომ ნახვრეტის კვეთში ჭავლის ნაწილაკების სიჩქარე ერთმანეთისაგან პრაქტიკულად არ განსხვავდება და კინეტიკური ენერგიის კოეფიციენტი $\alpha \approx 1$-ს.

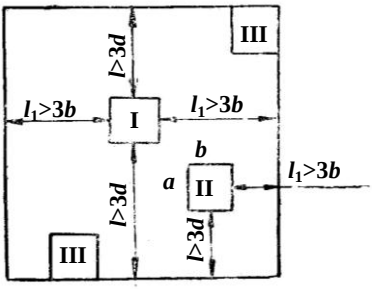
ნახვრეტს უწოდებენ **თხელკედლიანს** თუ კედლის სისქე გავლენას არ ახდენს გამოდინების პირობებზე. ამ დროს ნახვრეტი ნაწიბურიანია (ნახ. 11.1, ბ) ან კედლის სისქე $\delta \le 0{,}5d$ (ნახ. 11.1, გ).



ნახ. 11.1

სითხის გამოდინება ნახვრეტებსა და ნაცმებიდან შეიძლება იყოს **თავისუფალი** (ე.ი. **დაუტბორავი** გამოდინება ატმოსფეროში) და **არათავისუფალი** (ე.ი. **დატბორილი** გამოდინება დონის ქვემოთ) როგორც **მუდმივი**, ისე **ცვლადი** დაწნევისას.

სითხის ნახვრეტიდან გამოდინებისას განასხვავებენ ჭავლის სრულ და არასრულ კუმშვას. ჭავლი განიცდის **სრულ კუმშვს,** თუ იგი იკუმშება ნახვრეტის მთელ პერიმეტრზე (ნახ. 11.2, I, II). **არასრული კუმშვა** შეიმჩნევა მაშინ, როცა ნახვრეტის პერიმეტრის გარკვეულ ნაწილში ჭავლის კუმშვა არ ხდება (ნახ. 11.2, III) იმის გამო, რომ პერიმეტრის ეს ნაწილი ჭურჭლის გრძივი კედლის მომიჯნავეა.



ნახ. 11.2

ჭავლის **სრული კუმშვა სრულყოფილია,** თუ ჭურჭლის კედლები ჭავლის კუმშვის ხარისხზე გავლენას არ ახდენს (ნახ. 11.2, I). წინააღმდეგ შემთხვევაში კუმშვა არასრულყოფილია (ნახ. 11.2, II). ექსპერიმენტულმა

გამოკვლევებმა ცხადყო, რომ ჭავლის სრულყოფილი კუმშვა ხდება მაშინ, თუ დაცულია შემდეგი პირობა: სწორკუთხა ნახვრეტისათვის $\ell > 3a$ და $\ell_1 > 3b$; წრიული ნახვრეტისათვის $\ell > 3d$.

არასრულყოფილი კუმშვის შემთხვევაში $\ell < 3a$ და $\ell_1 < 3b$; $\ell < 3d$. ამ დროს ჭურჭლის ფსკერი და კედლები გავლენას ახდენს ჭავლის კუმშვაზე. არასრულყოფილი კუმშვისას დენის წირები ნაკლები სიმრუდისაა, რის გამოც ჭავლის კუმშვის ხარისხიც უფრო ნაკლებია, ვიდრე სრულყოფილი კუმშვისას.

ვინაიდან ჭერჭელში (რეზერვუარში) სითხის ნაწილაკები ნახვრეტისაკენ მოძრაობს მრუდწირულ ტრაექტორიაზე, ამიტომ დენის წირები თვით ნახვრეტის სიბრტყეში არ არის ურთიერთპარალელური; აქ მოძრაობა მკვეთრად ცვალებადია. ნახვრეტის კვეთიდან გარკვეულ მანძილზე (წრიული ნახვრეტებისათვის $0{,}5d$ მანძილზე, სადაც d არის ნახვრეტის დიამეტრი) დენის წირების სიმრუდე მცირდება და თითქმის ერთმანეთის პარალელური ხდება. ნახვრეტიდან უმცირესი მანძილით დაშორებულ ჭავლის C-C კვეთს, რომელშიც სითხის მოძრაობა უკვე განიხილება, როგორც პარალელურჭავლური, **შეკუმშული კვეთი** ეწოდება. ამ კვეთში მოძრაობა მდოვრედ ცვალებადია და მისთვის შეიძლება გამოვიყენოთ ბერნულის განტოლება. შეკუმშულ კვეთში ჭავლის დიამეტრი $d_c \approx 0{,}8d$.

ნახვრეტის ფართობი აღვნიშნოთ ω-თი, ხოლო ცოცხალი კვეთის ფართობი C-C კვეთში – ω_c-თი. ω_c-ს ფარდობა ω-სთან აღინიშნება ε-ით და მას **ჭავლის კუმშვის კოეფიციენტს** უწოდებენ, ე.ი.

$$\varepsilon = \omega_c / \omega , \tag{11.1}$$

აქედან

$$\omega_c = \varepsilon\omega . \tag{11.2}$$

ნახვრეტიდან სითხის გამოდინებისას ჭავლის განივკვეთის ფორმა გზადაგზა იცვლება და თვით ნახვრეტის ფორმისაგან განსხვავებული ხდება. ასე, მაგალითად, წრიული ნახვრეტიდან გამოდინებული ჭავლის განივკვეთს ნახვრეტიდან გარკვეულ მანძილზე აქვს ელიფსის ფორმა; კვადრატული ნახვრეტიდან გამოდინებისას – ჯვრისებრი, ხოლო სამკუთხა ნახვრეტიდან გამოდინებისას – სამქიმიანი ვარსკვლავის ფორმა და ა.შ.

ნახვრეტიდან სითხის გამოდინებისას ჭავლის განივკვეთის ფორმის სიგრძეზე ცვლილებას **ჭავლის ინვერსია** ეწოდება.

2. **სითხის თავისუფალი გამოდინება თხელკედლიანი მცირე ნახვრეტიდან** (ნახ. 11.1). ჩვენი მიზანია განვსაზღვროთ ნახვრეტიდან სითხის გამოდინების სიჩქარე და ხარჯი. ამისათვის შევადგინოთ ბერნულის განტოლება რეზერვუარში სითხის თავისუფალ ზედაპირთან შეთანხმებული 1-1 და შეკუმშული *C-C* კვეთებისათვის ნახვრეტის ცენტრზე გამავალი *O-O* საფარდი სიბრტყის მიმართ (გავიხსენოთ, რომ ნახვრეტის სიბრტყეში მოძრაობა მკვეთრად ცვალებადია და ამიტომ ნახვრეტის კვეთისთვის ბერნულის განტოლების გამოყენება არ შეიძლება):

$$H + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_c + \frac{p_c}{\gamma} + \frac{\alpha v_c^2}{2g} = h_{\text{დან}}\,, \tag{11.3}$$

სადაც p_0 არის წნევა რეზერვუარში სითხის თავისუფალ ზედაპირზე; $v_1 \approx 0$ – ჭურჭელში სითხის მოძრაობის სიჩქარე; z_c – $C-C$ კვეთის სიმძიმის ცენტრის დაცილება საფარდი სიბრტყიდან. *O-O* საფარდი სიბრტყისათვის $z_c = 0$-ს; p_c – წნევა *C-C* კვეთში, რომელიც ატმოსფერულის ტოლია, $p_c = p_{\text{ატ}}$; v_c – სითხის ჭავლის მოძრაობის საშუალო სიჩქარე *C-C* კვეთში; $h_{\text{დან}}$ –ნახვრეტში დაწნევის ადგილობრივი დანაკარგი, რომელიც გამოითვლება ფორმულით: $h_{\text{დან}} = h_{\text{ნახ}} = \xi_{\text{ნახ}} \frac{v_c^2}{2g}$ ($\xi_{\text{ნახ}}$ ნახვრეტში დაწნევის ადგილობრივი დანაკარგის კოეფიციენტია).

აღნიშნულის გათვალისწინებით, (11.3) განტოლება ასეთ სახეს მიიღებს:

$$H + \frac{p_0}{\gamma} = \frac{p_{\text{ატ}}}{\gamma} + \frac{\alpha v_c^2}{2g} + \xi_{\text{ნახ}} \frac{v_c^2}{2g}\,. \tag{11.4}$$

აღვნიშნოთ

$$H + \left(\frac{p_0}{\gamma} - \frac{p_{\text{ატ}}}{\gamma} \right) = H_{\text{დაყ}}\,, \tag{11.5}$$

სადაც $H_{\text{დაყ}}$ არის ე.წ. **დაყვანილი დაწნევა**.

მაშინ (11.4)-ის ნაცვლად გვექნება:

$$H_{\text{დაყ}} = (\alpha + \xi_{\text{ნახ}}) \frac{v_c^2}{2g}\,,$$

საიდანაც

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi_{\text{ნახ}}}} \sqrt{2gH_{\text{დაყ}}} \tag{11.6}$$

ანუ

$$v_c = \varphi\sqrt{2gH_{\text{დაწ}}}\ , \tag{11.7}$$

სადაც

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi_{\text{ნახ}}}}\ . \tag{11.8}$$

φ კოეფიციენტს, რომელიც (11.7) ფორმულაში დაწნევის დანაკარგს ითვალისწინებს, **სიჩქარის კოეფიციენტი** ეწოდება.

იმ შემთხვევაში, როცა $p_0 = p_{\text{ატ}}$, ე.ი., როცა რეზერვუარი ღიაა, $H_{\text{დაწ}} = H$ და (11.7) გამოსახულებიდან გვექნება:

$$v_c = \varphi\sqrt{2gH}\ . \tag{11.9}$$

ეს უკანასკნელი არის *C-C* კვეთში სითხის ჭავლის მოძრაობის საშუალო სიჩქარის გამოსათვლელი ფორმულა.

v_c სიჩქარის საშუალებით ვიპოვოთ ნახვრეტიდან გამოდინებული ხარჯის სიდიდე ($p_0 = p_{\text{ატ}}$ შემთხვევისათვის)

$$Q = \omega_c v_c = \omega_c \varphi\sqrt{2gH}\ .$$

თუ (11.2) გამოსახულებასაც გავითვალისწინებთ, მივიღებთ:

$$Q = \varepsilon\varphi\omega\sqrt{2gH} \tag{11.10}$$

ანუ

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gH}\ , \tag{11.11}$$

სადაც

$$\mu = \varepsilon\varphi \tag{11.12}$$

არის ე.წ. **ხარჯის კოეფიციენტი**.

(11.11) გამოსახულება მუდმივი დაწნევისას თხელკედლიანი მცირე ნახვრეტიდან გამოდინებული სითხის ხარჯის საანგარიშო ფორმულაა.

3. **კუმშვის, ხარჯის, სიჩქარის და დანაკარგის კოეფიციენტების მნიშვნელობები. ნახვრეტიდან გამოდინების კოეფიციენტებსა და რეინოლდსის რიცხვს შორის დამოკიდებულება.** მრავალრიცხოვანი ექსპერიმენტული კვლევის შედეგად დადგენილია, რომ წრიული და კვადრატული ფორმის მცირე ნახვრეტებიდან გამოდინებული სითხის ჭავლის სრული და სრულყოფილი კუმშვის ε კოეფიციენტის საშუალო მნიშვნელობები შეიძლება მივიღოთ 0,64÷0,60-ის ტოლად. ამასთან, კუმშვის კოეფიციენტის სიდიდე დაწნევის და, მაშასადამე, რეინოლდსის რიცხვის ზრდით მცირდება.

არასრული და არასრულყოფილი კუმშვის შემთხვევაში ε კოეფიციენტის მნიშვნელობა მეტია, ვიდრე სრული და სრულყოფილი კუმშვის შემთხვევაში, რისი გათვალისწინებაც ხარჯის კოეფიციენტის რამდენადმე გაზრდით ხდება.

ხარჯის კოეფიციენტი თხელკედლიანი მცირე ნახვრეტებისათვის, რომლებიც ხასიათდება ჭავლის სრული სრულყოფილი კუმშვით, იცვლება შედარებით მცირე დიაპაზონში და რეინოლდსის რიცხვის დიდი მნიშვნელობებისათვის საშუალოდ $\mu = 0{,}62\ldots0{,}60$-ის ტოლად მიიღება. ამასთან, რეინოლდსის რიცხვის ნაკლებ მნიშვნელობებს და მცირე ზომის ნახვრეტებს μ-ს დიდი მნიშვნელობები შეესაბამება.

ჭავლის არასრული კუმშვის შემთხვევაში ხარჯის კოეფიციენტი ($\mu_{\text{არასრული}}$) მეტია, ვიდრე სრული კუმშვისას (μ). მათ შორის დამოკიდებულება გამოისახება ემპირიული ფორმულით:

$$\mu_{\text{არასრული}} = \mu\left(1 + k\frac{n}{\chi}\right), \tag{11.13}$$

სადაც χ არის ნახვრეტის პერიმეტრი;

n – ნახვრეტის კონტურის იმ ნაწილის პერიმეტრი, რომელზედაც ჭავლის კუმშვა არ ხდება;

K – კოეფიციენტი, რომელიც წრიული ნახვრეტისათვის 0,13-ის, ხოლო კვადრატულისათვის 0,15-ის ტოლია.

სრული, მაგრამ არასრულყოფილი კუმშვისას ხარჯის კოეფიციენტი ($\mu_{\text{არასრული}}$) ასევე μ კოეფიციენტზე მეტია. დამოკიდებულება ამ კოეფიციენტებს შორის გამოისახება ემპირიული ფორმულით:

$$\mu_{\text{არასრულყ}} = \mu\left[1 + 0{,}64(\omega/\Omega)^2\right], \tag{11.14}$$

სადაც ω და Ω არის, შესაბამისად, ნახვრეტისა და იმ კედლის ფართობი, რომელშიც მოწყობილია ნახვრეტი.

თხელკედლიანი მცირე ნახვრეტიდან გამოდინებისას ექსპერიმენტული გზით დადგენილია სიჩქარის კოეფიციენტის საშუალო მნიშვნელობა რეინოლდსის რიცხვის დიდი მნიშვნელობებისათვის $\varphi = 0{,}97$. ამ უკანასკნელით (11.8) ფორმულიდან შეგვიძლია გამოვთვალოთ ნახვრეტში დაწნევის ადგილობრივი დანაკარგის კოეფიციენტი, თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ $\alpha \approx 1$-ს:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi_{\text{ნახ}}}} = 0{,}97,$$

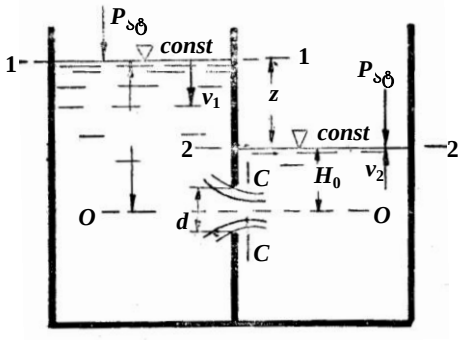
საიდანაც $\xi_{\text{ნახ}} = 0{,}06$.

ნახვრეტიდან სითხის გამოდინების კოეფიციენტების ზემოთ მოყვანილი რიცხვითი სიდიდეები მართებულია რეინოლდსის რიცხვის $\mathrm{Re}=\frac{vd}{\nu}=\frac{\sqrt{2gH}}{\nu}>10^5$ მნიშვნელობებისათვის, როცა ეს უკანასკნელი პრაქტიკულად გავლენას არ ახდენს აღნიშნული კოეფიციენტების სიდიდეზე. რეინოლდსის რიცხვის ნაკლები მნიშვნელობებისათვის ε, μ, φ კოეფიციენტები დამოკიდებულია Re-ზე.

4. **სითხის არათავისუფალი (დონის ქვემოთ) გამოდინება თხელკედლიანი მცირე ნახვრეტიდან** (ნახ. 11.3). თხელკედლიანი მცირე ნახვრეტიდან დონის ქვემოთ გამოდინებული სითხის ხარჯი გამოითვლება ფორმულით:

$$Q=\mu\omega\sqrt{2gz}\ , \qquad (11.15)$$

სადაც $\mu=\varepsilon\varphi$ არის ხარჯის კოეფიციენტი; ω–ნახვრეტის ფართობი; $z=H_1-H_2$ – დაწნევა ნახვრეტის ცენტრზე.



ნახ. 11.3

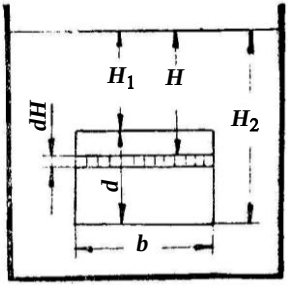
მრავალრიცხოვანმა ექსპერიმენტულმა გამოკვლევებმა ცხადყო, რომ დონის ქვემოთ გამოდინების კოეფიციენტების მნიშვნელობები თითქმის არ განსხვავდება თავისუფალი გამოდინების ანალოგიური კოეფიციენტების მნიშვნელობებისაგან.

5. **სითხის თავისუფალი გამოდინება თხელკედლიანი დიდი ნახვრეტიდან** (ნახ. 11.4)[1]. დიდი ნახვრეტიდან ($a>0{,}1H$; $d>0{,}1H$) სითხის გამოდინებისას გეომეტრიული დაწნევა ნახვრეტის ზედა და ქვედა წერტილებში მნიშვნელოვნად განსხვავდება ერთმანეთისაგან. იგი იცვლება H_1-დან ნახვრეტის ზემო ნაწილში H_2-მდე მის ქვემო ნაწილში.

დიდი ნახვრეტიდან სითხის ატმოსფეროში გამოდინების ძირითადი ამოცანაა ხარჯის განსაზღვრა. ამ მიზნით დიდი სწორკუთხა ნახვრეტის ფართობი დავყოთ უსასრულოდ მცირე dH სიმაღლის

[1] სიმარტივისათვის განვიხილავთ დიდი ნახვრეტის კერძო შემთხვევას – სწორკუთხა ნახვრეტს.

ჰორიზონტალურ ზოლებად. მაშინ თითოეული ზოლი შეიძლება განვიხილოთ, როგორც „მცირე“ ნახვრეტი მუდმივი H დაწნევით. მცირე ნახვრეტიდან გამოდინებული სითხის ხარჯის საანგარიშო ფორმულიდან (11.11), იმის გათვალისწინებით, რომ $d\omega = bdH$, გვექნება:



ნახ. 11.4

$$Q = \mu d\omega\sqrt{2gz} = \mu b\sqrt{2gH}\,dH\,, \qquad (11.16)$$

სადაც b არის სწორკუთხა ნახვრეტის სიგანე; μ – „მცირე“ ნახვრეტის ხარჯის კოეფიციენტი; H – დაწნევა „მცირე“ ნახვრეტისათვის.

მკაცრად რომ ვთქვათ, μ ხარჯის კოეფიციენტი დამოკიდებულია H სიღრმეზე და სხვადასხვა ზოლისათვის ის სხვადასხვა იქნება. მაგრამ იმის გამო, რომ არ გაგვაჩნია საკმარისი მონაცემები ნახვრეტის სიმაღლის მიხედვით, μ-ს ცვლილების შესახებ, (11.16) განტოლების ინტეგრირებისათვის დავუშვათ, რომ $\mu = const$ და მიღებულ ფორმულაში შევიყვანოთ ცდით დადგენილი ხარჯის განზოგადებული კოეფიციენტი, რომელიც გაითვალისწინებს აღნიშნული დაშვების პირობითობას. მაშინ

$$Q = \mu b\int_{H_1}^{H_2}\sqrt{2gH}\,dH = \frac{2}{3}\mu b\sqrt{2g}\left(H_2^{3/2} - H_1^{3/2}\right). \qquad (11.17)$$

ზოგჯერ ეს ფორმულა (11.11) სახეზე დაყავთ. ამისათვის $H_{სც}$-ით აღვნიშნოთ ნახვრეტის სიმძიმის ცენტრის დაცილება სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან. მაშინ

$$H_1 = H_{სც} - \frac{a}{2} = H_{სც}\left(1 - \frac{a}{2H_{სც}}\right);$$

$$H_2 = H_{სც} + \frac{a}{2} = H_{სც}\left(1 + \frac{a}{2H_{სც}}\right),$$

სადაც a არის ნახვრეტის სიმაღლე.

H_1-ის და H_2-ის ეს მნიშვნელობები ჩავსვათ (11.17) გამოსახულებაში:

$$Q = \frac{2}{3}\mu b\sqrt{2g}\,H_{სც}^{3/2}\left[\left(1 + \frac{a}{2H_{სც}}\right)^{3/2} - \left(1 - \frac{a}{2H_{სც}}\right)^{3/2}\right]. \qquad (11.18)$$

მრგვალ ფრჩხილებში მოთავსებული გამოსახულებები ნიუტონის ბინომით გავშალოთ მწკრივებად და შემოვიფარგლოთ მათი პირველი ოთხ-ოთხი წევრით, გვექნება:

$$\left(1\pm\frac{a}{2H_{\text{სც}}}\right)^{3/2}=1\pm\frac{3}{2}\frac{a}{2H_{\text{სც}}}+\frac{3}{8}\frac{a^2}{4H_{\text{სც}}^2}\mp\frac{1}{16}\frac{a^3}{8H_{\text{სც}}^3}.$$

ამ უკანასკნელის გათვალისწინებით (11.18) გამოსახულებიდან მარტივი გარდაქმნებით მივიღებთ:

$$Q=\frac{2}{3}\mu b\sqrt{2g}H_{\text{სც}}^{3/2}\left(\frac{3}{2}\frac{a}{H_{\text{სც}}}-\frac{1}{64}\frac{a^3}{H_{\text{სც}}^3}\right)=\mu\omega\sqrt{2gH_{\text{სც}}}\left(1-\frac{1}{96}\cdot\frac{a^2}{H_{\text{სც}}^3}\right).$$

ფრჩხილებში მოთავსებული მეორე წევრი $\frac{a^2}{96H_{\text{სც}}^3}$ გაცილებით ნაკლებია ერთზე, რის გამოც მას, ჩვეულებრივ, უგულებელყოფენ. მაშინ თხელკედლიანი დიდი ნახვრეტიდან სითხის თავისუფალი გამოდინების შემთხვევისათვის ხარჯის ფორმულას ასეთი სახე ექნება:

$$Q=\mu_0 ab\sqrt{2gH_{\text{სც}}}=\mu_0\omega\sqrt{2gH_{\text{სც}}}\,, \qquad (11.19)$$

სადაც $\omega=ab$ არის თხელკედლიანი სწორკუთხა დიდი ნახვრეტის ფართობი.

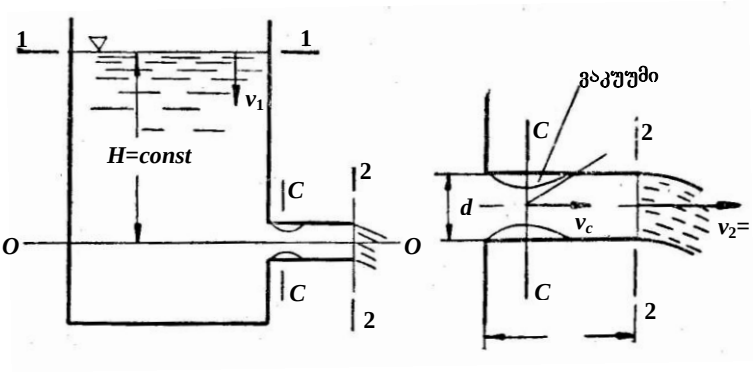
μ_0 ხარჯის კოეფიციენტის მნიშვნელობები დიდი ნახვრეტებისათვის იცვლება ფართო დიაპაზონში ($\mu_0=0{,}65\ldots0{,}90$) და დამოკიდებულია მრავალ ფაქტორზე (ნახვრეტის ზომებსა და ფორმაზე, დაწნევაზე, ჭავლის კუმშვის ხარისხზე და სხვა).

ამგვარად, დიდი ნახვრეტიდან გამოდინებული სითხის ხარჯის გამოსათვლელად ვსარგებლობთ ისეთივე ფორმულით, როგორითაც თხელკედლიანი მცირე ნახვრეტიდან გამოდინებისას, მხოლოდ ამ შემთხვევაში საჭიროა, წინასწარ დადგინდეს μ_0 ხარჯის კოეფიციენტის მნიშვნელობა.

§ 11.2. სითხის გამოდინება ნაცმებიდან მუდმივი დაწნევისას

განვიხილოთ სითხის მოძრაობა რეზერვუარის d დიამეტრის თხელკედლიან ნახვრეტთან მიერთებულ ℓ სიგრძის **მოკლე მილში** (ნახ. 11.5). ასეთ მილში სითხის მოძრაობის ხასიათი ნაკადის უეცარი შევიწროების შემთხვევის მსგავსია. სითხის მილში შესვლისას დენის წირების გამრუდების გამო, რაც

გამოწვეულია შესასვლელის ნაწიბურების გარსშემოდენით, მცირე ნახვრეტიდან გამოდინების ანალოგიურად, ხდება ჭავლის კუმშვა (ე.წ. **ჭავლის შიგა კუმშვა**) (ნახ. 11.5). ატმოსფეროში გამოდინების დაწყების მომენტში სითხის ჭავლი წარიტაცებს შეკუმშულ კვეთსა და მილის კედლებს შორის სივრცეში მოთავსებულ ჰაერს, რის შედეგადაც ამ სივრცეში წარმოიქმნება ვაკუუმი, რომლის სიდიდე დამოკიდებულია შეკუმშულ კვეთში სითხის მოძრაობის სიჩქარესა და დაწნევაზე. შემდეგ ჭავლი კვლავ ფართოვდება, ავსებს მილის მთელ კვეთს და გამოედინება სრული კვეთით, რომლის ფართობი მილის გამოსასვლელი ნახვრეტის ფართობის ტოლია; ე.ი. მილიდან ატმოსფეროში გამოსვლისას ჭავლის კუმშვა (ე.წ. **გარე კუმშვა**) არ ხდება. ვაკუუმის მოქმედებით შეკუმშული *C-C* კვეთის ირგვლივ მდებარე ზონა ივსება სითხით, რომელიც ბრუნვით ცირკულაციურ მოძრაობას ასრულებს.



ნახ. 11.5

ვაკუუმის არსებობის გამო, ხდება სითხის „შეწოვა“ რეზერვუარიდან, რაც მნიშვნელოვნად ზრდის მილის გამტარობას (ხარჯს) იმავე დიამეტრის თხელკედლიან ნახვრეტთან შედარებით. ე.ი. განსახილველ შემთხვევაში ფაქტიური დაწნევა შედგება მილის შესასვლელი ნახვრეტის სიმძიმის ცენტრზე მოქმედი დაწნევისა და შეკუმშულ კვეთში ვაკუუმის სიდიდის ჯამისაგან, რაც მილის გამტარობას ზრდის.

ამასთან, ნახვრეტთან მილის მიერთება იწვევს დაწნევის დამატებით კარგვას თხელკედლიან ნახვრეტთან შედარებით, რაც განპირობებულია მილის შიგნით ჭავლის უეცარი გაფართოებითა (შეკუმშული *C-C* კვეთის d_c დიამეტრიდან მილის *d* დიამეტრამდე)

და მილის ℓ სიგრძეზე არსებული ჰიდრავლიკური წინაღობით. ეს, პირიქით, იწვევს მილში ხარჯის რამდენადმე შემცირებას.

მაშასადამე, თხელკედლიან ნახვრეტთან იმავე დიამეტრის მილის მიერთებისას, ერთდროულად, ვაკუუმის წარმოქმნის შედეგად, ხარჯის გამტარობა იზრდება და იმის გამო, რომ თავს იჩენს დამატებითი ჰიდრავლიკური წინაღობები კიდეც მცირდება. ისმის კითხვა: რა ხდება? ვაკუუმის არსებობით გამოწვეული ხარჯის ზრდის ეფექტი ჭარბობს დამატებითი ჰიდრავლიკური წინაღობების გავლენით ხარჯის შემცირების ეფექტს თუ პირიქით?

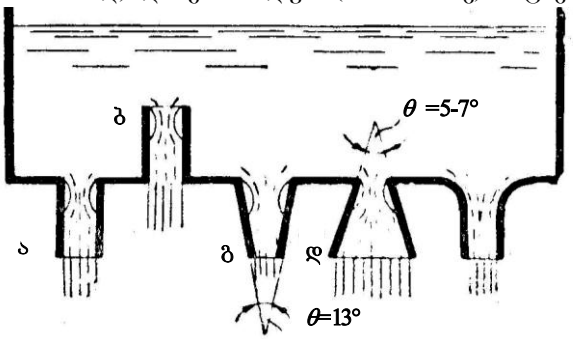
აღმოჩნდა, რომ, როდესაც $\ell \approx 55d$ (სადაც ℓ და d არის შესაბამისად, მილის სიგრძე და დიამეტრი), მოკლე მილიდან გამოდინებული სითხის ხარჯი იმავე d დიამეტრის თხელკედლიანი მცირე ნახვრეტიდან გამოდინებული სითხის ხარჯის ტოლია. ე.ი. ამ შემთხვევაში ზემოთ აღნიშნული ორი ეფექტი ერთმანეთის ტოლფასია. როდესაც $\ell < 55d$, მაშინ ვაკუუმის ფაქტორი უფრო ძლიერ გავლენას ახდენს მილის გამტარობაზე, ვიდრე დამატებითი ჰიდრავლიკური წინაღობები და ამიტომ მილიდან გამოდინებული სითხის ხარჯი აღემატება იმავე დიამეტრის თხელკედლიანი ნახვრეტიდან გამოდინებული სითხის ხარჯს. როდესაც $\ell > 55d$, ვაკუუმის ეფექტი უკვე ვეღარ ახდენს დამატებითი წინაღობების კომპენსაციას და ამიტომ ასეთი მილიდან გამოდინებული სითხის ხარჯი ნაკლები იქნება იმავე დიამეტრის თხელკედლიანი ნახვრეტიდან გამოდინებული სითხის ხარჯზე.

როგორც გამოკვლევები გვიჩვენებს, ხარჯის მაქსიმალური მნიშვნელობა მიიღება იმ შემთხვევაში, როდესაც მილის სიგრძე $\ell = (3\ldots4)d$. ასეთ მოკლე მილს **ნაცმს** უწოდებენ იმისათვის, რომ მოკლე მილი, როგორც ნაცმი მუშაობდეს, საჭიროა დაცულ იქნეს შემდეგი პირობა:

$$(3\ldots4)d \le \ell \le (6\ldots7)d\,. \qquad (11.20)$$

თუ $\ell < (3\ldots4)d$, მაშინ მილის სიგრძე არ არის საკმარისი იმისათვის, რომ მის ფარგლებში ჭავლმა მოასწროს გაფართოება მილის სრულ კვეთამდე. თუ $\ell > (6\ldots7)d$, მაშინ ნაცმის ნაცვლად ვღებულობთ „მოკლე მილსადენს“, როდესაც დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგის უგულებელყოფა უკვე აღარ შეიძლება. მაშასადამე, ნაცმი არის თხელკედლიან ნახვრეტებთან მიერთებული მცირე სიგრძის მილი, რომლის ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას მხედველობაში მიიღება დაწნევის მხოლოდ ადგილობრივი დანაკარგები, ხოლო სიგრძეზე დანაკარგებს უგულებელვყოფთ.

განასხვავებენ გარე და შიგა ცილინდრულ (ნახ. 11.6, ა, ბ), კონუსურ ბოლოშევიწროებულ (ნახ. 11.6, გ), კონუსურ ბოლოგაშლილ (ნახ. 11.6, დ) და კონოიდურ (ნახ. 11.6, ე) ნაცმებს.



ნახ. 11.6

გარე ცილინდრული ნაცმი (ნახ. 11.5). არის რეზერვუარის d დიამეტრის ნახვრეტთან გარედან მიერთებული იმავე დიამეტრის $\ell = (3\ldots4)d$ სიგრძის მოკლე მილი.

გარე ცილინდრული ნაცმიდან გამოდინებული სითხის ხარჯი გამოითვლება (11.11) ფორმულით:

$$Q = \mu\omega\sqrt{2gz}\ .$$

იმის გამო, რომ ნაცმის გამოსასვლელ 2-2 კვეთში ჭავლი გარე კუმშვას არ განიცდის, ე.ი. კუმშვის კოეფიციენტი $\varepsilon = 1$-ს, μ ხარჯის კოეფიციენტი მნიშვნელოვნად მეტია თხელკედლიანი წრიული ნახვრეტის შესაბამის კოეფიციენტზე. როცა $\varphi = 0{,}82$ (გარე ცილინდრული ნაცმისათვის) და $\varepsilon = 1$, მაშინ (11.12) ფორმულის თანახმად, $\mu = 1 \cdot 0{,}82 = 0{,}82$ (გავიხსენოთ, რომ თხელკედლიანი წრიული ნახვრეტისათვის $\mu \approx 0{,}62$). მაშასადამე, გარე ცილინდრული ნაცმიდან გამოდინებული სითხის ხარჯი ($Q_{\text{ნაც}}$) თხელკედლიანი ნახვრეტებიდან გამოდინებული სითხის ხარჯს ($Q_{\text{ნახ}}$) სხვა თანაბარ პირობებში აღემატება: $\dfrac{Q_{\text{ნაც}}}{Q_{\text{ნახ}}} = \dfrac{\mu_{\text{ნაც}}\omega\sqrt{2gH}}{\mu_{\text{ნახ}}\omega\sqrt{2gH}} = \dfrac{0{,}82}{0{,}62} \approx 1{,}34$-ჯერ, ე.ი. 34%-ით.

გარე ცილინდრულ ნაცმში წარმოქმნილი ვაკუუმი ტოლია:

$$h_{\text{ვაკ}} \approx 0{,}75H\ . \qquad (11.21)$$

იგი გამოსახავს ვაკუუმმეტრულ სიმაღლესა ($h_{\text{ვაკ}}$) და გეომეტრიულ დაწნევას (H) შორის თანაფარდობას.

(11.21) ფორმულიდან შეგვიძლია დავადგინოთ დაწნევის ზღვრული მნიშვნელობა გარე ცილინდრული ნაცმისათვის

$$H_{\text{ზღვრ}} = h_{\text{ვაკ. ზღვრ.}} / 0{,}75 .$$

თუ მიახლოებით მივიღებთ, რომ ვაკუუმმეტრული სიმაღლე ($h_{\text{ვაკ.ზღვ}}$) დაახლოებით 10 მ ტოლია, მაშინ დაწნევის ზღვრული მნიშვნელობა $H_{\text{ზღვ}} = 10/0{,}75 = 13{,}33$ მ.

საინჟინრო პრაქტიკაში, ჩვეულებრივ, არ იყენებენ ვაკუუმმეტრული სიმაღლის მახლობელ ზღვრულ მნიშვნელობას, რადგან ასეთ შემთხვევაში მოსალოდნელია სითხის უწყვეტობისა და სტაციონარულობის დარღვევა და ნაცმში გარედან ჰაერის შეჭრა. ამიტომ, როგორც წესი, ვაკუუმმეტრულ სიმაღლეს არ ღებულობენ 8 მ-ზე მეტს. მაშინ ზღვრული დაწნევა $H_{\text{ზღვ}} \le 10{,}7$ მ.

შიგა ცილინდრული ნაცმი (ნახ. 11.6, ბ). ასეთ ნაცმში სითხის მოძრაობის ხასიათი ისეთივეა, როგორც გარე ცილინდრულ ნაცმში, მხოლოდ კუმშვის, სიჩქარისა და ხარჯის კოეფიციენტების გასაშუალებული მნიშვნელობები რამდენადმე განსხვავდება: $\varepsilon = 1$; $\varphi = 0{,}71$, $\mu = 0{,}71$. ასე, რომ შიგა ცილინდრული ნაცმი ხასიათდება მეტი ჰიდრავლიკური წინაღობით, ვიდრე გარე, რაც იწვევს სიჩქარის კოეფიციენტის და, მაშასადამე, ხარჯის კოეფიციენტის შემცირებას 0,71-მდე. ამის გამოა, რომ პრაქტიკაში ასეთი ტიპის ნაცმები იშვიათად გამოიყენება.

კონუსური ბოლოშევიწროებული ნაცმი (ნახ. 9.6, გ). ასეთ ნაცმში სითხის მოძრაობა ხდება ჭავლების კრებადობით ნაცმის გამოსასვლელი კვეთისაკენ, რის გამოც იგი ხასიათდება გამოდინების დიდი სიჩქარეებითა და ჭავლის კომპაქტურობით. კონუსურ ბოლოშევიწროებულ ნაცმში ჭავლის შიგა კუმშვის ხარისხი ნაკლებია, ვიდრე გარე ცილინდრულ ნაცმში და შეკუმშული კვეთის ω ფართობი პრაქტიკულად გამოსასვლელი კვეთის ω ფართობის ტოლია, რაც საგრძნობლად ამცირებს დაწნევის დანაკარგებს. განსახილველი ნაცმის ხარჯის კოეფიციენტი დამოკიდებულია θ კონუსურ კუთხეზე და მაქსიმალურ მნიშვნელობას ($\mu = 0{,}94 - 0{,}95$) აღწევს, როცა $\theta \approx 13°$-ს. ამ დროს სიჩქარისა და დანაკარგის კოეფიციენტების მნიშვნელობებია: $\varphi = 0{,}96$; $\xi_{\text{ზღვ}} = 0{,}08$.

შევნიშნოთ, რომ ნაცმის შევიწროებული მიმმართველი კედლების გამო ჭავლი ნაცმიდან გამოსვლისას მცირედ იკუმშება ($\varepsilon \approx 0{,}98 \div 0{,}99$), რაც ასეთი ნაცმების ერთგვარი ნაკლია.

კონუსური ბოლოშევიწროებული ნაცმები გამოიყენება იქ, სადაც საჭიროა დიდი კინეტიკური ენერგიის კომპაქტური და შორსმსროლი ჭავლების მიღება, მაგალითად, სახანძრო ბრადსპოიტებსა და ჰიდრომონიტორებში საქშენებად, აქტიური ტურბინების საქშენებში, შადრევნების ბუნიკებში და სხვა.

კონუსური ბოლოგაშლილი ნაცმი (ნახ. 11.6, დ). ასეთ ნაცმში შესვლისას სითხის ჭავლი განიცდის მნიშვნელოვან შიგა კუმშვას, შემდეგ სწრაფად ფართოვდება და მთლიანად ავსებს კვეთს. ნაცმიდან გამოსვლისას ჭავლი გარე კუმშვას არ განიცდის და კუმშვის კოეფიციენტი $\varepsilon = 1$-ს.

კონუსურ ბოლოგაშლილ ნაცმში ჭავლის კუმშვის ხარისხი და ვაკუუმის მნიშვნელობა მეტია, ვიდრე გარე ცილინდრულ ნაცმში, ამასთან კონუსურობის θ კუთხის გაზრდით იზრდება ვაკუუმის სიდიდეც. მაგრამ, როცა θ კუთხე 8°-ს აჭარბებს, ნაცმი მთელი კვეთით აღარ მუშაობს, ხდება ჭავლის მოწყვეტა ნაცმის კედლებიდან და იქმნება პირობები, რომლებიც თხელკედლიანი ნახვრეტიდან გამოდინების ანალოგიურია. როცა $\theta = 5 \div 7°$-ს, ხარჯისა და სიჩქარის კოეფიციენტების მნიშვნელობები საშუალოდ $\mu = \varphi = 0{,}45$-ის ტოლია.

ამგვარად, კონუსურ ბოლოგაშლილ ნაცმებში სიჩქარე გამოსასვლელ კვეთში მნიშვნელოვნად ნაკლებია $(\varphi = 0{,}45)$, ვიდრე ყველა ზემოთ განხილულ შემთხვევაში. ამის მიზეზია დაწნევის დიდი დანაკარგები თვით ნაცმში ჭავლის უეცარ შევიწროებასა და გაფართოებაზე $(\xi_{\text{ზღვ}} = 4)$. მაგრამ ასეთი ნაცმიდან გამოდინებული სითხის ხარჯი მეტია, ვიდრე სხვა ტიპის ნაცმებიდან გამოდინების შემთხვევაში. ეს ფაქტი, ერთი შეხედვით, შეიძლება რამდენადმე უცნაურად მოგვეჩვენოს, რადგანაც კონუსური ბოლოგაშლილი ნაცმისათვის ხარჯის კოეფიციენტი შედარებით მცირეა $(\mu = 0{,}45)$. საჭიროა, გავითვალისწინოთ, რომ ეს კოეფიციენტი შეესაბამება ნაცმის დიდ გამოსასვლელ კვეთს. თუ მას შევუსაბამებთ მცირე შესასვლელ კვეთს (რეზერვუარის კედლის ნახვრეტთან მიერთების კვეთს), მაშინ μ-ს მნიშვნელობა 2–3-ს მიაღწევს.

ამგვარად, თუ თხელკედლიან ნახვრეტს მივუერთებთ კონუსურ ბოლოგაშლილ ნაცმს, სითხის Q ხარჯი ბევრად გაიზრდება. როგორც აღვნიშნეთ, ეს გამოწვეულია ვაკუუმის დიდი მნიშვნელობით, რაც განაპირობებს სითხის ინტენსიურ „შეწოვას“.

აღნიშნული თვისებების გამო, კონუსურ ბოლოგაშლილ ნაცმებს იყენებენ ისეთ დანადგარებში, სადაც მოითხოვება

მნიშვნელოვანი ვაკუუმის შექმნა (ჭავლურ ტუმბოებში, ჰიდროელევატორებში) ან გამოდინების მცირე სიჩქარეები (საწვიმებელ აპარატებში, ტურბინის გამწოვ მიკებში), ან კიდევ დიდი გამტარობის უნარი (დიდი ხარჯი).

კონოიდური ნაცმი (ნახ. 11.6, ე). ასეთი ნაცმის შიგა ზედაპირის მოხაზულობა დაახლოებით ემთხვევა თხელკედლიანი ხვრეტიდან გამოდინებული სითხის ჭავლის ფორმას. ასეთი ტიპის ნაცმებში ჭავლის შიგა კუმშვა პრაქტიკულად არ ხდება. ასევე არა აქვს ადგილი ჭავლის გარე კუმშვას ($\varepsilon = 1$). სიჩქარისა და ხარჯის კოეფიციენტები მეტია, ვიდრე ყველა ზემოთ განხილულ შემთხვევაში: $\mu = \varphi = 0{,}97 - 0{,}99$.

მიუხედავად იმისა, რომ კონოიდური ნაცმები ხასიათდება დიდი გამტარობის უნარითა და დიდი სიჩქარეებით (გამოსასვლელ კვეთში), ისინი პრაქტიკაში ნაკლებად გამოიყენება, დამზადების სირთულის გამო.

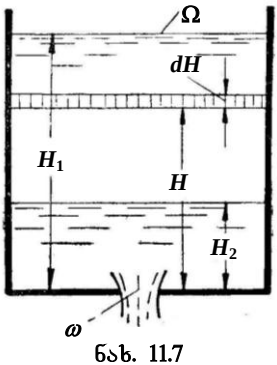
§ 11.3. სითხის გამოდინება ცვლადი დაწნევისას

ნახვრეტებსა და ნაცმებიდან სითხის ცვლადი დაწნევით გამოდინების ძირითადი ამოცანაა იმ დროის განსაზღვრა, რომელიც საჭიროა ჭურჭლის მთლიანად ან ნაწილობრივ დასაცლელად, ან შესავსებად და რომლის სიდიდე დამოკიდებულია ჭურჭლისა და ნახვრეტის (ნაცმის) ფორმასა და ზომებზე. მსგავსი ამოცანები გვხვდება რეზერვუარების, ცისტერნების, წყალსაცავების, რაბის კამერებისა და სხვათა დაცლისა და შევსების გაანგარიშებისას.

აუცილებელია მხედველობაში მივიღოთ, რომ ზემოთ განხილული ამოცანებისაგან განსხვავებით, ცვლადი დაწნევით გამოდინებისას განუწყვეტლივ იცვლება გამოდინების სიჩქარე და, მაშასადამე, გვაქვს სითხის დაუმყარებელი მოძრაობა, რაც არ იძლევა ბერნულის განტოლების გამოყენების შესაძლებლობას. ამიტომ, მსგავსი ამოცანების გადაწყვეტისას სითხის გამოდინების მთელ დროს ყოფენ უსასრულოდ მცირე შუალედებად, რომელთა განმავლობაში დაწნევა ითვლება მუდმივად, ხოლო სითხის მოძრაობა – დამყარებულად. ეს საშუალებას იძლევა, ვისარგებლოთ ზემოთ მიღებული დამოკიდებულებებით.

განვიხილოთ სითხის გამოდინება ატმოსფეროში პრიზმული რეზერვუარის ω ფართობის თხელკედლიანი მცირე ნახვრეტიდან (ნახ. 11.7). განვსაზღვროთ რეზერვუარის H_1 საწყისი დონიდან H_2-მდე დაცლის დრო.

დავუშვათ, რომ დროის რაიმე მომენტისათვის დაწნევა ნახვრეტის ცენტრზე არის H. დროის უსასრულოდ მცირე dt განმავლობაში H დაწნევა შეიძლება ჩავთვალოთ მუდმივ სიდიდედ და მაშინ ნახვრეტიდან გამოდინებული სითხის dW მოცულობა იქნება:



ნახ. 11.7

$$dW = Qdt = \mu\omega\sqrt{2gH}\,dt\ .$$

დროის იმავე შუალედში სითხის დონე რეზერვუარში დაიწევს dH სიდიდით, ხოლო სითხის მოცულობა რეზერვუარში შემცირდება ΩdH-ით, სადაც Ω არის რეზერვუარის ჰორიზონტალური (განივი) კვეთის ფართობი. მასასადამე,

$$-\Omega dH = \mu\omega\sqrt{2gH}\,dt\ .$$

აქ „მინუს“ ნიშანი მიუთითებს H დაწნევის შემცირებაზე.

მიღებული განტოლებიდან

$$dt = -\frac{\Omega dH}{\mu\omega\sqrt{2gH}}\ .$$

ამ გამოსახულების ინტეგრირებით H_1-დან H_2-მდე საზღვრებში მივიღებთ:

$$t = -\int_{H_1}^{H_2}\frac{\Omega dH}{\mu\omega\sqrt{2gH}} = \frac{\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}}\int_{H_2}^{H_1}\frac{dH}{\sqrt{H}} = \frac{\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}}\left|2\sqrt{H}\right|_{H_2}^{H_1}$$

ანუ

$$t = \frac{2\Omega\left(\sqrt{H_1}-\sqrt{H_2}\right)}{\mu\omega\sqrt{2g}}. \qquad (11.22)$$

რეზერვუარის სრული დაცლისას $H_2 = 0$-ს, ამიტომ

$$t = \frac{2\Omega\sqrt{H_1}}{\mu\omega\sqrt{2g}}\ ,$$

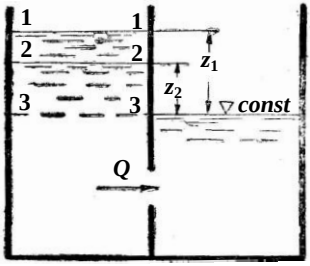
ანუ

$$t = \frac{2\Omega H_1\sqrt{H_1}}{\mu\omega\sqrt{2gH_1}} = \frac{2W}{Q}\ , \qquad (11.23)$$

სადაც W არის რეზერვუარში სითხის მოცულობა;

Q – სითხის ხარჯი საწყისი H_1 დაწნევისას.

მაშასადამე, რეზერვუარის სრული დაცლის ხანგრძლივობა ცვლადი დაწნევისას ორჯერ მეტია იმ დროზე, რომელიც დასჭირდებოდა სითხის იმავე მოცულობის გამოდინებას რეზერვუარის ნახვრეტიდან საწყისი დაწნევის (H_1) ტოლი მუდმივი დაწნევისას.



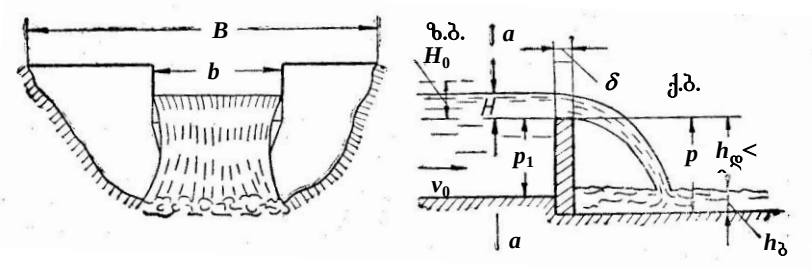
ნახ. 11.8

სითხის მუდმივი დონის ქვემოთ გამოდინებისას (ნახ. 11.8) საანგარიშო ფორმულას ექნება იგივე (11.23) სახე, მხოლოდ H_1-ის ნაცვლად ფორმულაში z_1შევა.

თავი XII. წყალსაშვები

§ 12.1. ტერმინოლოგია და წყალსაშვების კლასიფიკაცია. წყალსაშვების ძირითადი საანგარიშო ფორმულა

წყალსაშვები ეწოდება კალაპოტის გადამღობი ნაგებობის იმ ნაწილს, რომლის ზღურბლზე (ან ქიმზე) ხდება წყლის გადადინება (ნახ. 12.1). ნაკადის უბანს (აკვატორიას) წყალსაშვების წინ **ზედა ბიეფს**, ხოლო წყალსაშვების შემდეგ – **ქვედა ბიეფს** უწოდებენ.



ნახ. 12.1

წყალსაშვების დამახასიათებელი პარამეტრებია:

b – წყალსაშვების ფრონტის სიგანე ან, მარტივად, წყალსაშვების სიგანე;

δ – წყალსაშვების კედლის (ზღურბლის) სისქე;

P_1, P – წყალსაშვების ზღურბლის სიმაღლე, შესაბამისად, ზედა (P_1) და ქვედა (P) ბიეფების მხრიდან;

ზღურბლის ფორმა ანუ წყალსაშვების პროფილი;

B – კალაპოტის სიგანე, რომელშიც მოწყობილია წყალსაშვები;

H – გეომეტრიული დაწნევა წყალსაშვებზე – ზღურბლიდან სითხის თავისუფალ ზედაპირამდე სიმაღლე, გაზომილი იმ *a-a* კვეთში, სადაც წყლის დონის დაცემა პრაქტიკულად არ შეიმჩნევა. ეს კვეთი აიღება წყალსაშვების სადაწნეო წახნაგიდან $(3\ldots4)H$ მანძილზე.

H_0 – სრული დაწნევა წყალსაშვებზე:

$$H_0 = H + \alpha v_0^2/2g\ , \qquad (12.1)$$

სადაც v_0 არის ე.წ. მოსვლის სიჩქარე ანუ საშუალო სიჩქარე *a-a* კვეთში;

z – გეომეტრიული ვარდნილი – ზედა და ქვედა ბიეფებში წყლის თავისუფალი ზედაპირების ნიშნულების სხვაობა;

z_0 – სრული ვარდნილი – ვარდნილი მოსვლის სიჩქარის გათვალისწინებით

$$z_0 = z + \alpha v_0^2/2g\ . \qquad (12.2)$$

წყალსაშვების კლასიფიკაცია ხდება მათი ძირითადი დამახასიათებელი თვისებების გათვალისწინებით. პრაქტიკაში ხშირად გვხვდება:

1. **წყალსაშვების ზღურბლის ფორმის (წყალსაშვების პროფილის) მიხედვით:**

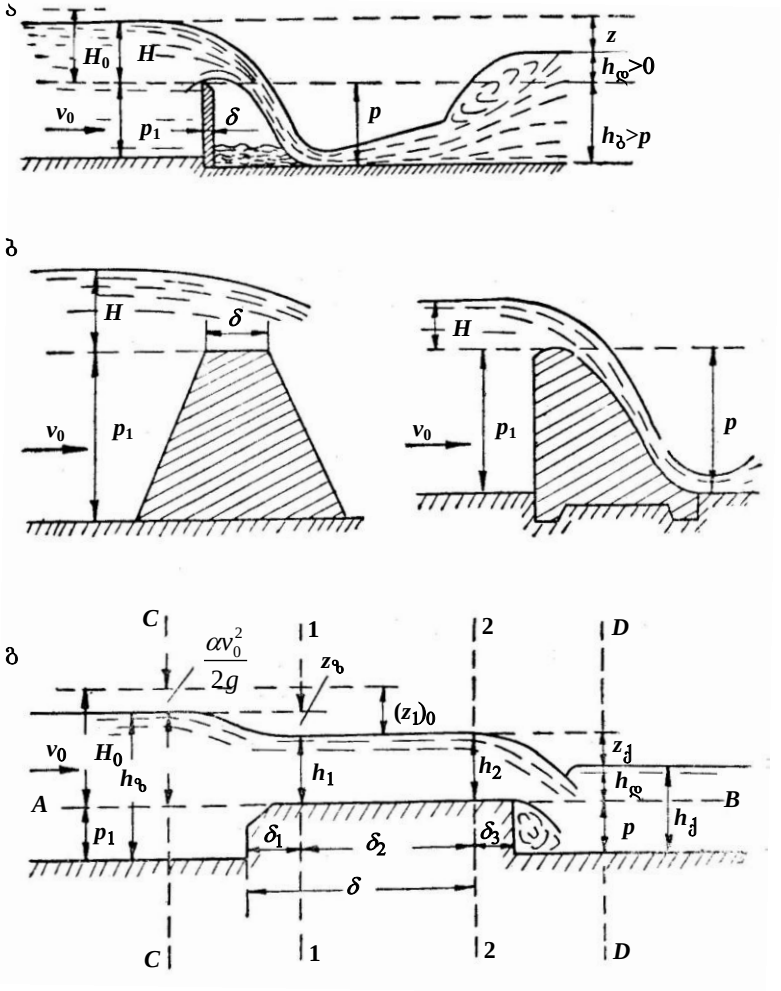
ა) **თხელკედლიანი წყალსაშვები,** როცა ზღურბლის (კედლის) სისქე გავლენას არ ახდენს გადადინებული ჭავლის სისქეზე. ამ დროს $\delta \le 0{,}67H$ (ნახ. 12.2, ა);

ბ) **პრაქტიკული პროფილის სწორხაზოვანი მოხაზულობის წყალსაშვები,** როცა $0{,}67H < \delta \le (2\cdots4)H$ (ნახ. 12.2, ბ);

გ) **ფართოზღურბლიანი წყალსაშვები,** როცა ზღურბლის სისქე ისეთია, რომ მის გარკვეულ კვეთებში მყარდება ნაკადის პარალელურჭავლური მოძრაობა. ამ დროს $(2\cdots4)H < \delta \le (8\cdots10)H$ (12.2, გ);

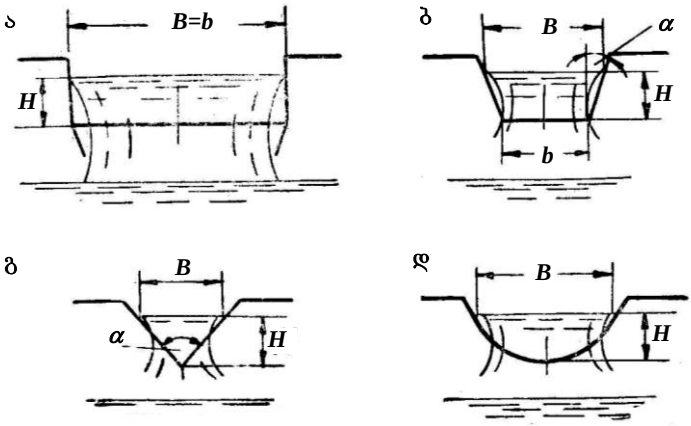
დ) **პრაქტიკული პროფილის მრუდწირული მოხაზულობის წყალსაშვები,** რომელსაც თხელკედლიან წყალსაშვებზე გადადინებული თავისუფალი ჭავლის მოხაზულობა აქვს (ნახ. 12.2, დ).

2. **წყალსაშვების ხვრეტის (ჭრილის) ფორმის მიხედვით: სწორკუთხა, ტრაპეციული, სამკუთხა, პარაბოლური და სხვა**



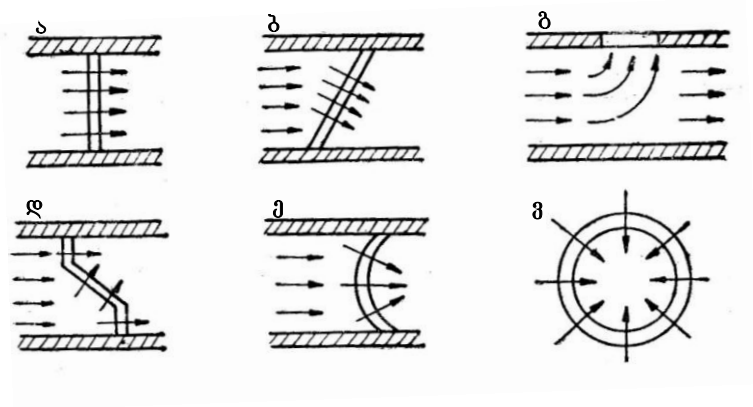
ნახ. 12.2

(ნახ. 12.3). უმეტეს შემთხვევაში სხვადასხვა ფორმის ჭრილი აქვს თხელკედლიან წყალსაშვებს. ფართოზღურბლიანი და პრაქტიკული პროფილის წყალსაშვები, როგორც წესი, სწორკუთხა ფორმისაა.



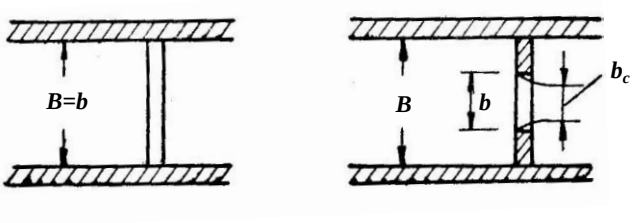
ნახ. 12.3

3. **წყალსაშვების გეგმაში მოხაზულობის მიხედვით არის: პირდაპირი, ირიბი, გვერდითი, პოლიგონური, მრუდწირული, რგოლური წყალსაშვები** (ნახ. 12.4).



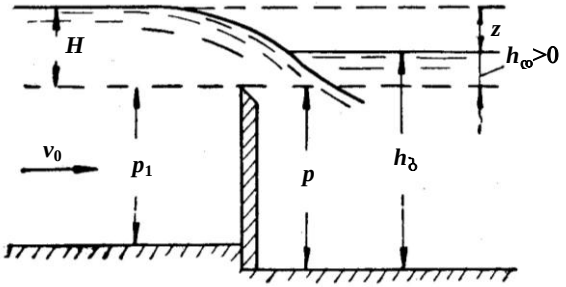
ნახ. 12.4

4. **ნაკადის წყალსაშვებთან მისვლის პირობების მიხედვით: წყალსაშვები გვერდითი კუმშვის გარეშე,** როცა $b = B$ (ნახ. 12.5, ა) და **წყალსაშვები გვერდითი კუმშვით,** როცა $b < B$ (ნახ. 12.5, ბ).



ნახ. 12.5

5. **წყალსაშვებზე გადადინებული ჭავლის ქვედა ბიეფთან შეუღლების მიხედვით: დაუტბორავი (დაუძირავი) წყალსაშვები,** როცა წყლის დონე უშუალოდ კედლის შემდეგ (ქვედა ბიეფში) წყალსაშვების ზღურბლზე დაბალია და ამიტომ გავლენას ვერ ახდენს ნაკადის გადადიდების ჰიდრავლიკურ პირობებზე (Q ხარჯსა და H დაწნევაზე) (ნახ. 12.2, დ) და **დატბორილი (დაძირული),** როცა წყლის დონე უშუალოდ კედლის შემდეგ ახდენს გავლენას Q ხარჯისა და H დაწნევის სიდიდეზე (ნახ. 12.6).



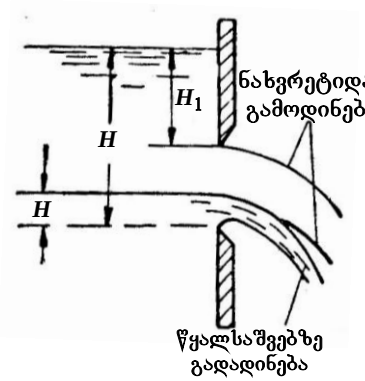
ნახ. 12.6

თუ წყალსაშვებზე გადადინებას განვიხილავთ, როგორც დიდი ნახვრეტიდან წყლის გამოდინების კერძო შემთხვევას, რომლისთვისაც ხარჯი განისაზღვრება (11.17) ფორმულით:

$$Q = \frac{2}{3}\mu b\sqrt{2g}\left(H_2^{3/2} - H_1^{3/2}\right)$$

და გავითვალისწინებთ, რომ $H_1 = 0$ და $H_2 = H$ (ნახ. 12.7), მივიღებთ:

$$Q = \frac{2}{3}\mu b\sqrt{2g}H^{3/2}.$$



ნახ. 12.7

ამ გამოსახულებაში $\frac{2}{3}\mu$ აღვნიშნოთ m-ით, ხოლო H გეომეტრიული დაწნევა შევცვალოთ H_0 სრული დაწნევით. მივიღებთ **წყალსაშვების ძირითად საანგარიშო ფორმულას:**

$$Q = mb\sqrt{2g}H_0^{3/2}, \qquad (12.3)$$

სადაც m არის ე.წ. **წყალსაშვების ხარჯის კოეფიციენტი**; b – წყალსაშვების ფრონტის სიგანე.

ხშირად წყალსაშვებზე გადადინებული ხარჯის გამოსათვლელად მოსახერხებელია ვისარგებლოთ H გეომეტრიული დაწნევით, რომელიც, H_0-საგან განსხვავებით, შეიძლება უშუალოდ გავზომოთ. ამ მიზნით (12.3) გამოსახულება ასეთი სახით გადავწეროთ:

$$Q = mb\sqrt{2g}\left(H + \frac{\alpha v_0^2}{2g}\right)^{3/2} = mb\sqrt{2g}H^{3/2}\left(1 + \frac{\alpha v_0^2}{2gH}\right)^{3/2}.$$

აღვნიშნოთ

$$m_0 = m\left(1 + \frac{\alpha v_0^2}{2gH}\right)^{3/2}; \qquad (12.4)$$

მაშინ

$$Q = m_0 b\sqrt{2g}H^{3/2}. \qquad (12.5)$$

m_0 უგანზომილებო სიდიდესაც აგრეთვე **წყალსაშვების ხარჯის კოეფიციენტს უწოდებენ**.

განსხვავება (12.3) და (12.5) ფორმულებს შორის იმაში მდგომარეობს, რომ მათგან პირველი მოსვლის სიჩქარეს ითვალისწინებს დაწნევის, ხოლო მეორე – ხარჯის კოეფიციენტის მნიშვნელობაში. m და m_0 კოეფიციენტები ასახავს წყალსაშვების კონსტრუქციულ თავისებურებებს. მათი რიცხვითი მნიშვნელობები, რომლებიც განისაზღვრება ექსპერიმენტულად, მოყვანილია ქვემოთ, წყალსაშვების ცალკეული ტიპების განხილვისას.

§ 12.2. თხელკედლიანი წყალსაშვები

1. **სწორკუთხა დაუტბორავი (დაუძირავი) წყალსაშვები.** პრაქტიკაში ხშირად გამოიყენება და შედარებით დეტალურად არის შესწავლილი პირდაპირი წყალსაშვები ვერტიკალური კედლით გვერდითი კუმშვის გარეშე და თავისუფლად გადადინებული ჭავლით (ნახ. 12.2, ა). გადადინებულ ჭავლს ვუწოდებთ თავისუფალს, როცა ჭავლსა და წყალსაშვების კედელს შორის მოთავსებულ სივრცეში ჰაერი თავისუფლად აღწევს და წნევა მასში ატმოსფერულის ტოლია. ასეთ პირობებში წყალსაშვებს **სრულყოფილს** ან **ნორმალურს უწოდებენ.**

ნორმალურ წყალსაშვებზე გადადინებული წყლის ხარჯის გამოსათვლელად სარგებლობენ (12.5) ფორმულით, რომელშიც m_0 ხარჯის კოეფიციენტის მნიშვნელობები განისაზღვრება ბაზენის შემდეგი ემპირიული ფორმულით:

$$m_0\left(0{,}405+\frac{0{,}003}{H}\right)\left[1+0{,}55\frac{H^2}{(H+P_1)^2}\right] \qquad (12.6)$$

ან რ. ჩუგაევის გამარტივებული ფორმულით:

$$m_0 = 0{,}402+0{,}054\frac{H}{P_1}\approx 0{,}4+0{,}55\frac{H}{P_1}, \qquad (12.7)$$

სადაც $H \geq 0{,}1$ მ და $P_1 > 0{,}5H$.

ხარჯის კოეფიციენტის მნიშვნელობა H/P_1 ფარდობის მიხედვით იცვლება 0,409÷0,497 ფარგლებში.

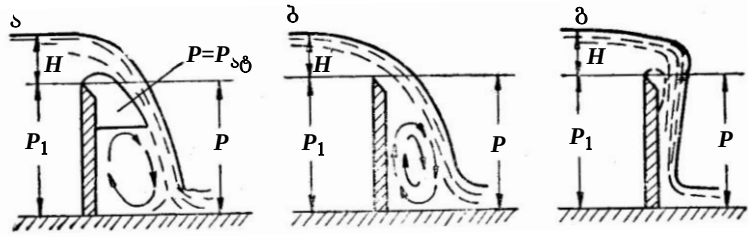
თუ განიხილება **წყალსაშვები გვერდითი კუმშვით,** მაშინ ხარჯის კოეფიციენტის მნიშვნელობა ($m_{გ}$) m_0-ზე ნაკლებია და გამოითვლება ფორმულით[1]:

$$m_{გ}=\left(0{,}405+\frac{0{,}003}{H}-0{,}003\frac{B-b}{B}\right)\left[1+0{,}55\left(\frac{H}{H+P_1}\right)^2\cdot\left(\frac{b}{B}\right)^2\right]. \qquad (12.8)$$

იმ შემთხვევაში, როდესაც ჭავლსა და წყალსაშვების კედელს შორის მოთავსებულ სივრცეში ჰაერი ვერ აღწევს, ჭავლის ქვემოთ წარმოიქმნება ვაკუუმი, რის შედეგადაც აღნიშნულ სივრცეში წყლის დონე მატულობს, ხოლო ჭავლი თანდათან გადაადგილდება წყალსაშვების კედლისაკენ. ასეთ ჭავლს **მოშვებულს** უწოდებენ. ამასთან, თუ $H/P < 0{,}4$, ჭავლი **მოშვებული, ქვემოდან**

[1] (12.6) და (12.8) ფორმულები მართებულია მეტრული ზომისათვის.

შეუტბორავია (ნახ. 12.8, ა); თუ $H/P \geq 0{,}4$, მაშინ სივრცე ჭავლის ქვემოთ მთლიანად ივსება წყლით და ჭავლი **მოშვებული, ქვემოდან შეტბორილია** (ნახ. 12.8, ბ). მცირე ხარჯების შემთხვევაში მიიღება მიკრული (მიწებებული) ჭავლი (ნახ. 12.8, გ), მოშვებული და მიკრული ჭავლები ნაკლებად არის შესწავლილი, რის გამოც გაანგარიშება, ჩვეულებრივ, ხდება ზემოთ განხილული თავისუფალი გადადინების შემთხვევისათვის.



ნახ. 12.8

2. **დატბორილი (დაძირული) წყალსაშვები** (ნახ. 12.6). ექსპერიმენტული გამოკვლევები გვიჩვენებს, რომ **თხელკედლიანი სწორკუთხა წყალსაშვები გვერდითი კუმშვის გარეშე დაძირულია,** თუ ერთდროულად დაცულია შემდეგი ორი პირობა:

ა) **ქვედა ბიეფში წყლის დონის ნიშნული წყალსაშვების ქიმის ნიშნულზე მეტია,** ე.ი.

$$h_ბ > P \quad \text{ანუ} \quad h_დ > 0, \tag{12.9}$$

სადაც $h_დ$ არის ე.წ. **წყალსაშვების დატბორვის (დაძირვის) სიმაღლე.** დაუძირავი წყალსაშვებისათვის $h_დ$ აითვლება ქიმიდან ქვემოთ და ვთვლით, რომ $h_დ < 0$ (ნახ. 12.1).

ბ) **ქვედა ბიეფში ნაკადი წყნარ მდგომარეობაშია.** თუ ეს პირობა დაცული არ არის, ე.ი. ქვედა ბიეფში უშუალოდ წყალსაშვების შემდეგ ნაკადი მძაფრ მდგომარეობაშია, მაშინ მიიღება ე.წ. **განდევნილი ნახტომი** (ნახ. 12.2, ა) და წყალსაშვები აღმოჩნდება დაუტბორავი, მიუხედავად იმისა, რომ შესრულებულია (12.9) პირობა.

თუ როგორ მდგომარეობაშია ნაკადი ქვედა ბიეფში, ვადგენთ ბიეფების შეუღლების გაანგარიშების საფუძველზე. კერძო შემთხვევაში, როდესაც ქვედა ბიეფში კალაპოტი სწორკუთხა ფორმისაა და ამასთან $b = B$, შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ ნაკადი წყნარ მდგომარეობაში იქნება, თუ

$$(Z/P) < (Z/P)_{კრ}, \tag{12.10}$$

სადაც Z/P არის ე.წ. ფარდობითი ვარდნილი, ხოლო $(z/P)_{კრ}$ მისი კრიტიკული მნიშვნელობა, რომელიც აიღება გრაფიკებიდან H/P სიდიდის მიხედვით. მიახლოებითი გაანგარიშებისათვის შეგვიძლია დავუშვათ, რომ $(z/P)_{კრ} = 0{,}70\ldots0{,}75$.

ამგვარად, თუ დაცულია (12.9) და (12.10) პირობები, თხელკედლიანი სწორკუთხა წყალსაშვები გვერდითი კუმშვის გარეშე დატბორილია (დაძირულია) და Q ხარჯი გამოითვლება ფორმულით:

$$Q = \sigma_დ m_0 \sqrt{2g} H^{3/2}, \qquad (12.11)$$

სადაც $\sigma_დ$ არის დატბორვის (დაძირვის) 1-ზე ნაკლები კოეფიციენტი, რომელიც შეიძლება გამოვთვალოთ ბაზენის ფორმულით:

$$\sigma_დ = 1{,}05\left(1 + 0{,}2\frac{h_დ}{P}\right)\sqrt[3]{\frac{Z}{H}}. \qquad (12.12)$$

3. **თხელკედლიანი წყალსაშვების გამოყენება ხარჯსაზომებად**. ხარჯის საანგარიშო ფორმულის მარტივი სახე და ხარჯის კოეფიციენტების განსაზღვრის საკმაოდ საიმედო მეთოდები საშუალებას იძლევა გამოვიყენოთ თხელკედლიანი წყალსაშვები ხარჯების გასაზომად. როგორც ექსპერიმენტული გამოკვლევები გვიჩვენებს, სწორკუთხა წყალსაშვებისათვის კარგი შედეგები მიიღება $H = 0{,}15\ldots1{,}25$ მ დაწნევის ფარგლებში. როცა $H \le 0{,}15$ მ, ფარდობითი ცდომილება დაწნევის გაზომვისას დიდია, რაც მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ხარჯის გამოთვლის სიზუსტეზე. ამასთან, მცირე დაწნევისას ხშირად წარმოიქმნება მიკრული ჭავლი, რომლისთვისაც ზემოთ მოყვანილი, დამოკიდებულებებით ხარჯის კოეფიციენტების მნიშვნელობათა გამოსათვლელად ვერ ვისარგებლებთ. ასეთ შემთხვევებში ხშირად გამოიყენება სამკუთხა წყალსაშვები (ნახ. 12.3, გ), რომელსაც **ტომსონის წყალსაშვებსაც** უწოდებენ. მასზე გადადინებული სითხის ხარჯის გამოსათვლელი ფორმულა მარტივი გარდაქმნების შედეგად ასეთ სახეს ღებულობს:

$$Q = m_0 tg\frac{\alpha}{2}\sqrt{2g}H^{5/2} = MH^{5/2},$$

სადაც α არის ჭრილის კუთხის სიდიდე; ჩვეულებრივ, $\alpha = 90°$-ს. ასეთი წყალსაშვებისათვის დაწნევის 0,05 მ-დან 0,25 მ-მდე ცვლილების ფარგლებში $M = m_0 tg\frac{\alpha}{2}\sqrt{2g} = 0{,}316\cdot\sqrt{2g} = 1{,}4$ მ$^{0{,}5}$/წმ. ამიტომ, სამკუთხა წყალსაშვების საანგარიშო ფორმულა ასე ჩაიწერება:

$$Q = 1{,}4H^{5/2}. \qquad (12.13)$$

ამ გამოსახულებაში H დაწნევა იზომება მ-ობით, ხოლო Q ხარჯი – მ^3/წმ-ობით.

როცა დაწნევა იცვლება 0,25 მ-დან 0,5 მ-მდე, მაშინ სამკუთხა წყალსაშვებისათვის სარგებლობენ ხ. კინგის ფორმულით:

$$Q = 1{,}343H^{2{,}47}. \qquad (12.14)$$

ხარჯის განსაზღვრის დიდი სიზუსტის გამო (ცდომილება არ აღემატება 1%-ს) თხელკედლიან სამკუთხა წყალსაშვებს ფართოდ იყენებენ ჰიდრავლიკურ ლაბორატორიებში.

შედარებით დიდი ხარჯების გასაზომად (მაგალითად, ირიგაციულ სისტემებში) სწორკუთხა წყალსაშვებთან ერთად გამოიყენება ტრაპეციული წყალსაშვებიც, რომელსაც **ჩიპოლეტის წყალსაშვებსაც** უწოდებენ (ნახ. 12.3, ბ). მის საანგარიშო ფორმულას, როცა $tg\alpha = 0{,}25$, აქვს შემდეგი სახე:

$$Q = 0{,}42b\sqrt{2g}H^{3/2} = 1{,}86bH^{3/2}. \qquad (12.15)$$

წყალსაშვების ჭრილის ქვედა ფუძის სიგანე არ უნდა იყოს სამმაგ დაწნევაზე ნაკლები, ე.ი. $b \geq 3H$.

(12.13), (12.14) და (12.15) გამოსახულებები მართებულია პირდაპირი დაუძირავი ვერტიკალურკედლიანი წყალსაშვებისათვის გვერდითი კუმშვის გარეშე და თავისუფლად გადადინებული ჭავლით.

§ 12.3. ფართოზღურბლიანი სწორკუთხა წყალსაშვები

1. **დაუტბორავი (დაუძირავი) წყალსაშვები** (ნახ. 12.2, გ). სითხის გადადინება ფართოზღურბლიან წყალსაშვებზე ხასიათდება ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ორი ვარდნილით: $z_ზ$ წარმოიქმნება ზღურბლის წინ, ხოლო $z_ქ$ – ზღურბლის ქვემოთ (გამოსასვლელ კვეთთან).

თავისუფალი ზედაპირის $z_ზ$ სიდიდით დაწევა ნაკადის ზღურბლზე შესვლისას განპირობებულია ცოცხალი კვეთის შემცირებით, რასაც თვით წყალსაშვების ზღურბლი იწვევს. ცოცხალი კვეთის შემცირებას მოჰყვება სიჩქარის და, მაშასადამე, კინეტიკური ენერგიის ზრდა პოტენციურის ხარჯზე. ეს, თავის მხრივ, იწვევს ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის მკვეთრად დაწევას. ამის გამო, ყოველთვის, უდაწნეო ნაკადის წყნარი დინებისას, ცოცხალი კვეთის შევიწროების ადგილებში ხდება სითხის დონის დაცემა.

მიუხედავად იმისა, რომ წყლის დონე ქვედა ბიეფში წყალსაშვების ზღურბლზე მაღალია ($h_ბ > P$), მაინც განსახილველ შემთხვევაში (ნახ. 12.2, გ) გვაქვს დაუტბორავი წყალსაშვები; ფართოზღურბლიანი წყალსაშვების დატბორვის პირობები განსხვავებულია თხელკედლიანი წყალსაშვების დატბორვის პირობებისაგან.

რადგან წყალსაშვების ზღურბლზე დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგს უგულებელყოფენ [თუ $(2\ldots4)H < \delta < (8\ldots10)H$], ამიტომ წყალსაშვის ფარგლებში სითხის თავისუფალ ზედაპირს მიიჩნევენ ჰორიზონტალურად და თვლიან, რომ $h_1 = h_2 = h = const$, სადაც h არის ნაკადის სიღრმე 1-1 და 2-2 კვეთებს შორის; ეს კვეთები გამოყოფს წყალსაშვების იმ უბანს, რომელზედაც მოძრაობა მდოვრედ ცვალებადია. δ_1 და δ_3 სიდიდეები, რომლებიც განსაზღვრავს 1-1 და 2-2 კვეთების მდებარეობას, ე.ი. ნაკადის მდოვრედ ცვალებადი მოძრაობის უბნის დასაწყისსა და ბოლოს, გამოითვლება შემდეგი ემპირიული დამოკიდებულებებით:

$$\delta_1 \approx 2H\ ;\ \ \delta_3 = 0 \div H\ . \qquad (12.16)$$

ფართოზღუბლიან სწორკუთხა წყალსაშვებზე გადადინებული წყლის ხარჯის სიდიდე გამოითვლება ფორმულით:

$$Q = \omega v = bhv = bh\varphi\sqrt{2g(H_0 - h)} = bh\varphi\sqrt{2g(Z_ბ)_0}\ . \qquad (12.17)$$

ამ გამოსახულებაში v არის საშუალო სიჩქარე ნაკადის მდოვრედ ცვალებადი უბნის ნებისმიერ კვეთში; $(Z_ბ)_0$ – სრული ზედა ვარდნილი მოსვლის სიჩქარის გათვალისწინებით

$$(Z_ბ)_0 = Z_ბ + \frac{\alpha v_0^2}{2g};$$

φ – სიჩქარის კოეფიციენტი. თუ დავუშვებთ, რომ $\alpha \approx 1$-ს, გვექნება:

$$\varphi = \sqrt{\frac{1}{1+\xi}}\ .$$

აქ ξ კოეფიციენტი ითვალისწინებს დაწნევის ადგილობრივ დანაკარგს (სიგრძეზე დაწნევის დანაკარგი უგულებელვყავით მისი სიმცირის გამო) ზღურბლის წიბოს გარსშემოდენაზე.

კუთრი ხარჯის გამოსათვლელ გამოსახულებას ასეთი სახე ექნება:

$$q = \frac{Q}{b} = \varphi h\sqrt{2g(H_0 - h)} = \varphi h\sqrt{2g(Z_ბ)_0}\ . \qquad (12.18)$$

ამგვარად, (12.17) ან (12.20) (12.18) ფორმულით ხარჯის გამოსათვლელად უნდა ვიცოდეთ h სიღრმე, რომელიც დამყარდება

წყალსაშვების ზღურბლზე მოცემული H_0 დაწნევისას. ის შეიძლება განისაზღვროს შემდეგი ფორმულით:

$$h = KH_0 , \qquad (12.19)$$

სადაც K კოეფიციენტი აიღება რ. ჩუგაევის მიერ რეკომენდებული ცხრილიდან:

m	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38
k	0,42	0,45	0,49	0,54	0,62

m ხარჯის კოეფიციენტი ა. ბერეზინსკის რეკომენდაციით გამოითვლება შემდეგი ფორმულებით:

მახვილწიბოიანი ზღურბლისათვის

$$m = 0,32 + 0,01\frac{3 - P/H}{0,46 - 0,75\,P/H} . \qquad (12.20)$$

მომრგვალებულწიბოიანი ზღურბლისათვის

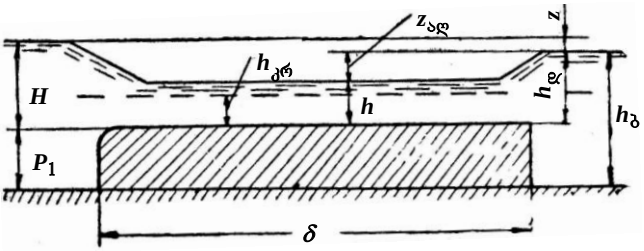
$$m = 0,36 + 0,01\frac{3 - P/H}{12 + 1,5\,P/H} . \qquad (12.21)$$

2. **დატბორილი (დაძირული) წყალსაშვები.** ცდები გვიჩვენებს, რომ წყალსაშვები შეიძლება ჩაითვალოს დატბორილად, თუ

$$h_{ქ} > nH_0 , \qquad (12.22)$$

სადაც n არის m ხარჯის კოეფიციენტზე დამოკიდებული სიდიდე, რომელიც იცვლება 0,75...0,87 ფარგლებში. მიახლოებითი გაანგარიშებისას მიიღება $n \approx 0,8$.

დაძირული წყალსაშვებზე ნაკადის დინების ხასიათი დამოკიდებულია ზღურბლზე შესვლის პირობებზე. მდოვრედ შესვლისა და მნიშვნელოვანი დაძირულობის შემთხვევაში ზღურბლზე წყლის თავისუფალი ზედაპირი თითქმის ჰორიზონტალურია, ხოლო გამოსასვლელ კვეთში შეიმჩნევა $z_{აღ}$ აღდგენის ვარდნილი (ნახ. 12.9).



ნახ. 12.9

დაძირვის სიღრმის კრიტიკული მნიშვნელობის გამოსათვლელად შეიძლება ვისარგებლოთ პ. კისელევის ფორმულით:

$$h_{ღ} = 1{,}25h_{კრ}. \qquad (12.23)$$

თუ $h_{ღ} > 1{,}25h_{კრ}$, ფართოზღურბლიანი წყალსაშვები იქნება დაძირული. ამ შემთხვევაში წყალსაშვების ხარჯი გამოითვლება ფორმულით:

$$Q = \varphi_{ღ} b h_1 \sqrt{2g(H_0 - h_1)}, \qquad (12.24)$$

სადაც

$$h_1 = h_{ღ} - z_{ად}. \qquad (12.25)$$

$\varphi_{ღ}$ სიჩქარის კოეფიციენტი აიღება დ. კუმინის მიერ შედგენილი ცხრილიდან:

m	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38
$\varphi_{ღ}$	0,77	0,84	0,90	0,96	0,99

ცხრილით სარგებლობისას საჭიროა წინასწარ დავადგინოთ m ხარჯის კოეფიციენტის მნიშვნელობა (12.20) ან (12.21) ფორმულით.

(12.25) გამოსახულებაში $z_{ად}$ ვარდნილს საზღვრავენ სპეციალური გრაფიკიდან, რომელიც აქ არ მოგვყავს. ამასთან, პირველი მიახლოებით ამ სიდიდეს ხშირად უგულებელყოფენ და მაშინ Q ხარჯის გამოსათვლელი ფორმულა ასეთ სახეს ღებულობს:

$$Q = \varphi_{ღ} b h_{ღ} \sqrt{2g(H_0 - h_{ღ})}. \qquad (12.26)$$

დასასრულ, შევნიშნავთ, რომ ზემოთ განვიხილეთ ფართოზღურბლიან წყალსაშვებზე წყლის გადინების შედარებით დამახასიათებელი შემთხვევა, როდესაც ზღურბლზე თითქმის პარალელურჭავლური (მდოვრედ ცვალებადი) მოძრაობა მყარდება. ამ დროს წყალსაშვების კედლის სისქე მოთავსებულია $(2\ldots4)H < \delta < (8\ldots10)H$ ფარგლებში.

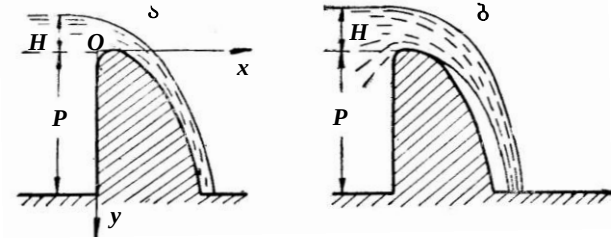
როცა $\delta \approx (2\ldots4)H$, მაშინ ნაკადის სიღრმე ზღურბლზე თანდათანობით მცირდება კრიტიკული სიღრმიდან (ზღურბლის დასაწყისში) მასზე გაცილებით ნაკლებ სიღრმემდე (გამოსასვლელ კვეთში). ამის გამო, ზღურბლზე ნაკადი მძაფრ მდგომარეობაშია, ხოლო თავისუფალ ზედაპირს აქვს დაცემის წირის სახე.

როცა $\delta > (8\ldots10)H$, მაშინ წყალსაშვების გამტარობის უნარი დამოკიდებული ხდება დაწნევის სიგრძეზე, დანაკარგის სიდიდეზე და წყალსაშვები შეიძლება განხილულ იქნეს, როგორც მოკლე არხი. ამ შემთხვევაში ზღურბლის დასაწყისში მყარდება კრიტიკულ სიღრმეზე ნაკლები შეკუმშული სიღრმე, შემდეგ ნაკადი ტალღური ნახტომის ფორმით გადადის წყნარ მდგომარეობაში.

ფართოზღურბლიანი წყალსაშვების საანგარიშო ფორმულები ფართოდ გამოიყენება კაშხლის ნახვრეტების, უდაწნეო და სადაწნეო საგზაო მილების და სხვა ნაგებობების ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას. ამ ნაგებობებს ხშირ შემთხვევაში არა აქვს ზღურბლი და, დაწნევა მათ წინ იქმნება კალაპოტის გვერდითი შევიწროების შედეგად. წყლის მოძრაობა ასეთ ნაგებობებში, ჰიდრავლიკური თვალსაზრისით, ნულოვანი სიმაღლის ფართოზღურბლიან წყალსაშვებზე მოძრაობის ანალოგიურია.

§ 12.4. პრაქტიკული პროფილის სწორკუთხა წყალსაშვები

მრუდწირული მოხაზულობის წყალსაშვები. საინჟინრო პრაქტიკაში შედარებით გავრცელებულია პრაქტიკული პროფილის მრუდწირული მოხაზულობის წყალსაშვები. ასეთი წყალსაშვები შეიძლება იყოს **უვაკუუმო და ვაკუუმიანი.** თუ პრაქტიკული პროფილის წყალსაშვების მოხაზულობა თანხვდება თხელკედლიან წყალსაშვებზე H_1 დაწნევით გადადინებული თავისუფალი ჭავლის ქვედა ზედაპირის მოხაზულობას, წყალსაშვებს **უვაკუუმოს** უწოდებენ (ნახ. 12.10, ა). პროფილის ასეთი წესით აგებისას ჭავლის ქვემოთ წყალგადასაშვებ ზედაპირზე წნევა ახლოს იქნება ატმოსფერულთან. თუ იმავე უვაკუუმო პროფილის წყალსაშვებზე დაწნევას H_1-დან H_2-მდე გავზრდით (ნახ. 12.10, ბ), მაშინ ჭავლი მოწყდება მას და წყალგასაშვებ ზედაპირსა და ჭავლის ქვედა ზედაპირს შორის წარმოიქმნება თავისუფალი სივრცე ატმოსფერულზე ნაკლები წნევით (ვაკუუმით). ასეთ პირობებში მომუშავე წყალსაშვებს **ვაკუუმიანს** უწოდებენ. მაშასადამე, ერთი და იგივე წყალსაშვები შეიძლება იყოს როგორც უვაკუუმო, ისე ვაკუუმიანი.



ნახ. 12.10

ჭავლის ქვემოთ ვაკუუმის არსებობა ზრდის წყალსაშვების გამტარობის უნარს, თუმცა ის რამდენადმე ადიდებს საანგარიშო დატვირთვას წყალსაშვებზე. ამ დროს ჭავლის გადადინების არა-

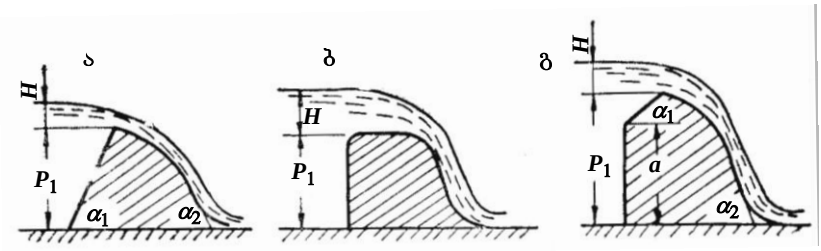
მდგრადი ხასიათი იწვევს წყალსაშვების ვიბრაციას და ბეტონის (სამოსის) კოროზიას. ამიტომ, წყალსაშვებიანი კაშხლების დაგეგმარებისას უპირატესობას უვაკუუმო პროფილებს ანიჭებენ.

თავისუფლად გადადინებული ჭავლის ფორმით აგებული **უვაკუუმო პროფილი** სხვა უვაკუუმო პროფილებისაგან განსხვავდება გამტარობის დიდი უნარით და, მაშასადამე, ხარჯის კოეფიციენტის დიდი მნიშვნელობით.

უვაკუუმო წყალსაშვების პროფილის (ნახ. 12.10, ა) ასაგებად სარგებლობენ კრიგერ-ოფიცეროვის x და y კოორდინატებით, რომლებიც მოცემულია ცხრილებში ერთეული დაწნევისათვის. კოორდინატთა ფაქტობრივი მნიშვნელობების (X; Y) გამოსათვლელად x და y სიდიდეები უნდა გავამრავლოთ ე.წ. საანგარიშო (მაპროფილებელ) $H_{საანგ}$ დაწნევაზე

$$X = xH_{საანგ}; \quad Y = yH_{საანგ}.$$

ხშირად კონსტრუქციულ მოსაზრებათა გამო, მრუდწირული მოხაზულობის წყალსაშვების პროფილს (ნახ. 10.12, ა) ცვლიან სხვა ფორმის პროფილით. მაგალითად, წყალსაშვს შეიძლება ჰქონდეს დახრილი სადაწნეო წახნაგი, თუ ის სუსტ გრუნტებზე იგება (ნახ. 12.12, ა) ან გაფართოებული თხემი (ნახ. 12.11, ბ), თუ საჭიროა მასზე ჰიდროტექნიკური საკეტის მოთავსება, ან 12.11, გ ნახაზზე ნაჩვენები ფორმა, თუ მოითხოვება მის თხემზე ხე-ტყის, ყინულის და სხვათა ტრანსპორტირება და ა.შ. წყალგადასაშვები ზედაპირის შეუღლება ქვედა ბიეფის ფსკერთან ხდება მრუდის საშუალებით, რომლის რადიუსი აიღება H-ის და P_1-ის მიხედვით საცნობარო ლიტერატურაში მოყვანილი ცხრილებიდან [3, გვ. 252].



ნახ. 12.11

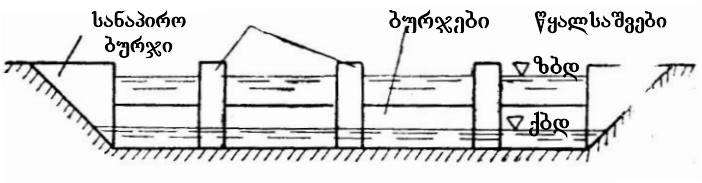
პრაქტიკული პროფილის მრუდწირული მოხაზულობის წყალსაშვებზე გადადინებული ხარჯი განისაზღვრება ფორმულით:

$$Q = \sigma_{დაწ}\sigma_{ვ}\varepsilon\sigma_{დ}mb\sqrt{2g}H_0^{\frac{3}{2}}, \qquad (12.27)$$

სადაც $\sigma_{\text{დაწ}}$ არის დაწნევის სისრულის კოეფიციენტი; $\sigma_{\text{ფ}}$ – წყალსაშვების ფორმის კოეფიციენტი; ε – გვერდითი კუმშვის კოეფიციენტი; $\sigma_{\text{დ}}$ – დატბორვის კოეფიციენტი; m – ხარჯის კოეფიციენტი.

დაწნევის სისრულის კოეფიციენტი $\sigma_{\text{დაწ}}$ ითვალისწინებს წყალსაშვებზე H დაწნევასა $H_{\text{საანგ}}$ დაწნევას შორის განსხვავებას, რომლითაც აგებულია წყალსაშვების პროფილი (წყალსაშვი, ცხადია, ყოველთვის საანგარიშო დაწნევაზე არ მუშაობს). როცა $H/H_{\text{საანგ}} = 0{,}2 \div 1$ (უვაკუუმო პროფილი), $\sigma_{\text{დაწ}} = 0{,}84 \div 1$; როცა $H/H_{\text{საანგ}} = 1 \div 2$ (ვაკუუმიანი პროფილი), $\sigma_{\text{დაწ}} = 1 \div 1{,}1$; როცა $H = H_{\text{საანგ}}$, $\sigma_{\text{დაწ}} = 1$.

წყალსაშვების ფორმის კოეფიციენტი ($\sigma_{\text{ფ}}$) ითვალისწინებს წყალსაშვების სათავის მოხაზულობასა (ნახ. 12.12) და კრიგერ-ოფიცეროვის პროფილს (ნახ. 12.10) შორის განსხვავებას. ამ კოეფიციენტის მნიშვნელობები იცვლება – $\sigma_{\text{ფ}} = 0{,}85 \div 1{,}0$ ფარგლებში.



ნახ. 12.12

გვერდითი კუმშვის კოეფიციენტი (ε), როცა $H_0/b < 1{,}0$ (ეს პირობა პრაქტიკაში თითქმის ყოველთვის დაცულია), შეიძლება განვსაზღვროთ შემდეგი ემპირიული ფორმულებით:

ა) წყალსაშვების ერთი ნახვრეტის (მალის) შემთხვევაში

$$\varepsilon = 1 - 0{,}2\xi_{\text{სბ}} \frac{H_0}{b}, \qquad (12.28)$$

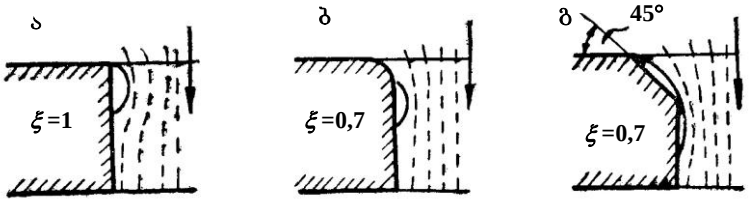
სადაც $\xi_{\text{სბ}}$ არის ე.წ. **შემცირების კოეფიციენტი,** რომელიც ითვალისწინებს სანაპირო ბურჯების ფორმას (ნახ. 12.12).

ბ) წყალსაშვების რამდენიმე ერთნაირი ნახვრეტის (მალის) შემთხვევაში, როცა ნახვრეტები ერთმანეთისაგან გამოყოფილია შუალედური ბურჯებით (ნახ. 12.12)

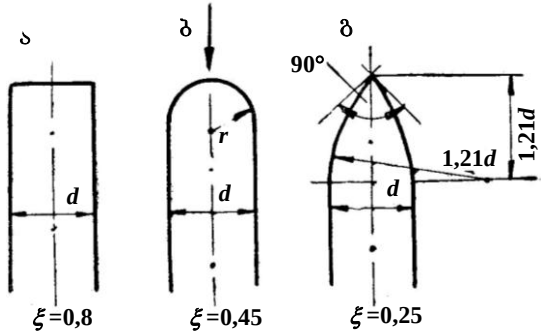
$$\varepsilon = 1 - 0{,}2\frac{\xi_{\text{სბ}} + (n-1)\xi_{\text{შბ}}}{n} \cdot \frac{H_0}{b}, \qquad (12.29)$$

სადაც n არის მალების რაოდენობა;

$\xi_{შგ}$ – შემცირების კოეფიციენტი, რომელიც გეგმაში ითვალისწინებს შუალედური ბურჯების მოხაზულობას (ნახ. 12.14).



ნახ. 12.13



ნახ. 12.14

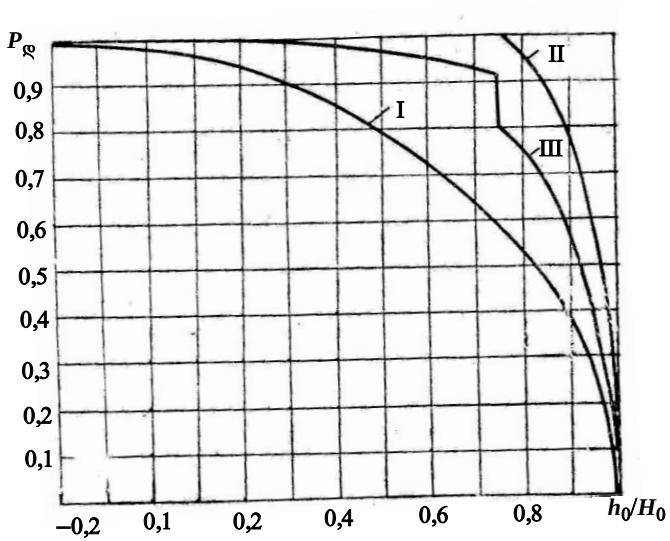
დატბორვის კოეფიციენტი ($\sigma_დ$) აიღება გრაფიკიდან $h_შ/H_0$ ფარდობის მიხედვით (ნახ. 12.15). ამასთან, გრაფიკზე II მრუდი შეესაბამება კრიგერ-ოფიცეროვის პროფილს, III მრუდი – პროფილს გაფართოებული თხემით (ნახ. 12.11, ბ). პრაქტიკული პროფილის წყალსაშვების დატბორვის პირობები ისეთივეა, როგორ თხელკედლიანი წყალსაშვების (იხ. ფორმულები 12.9 და 12.10).

ხარჯის კოეფიციენტი (12.27) $m = 0{,}48 \cdots 0{,}50$, შუალედშია.

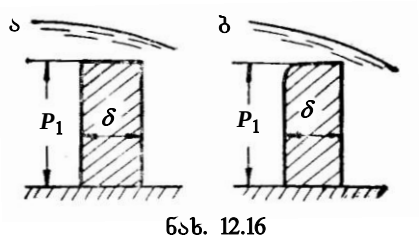
ვაკუუმიანი წყალსაშვების ხარჯის კოეფიციენტის მნიშვნელობები სათავისის ფორმის მიხედვით იცვლება $m = 0{,}54 \cdots 0{,}57$ ფარგლებში. ასეთი წყალსაშვების მოხაზულობა ისეთი უნდა იყოს, რომ ვაკუუმმეტრული სიმაღლემ არ გადააჭარბოს 6–7 მ-ს. ვაკუუმიანი წყალსაშვების დატბორვის კოეფიციენტის მნიშვნელობები აიღება გრაფიკიდან (ნახ. 12.15, I მრუდი).

პოლიგონური მოხაზულობის წყალსაშვები. ასეთი წყალსაშვები შეიძლება იყოს სწორკუთხა (ნახ. 12.16) ან ტრაპეციული (ნახ. 12.17) მოხაზულობის. მათი ზღურბლის სიგანე, როგორც

ზემოთ აღვნიშნეთ, მოთავსებულია $0{,}67H < \delta < (2\cdots4)H$ ფარგლებში.



ნახ. 12.15



ნახ. 12.16

პოლიგომური წყალსაშვების გაანგარიშება წარმოებს (12.27) ფორმულით. 12.16, ა ნახაზზე ნაჩვენები წყალსაშვისათვის ხარჯის კოეფიციენტი $m = 0{,}42$ -ს, ხოლო 12.16, ბ ნახაზზე ნაჩვენები წყალსაშვებისათვის – $m = 0{,}44$ -ს. ორივე პროფილისათვის დაწნევის სისრულის კოეფიციენტი გამოითვლება ფორმულით:

$$\sigma_{დაწ} = 0{,}7 + 0{,}185H/\delta\,. \qquad (12.30)$$

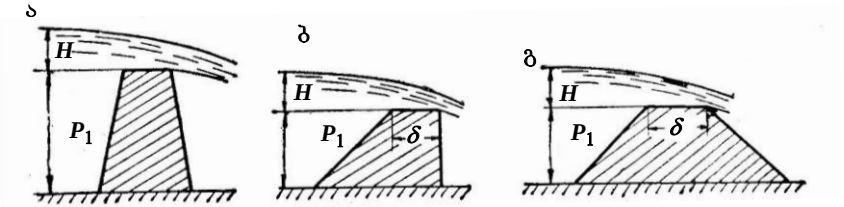
ფორმის კოეფიციენტი მეორე სქემისათვის შეიძლება განვსაზღვროთ შემდეგი ფორმულით:

$$\sigma_ფ = 1 + r/H\,, \qquad (12.31)$$

სადაც r არის შესასვლელი წიბოს მომრგვალების რადიუსი.

ხარჯის კოეფიციენტის მნიშვნელობები, წყალსაშვების ზედა (სადაწნეო) წახნაგის დახრის კუთხის გათვალისწინებით, მოცე-

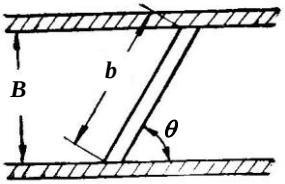
მულია საცნობარო ლიტერატურაში. იქვეა მოყვანილი ტრაპეციული პოლიგონური წყალსაშვების (ნახ. 12.17) ხარჯის კოეფიციენტიც.



ნახ. 12.17

§ 12.5. ირიბი და გვერდითი წყალსაშვები

თუ წყალსაშვების ვერტიკალური კედელი გეგმაში შეადგენს θ კუთხეს ნაკადის მიმართულებასთან, ასეთ წყალსაშვებს **ირიბს** უწოდებენ (ნახ. 12.18). როცა $\theta > 45°$-ზე, ხარჯის კოეფიციენტი ირიბი წყალსაშვებისათვის, გვერდითი კუმშვის გარეშე, არ განსხვავდება ნორმალური (სრულყოფილი) წყალსაშვების ხარჯის კოეფიციენტისაგან და შემასწორებელი კოეფიციენტი ირიბულობაზე ერთის ტოლია ($\varepsilon_{ირ} = 1$). გვერდითი კუმშვის არსებობისას ხარჯის განტოლებაში უნდა გავითვალისწინოთ $\varepsilon_{ირ}$ კოეფიციენტი



ნახ. 12.18

$$Q_{ირ} = \varepsilon_{ირ} mb\sqrt{2g}H_0^{3/2}, \qquad (12.32)$$

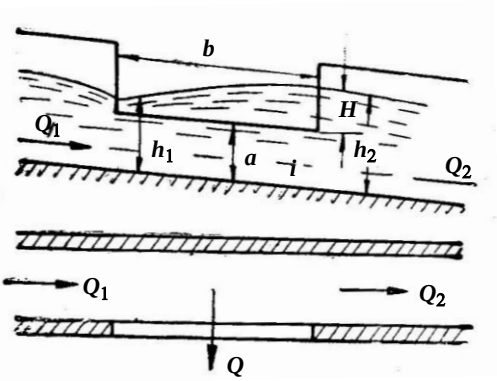
სადაც $\varepsilon_{ირ}$ მიახლოებით ტოლია:

θ°	15	30	45	60	90
$\varepsilon_{ირ}$	0,86	0,91	0,94	0,96	1,0

როდესაც $\theta = 0$, მაშინ გვაქვს გვერდითი წყალსაშვები (ნახ. 12.19), რომლისთვისაც ხარჯი გამოითვლება ფორმულით:

$$Q = \varepsilon_{ირ} mb\sqrt{2g}H_0^{3/2}, \qquad (12.33)$$

სადაც H არის დაწნევა წყალსაშვების ბოლოში, $H = h_2 - P_1$ (h_2 ნაკადის სიღრმეა წყალსაშვების ქვემოთ, ხოლო P_1 – ზღურბლის მდებარეობის სიმაღლე კალაპოტის ფსკერიდან); $\sigma_{შ} < 1$ – შემასწორებელი კოეფიციენტი.



ნახ. 12.19

ხ. ენგელსის გამოკვლევების საფუძველზე

$$\sigma_{ვ} = (H/b)^{1/6}. \qquad (12.34)$$

გვერდით წყალსაშვებზე გადიდებული ხარჯი შეიძლება გამოითვალოს ს. რუდნევის ფორმულითაც:

$$Q = mb\sqrt{2g}\,(h_{საშ} - P_1)^{3/2}, \qquad (12.35)$$

სადაც $h_{საშ} = \dfrac{h_1 + h_2}{2}$.

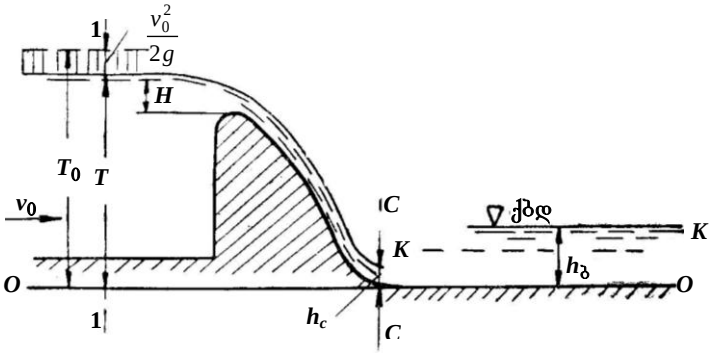
თავი XIII. ბიეფების შეუღლება და შესაუღლებელი ნაგებობები

§ 13.1. ზოგადი ცნობები. წყალსაშვებზე გადადინებული ჭავლის შეუღლება ქვედა ბიეფის ნაკადთან

წყალსაშვებზე გადადინებული ჭავლის შეუღლება ქვედა ბიეფის ნაკადთან შეიძლება სხვადასხვა ფორმით მოხდეს. ეს დამოკიდებულია იმაზე, თუ როგორ პირობებში იმყოფება ნაკადი ქვედა ბიეფში, როგორია მისი სიღრმე ($h_ბ$), ქვედა ბიეფში კალაპოტის ფსკერის ქანობი და ა.შ.

წყალსაშვების ქიმზე ან ზღურბლზე გადადინებული ჭავლის სისქე ნაგებობის წყალგადასაშვები ზედაპირის გასწვრივ თანდათანობით მცირდება და წყალსაცემთან მინიმალურ მნიშვნელობას აღწევს. კვეთს (*C-C*), რომელშიც ვარდნილი ნაკადის სიღრმე (h_c) უმცირესია, **შეკუმშული კვეთი** ეწოდება (ნახ. 13.1). h_c სიღრმე

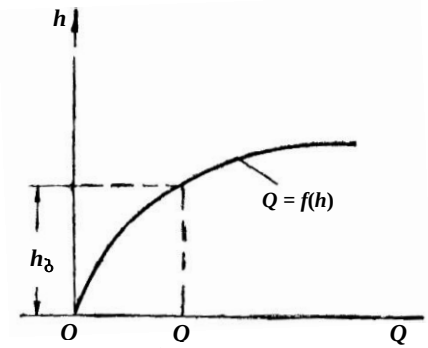
ყოველთვის ნაკლებია კრიტიკულ სიღრმეზე $h_c < h_{კრ}$. მაშასადამე, შეკუმშულ კვეთში ნაკადი მძაფრ მდგომარეობაშია და დიდი კინეტიკური ენერგია აქვს.



ნახ. 13.1

ქვედა ბიეფში ნაკადის სიღრმე ($h_ბ$) მოიძებნება $Q = f(h)$ ფუნქციის გრაფიკიდან (ნახ. 13.2), რომელიც წინასწარ აიგება ჰიდრომეტრიული მონაცემების საფუძველზე ან პრიზმული კალაპოტის შემთხვევაში – წყლის თანაბარი მოძრაობის განტოლებით.

ამგვარად, უნდა მოხდეს ნაკადების შეუღლება, რომელთა სიღრმეებია h_c და $h_ბ$. როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, შეუღლების ფორმები სხვადასხვაა და დამოკიდებულია ქვედა ბიეფში ნაკადისა და კალაპოტის გეომეტრიულ და ჰიდრავლიკურ მახასიათებლებზე. კერძოდ, თუ ქვედა ბიეფში კალაპოტის ფსკერის ქანობი კრიტიკულზე მეტია $(i > i_{კრ})$, ნაკადი ქვედა ბიეფში იმყოფება

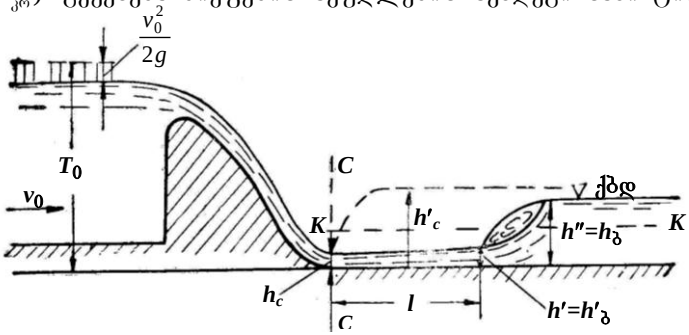


ნახ. 13.2

მძაფრ მდგომარეობაში და წყალსაშვებზე გადადინებული ჭავლის (რომელიც *C-C* კვეთში აგრეთვე მძაფრ მდგომარეობაშია) შეუღლება ქვედა ბიეფის ნაკადთან მოხდება ჰიდრავლიკური ნახტომის გარეშე შეტბორვის ან დაცემის მდოვრე წირის სახით.

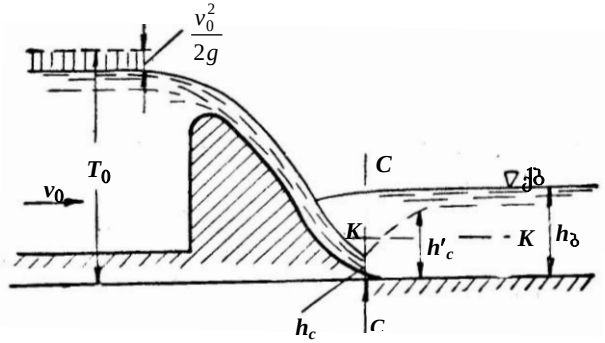
მაგრამ პრაქტიკაში, ჩვეულებრივ, გვხვდება შემთხვევა, როდესაც ქვედა ბიეფში კა-

ლაპოტის ფსკერის ქანობი კრიტიკულზე ნაკლებია ($i < i_{კრ}$) და, მაშასადამე, $h_ბ > h_{კრ}$, ე.ი. ნაკადი იმყოფება წყნარ მდგომარეობაში. როგორც ცნობილია, ნაკადის მძაფრიდან წყნარ მდგომარეობაში გადასვლა. რომლის დროსაც თავისუფალი ზედაპირი გადაკვეთს კრიტიკული სიღრმის შესაბამის *k-k* წირს, ხდება ჰიდრავლიკური ნახტომის ფორმით. ამიტომ, ნაკადების შეუღლებაც მოხდება ჰიდრავლიკური ნახტომით. კერძოდ, განსახილველ შემთხვევაში ($i < i_{კრ}$) გვექნება ბიეფების შეუღლების შემდეგი სამი ტიპი:



ნახ. 13.3.

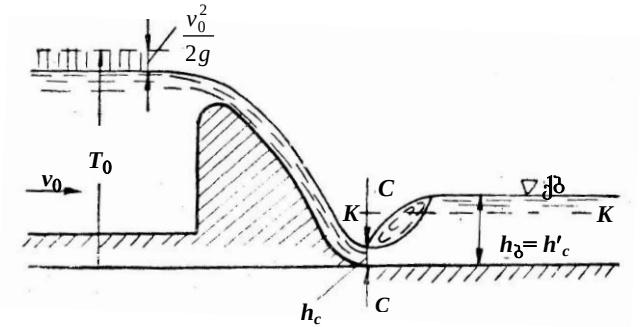
1) შეუღლება **განდევნილი ნახტომის** ფორმით (ნახ. 13.3). ამ შემთხვევაში ნახტომი მდებარეობს წყალსაშვიდან გარკვეულ ℓ მანძილზე, რომელსაც **ნახტომის განდევნის სიგრძეს** უწოდებენ. ამ მანძილზე ნაკადის თავისუფალი ზედაპირი არის c_1 ტიპის შეტბორვის წირი. ამ უბანზე ნაკადის სიღრმე h_c-დან h' სიღრმემდე იზრდება, რომელიც განდევნილი ნახტომის პირველი შეუღლებული სიღრმეა (მეორე შეუღლებული სიღრმე იქნება $h'' = h_ბ$).



ნახ. 13.4

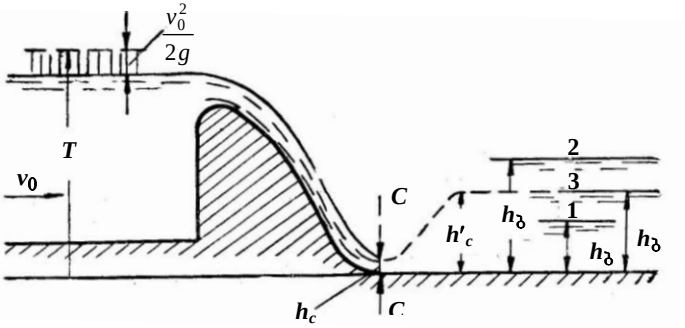
2) შეუღლება **დატბორილი (დაძირული) ნახტომის** ფორმით (ნახ. 13.4). ამ შემთხვევაში ქვედა ბიეფი დატბორავს ნახტომს.

3) შეუღლება **ნახტომის ზღვრული მდებარეობით** (ნახ. 13.5). ამ შემთხვევაში ქვედა ბიეფი ნახტომს არ დატბორავს, მაგრამ არც განდევნილი ნახტომი გვაქვს ($\ell = 0$).



ნახ. 13.5

ბიეფების შეუღლების ხასიათის განსაზღვრისას აუცილებელია, დავადგინოთ შეუღლების აღნიშნული სამი ტიპიდან რომელს აქვს ადგილი განსახილველ შემთხვევაში. ამისათვის *C-C* კვეთში წარმოვიდგინოთ ფიქტიური ნახტომი (13.6 ნახაზზე ის ნაჩვენებია პუნქტირით). განვსაზღვროთ h_c სიღრმე შეკუმშულ კვეთში (იხ. §13.2) და ჩავთვალოთ იგი ნახტომის პირველ შეუღლებულ სიღრმედ ($h_c = h'$). შემდეგ ჰიდრავლიკური ნახტომის ძირითადი განტოლებიდან განვსაზღვროთ ნახტომის მეორე შეუღლებული



ნახ. 13.6

$h'_c = h''$ სიღრმე. თუ აღმოჩნდა, რომ ქვედა ბიეფი არ დატბორავს ფიქტიურ ნახტომს, ე.ი. $h_ბ = h'_c$. მაშინ გვექნება განდევნილი

ნახტომი; თუ ქვედა ბიეფი დატბორავს ფიქტიურ ნახტომს, ე.ი. $h_ბ > h'_c$, მივიღებთ დატბორილ ნახტომს, ხოლო თუ $h_ბ = h'_c$, მაშინ გვექნება ნახტომის ზღვრული მდებარეობა (ფიქტიური ნახტომი ნამდვილ ნახტომად გადაიქცევა).

განდევნილი ნახტომის შემთხვევაში დამატებით უნდა დადგინდეს ნახტომის განდევნის ℓ სიგრძეც, რისთვისაც ვისარგებლებთ არათანაბარი მოძრაობის ძირითადი განტოლებებით.

§ 13.2. სიღრმის განსაზღვრა შეკუმშულ კვეთში

ბიეფების შეუღლების ხასიათი გარკვეული იქნება, თუ გვეცოდინება სიღრმეები ქვედა ბიეფსა ($h_ბ$) და შეკუმშულ კვეთში (h_c). $h_ბ$ სიღრმე, ჩვეულებრივ, ცნობილია (§ 13.1, ნახ. 13.2), ამიტომ გამოვიყვანოთ h_c სიდიდის გამოსათვლელი დამოკიდებულება. შევადგინოთ ბერნულის განტოლება 1-1 და *C-C* კვეთებისათვის ქვედა ბიეფის ფსკერის დონეზე გამავალი საფარდი სიბრტყის მიმართ (ნახ. 13.1):

$$H + P + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = T_0 = h_c + \frac{\alpha_c v_c^2}{2g} + h_{დან},$$

სადაც $h_{დან} = \sum \xi \frac{v_c^2}{2g}$ არის დაწნევის (კუთრი ენერგიის) დანაკარგების ჯამური სიდიდე წყალსაშვებზე გადადინებისას;

T_0 – სრული დაწნევა (კუთრი ენერგია) ზედა ბიეფში ქვედა ბიეფის მიმართ:

$$T_0 = P + H + \frac{\alpha v_0^2}{2g}. \qquad (13.1)$$

აღნიშნულის გათვალისწინებით

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{\alpha_c + \sum \xi}} \sqrt{2g(T_0 - h_c)} = \varphi \sqrt{2g(T_0 - h_c)},$$

სადაც $\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha_c + \sum \xi}}$ არის სიჩქარის კოეფიციენტი; $\varphi \approx 0{,}85 \div 0{,}95$.

თუ ჩავთვლით, რომ ქვედა ბიეფში კალაპოტი სწორკუთხა ფორმისაა (ე.ი. განვიხილავთ ბრტყელ ამოცანას), მაშინ კუთრი ხარჯი

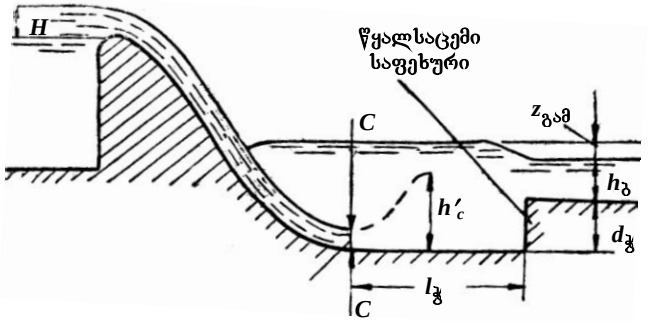
$$q = v_c h_c = \varphi h_c \sqrt{2g(T_0 - h_c)}, \qquad (13.2)$$

საიდანაც შერჩევით განვსაზღვრავთ შეკუმშულ კვეთში h_c სიღრმის მნიშვნელობას. იმის გამო, რომ განტოლების ამოხსნის თანამიმ-

დევრულ მიახლოებათა მეთოდისათვის დამახასიათებელია გამოთვლების სირთულე და შრომატევადობა, საცნობარო ლიტერატურაში მოყვანილია გრაფიკები და ცხრილები, რომლებიც გამოთვლის ტექნიკას ამარტივებს. ამასთან, განტოლების ამონახსნებიდან შევარჩევთ ისეთს, რომელიც დააკმაყოფილებს პირობას: $0 < h_c < h_{კრ}$.

§ 13.3. ენერგიის ჩაქრობა. წყალსაცემი ჭისა და კედლის გაანგარიშება

წყალსაშვებზე გადადინებული ჭავლის ქვედა ბიეფის ნაკადთან შეუღლების შესაძლო ფორმების განხილვისას აღვნიშნეთ, რომ გარკვეულ პირობებში ქვედა ბიეფში შეიძლება მივიღოთ ნაკადი განდევნილი ჰიდრავლიკური ნახტომით, რომელსაც დიდი დამანგრეველი ძალა აქვს და შეუძლია გამოიწვიოს კალაპოტის მნიშვნელოვანი წარეცხვა. მაშასადამე, ასეთ შემთხვევაში დგება საკითხი ქვედა ბიეფში ისეთი სპეციალური ნაგებობის მოწყობის შესახებ, რომლის საშუალებითაც შესაძლებელი გახდება ნაკადის ზედმეტი ენერგიის ჩაქრობა და საბოლოო ჯამში დატბორილი (დაძირული) ნახტომის (ნახ. 13.4) მიღება. ეს უკანასკნელი ეკონომიკური თვალსაზრისით, ბიეფების შეუღლების ყველაზე ხელსაყრელი ფორმაა. ამიტომ, ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა დაგეგმარებისას, ჩვეულებრივ, ცდილობენ შექმნან ისეთი პირობები, როდესაც ჭარბი ენერგიის ჩაქრობა მოხდება უშუალოდ ნაგებობის სიახლოვეს, რაც გამოიწვევს მთლიანად ნაგებობის გაბარიტების შემცირებას და, მაშასადამე, სამუშაოთა მოცულობის შემცირებასაც. ასეთი სპეციალური დანიშნულების ნაგებობებმა ჰიდროტექნიკაში მიიღეს **ენერგიის ჩამქრობ ნაგებობათა** სახელწოდება.

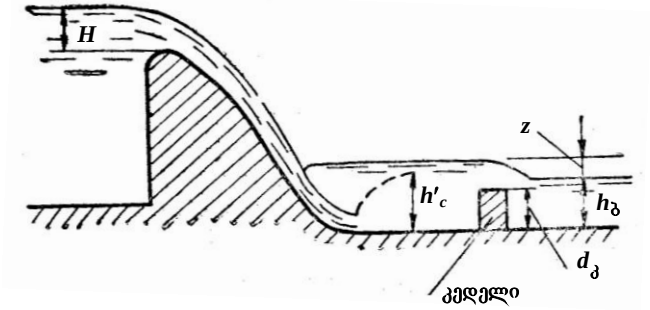


ნახ. 13.7

პრაქტიკაში ძირითადად გამოიყენება ენერგიის ჩამქრობ ნაგებობათა შემდეგი ტიპები:

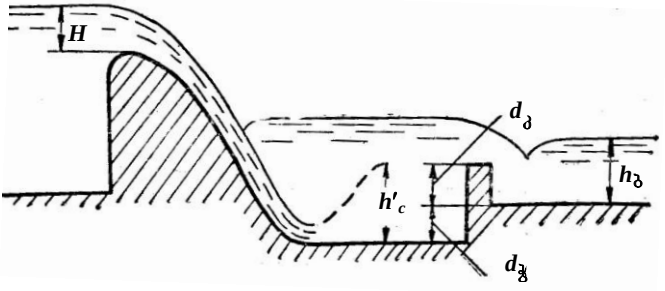
ა) **წყალსაცემი ჭა** (ნახ. 13.7). ქვედა ბიეფში უშუალოდ ნაგებობასთან ფსკერის ჩაღრმავებაა, რომლის მეშვეობით ხელოვნურად იზრდება სიღრმე;

ბ) **წყალსაცემი კედელი** (ნახ. 13.8). აქ სიღრმე ქვედა ბიეფში იზრდება სპეციალური კედლით შექმნილი დაწნევით;



ნახ. 13.8

გ) **კომბინირებული ტიპის წყალსაცემი ჭა** (ნახ. 13.9). ამ შემთხვევაში ნაკადის სიღრმე ქვედა ბიეფში იზრდება როგორც ფსკერის ჩაღრმავებით, ისე წყალსაცემი კედლით შექმნილი დაწნევით.



ნახ. 13.9

ჰიდროტექნიკურ პრაქტიკაში ზოგჯერ სარგებლობენ ენერგიის სპეციალური ტიპის ჩამქრობებითაც. კერძოდ, ქვედა ბიეფში აწყობენ სხვადასხვა ხელოვნურ წინაღობებს (მაგალითად, ბეტონის პირსებს), რომელთა გარსშემოდენის შედეგად იკარგება ნაკადის ჭარბი ენერგია. წყალსაცემი ჭისა და კედლისაგან

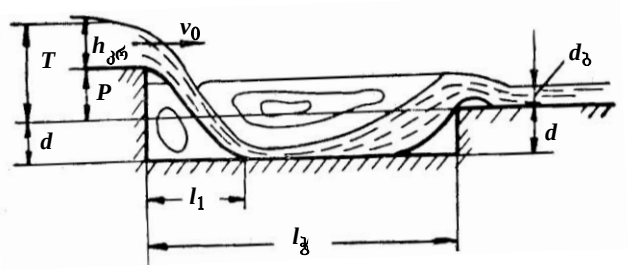
განსხვავებით ენერგიის სპეციალური ჩამქრობების ჰიდრავლიკური გაანგარიშება ვერ ხერხდება. მათი ზომების მოინიშნება ლაბორატორიაში ჩატარებული ცდების საფუძველზე.

1. **წყალსაცემი ჭის გაანგარიშება.** წყალსაცემი ჭის (ნახ. 13.10, ა) გაანგარიშება გულისხმობს მისი ისეთი სიღრმისა ($d_ჭ$) და სიგრძის ($ℓ_ჭ$) დადგენას, რომლებიც უზრუნველყოფს ჰიდრავლიკური ნახტომის დატბორვას.

თუ წყალსაცემ საფეხურზე $z_{გამოს}$ ვარდნილს უგულებელვყოფთ (ნახ. 13.7), მაშინ ჭის აუცილებელი d სიღრმე, რომლისთვისაც მიიღება დატბორილი ნახტომი, უნდა აკმაყოფილებდეს პირობას: $d_ჭ + h_ბ > h'_c$. ამის გათვალისწინებით ჯერ ვპოულობთ ე.წ. ჭის თეორიულ სიღრმეს (d_0), რომლისთვისაც ნახტომი მიიღება შეკუმშულ C-C კვეთში და დაცული იქნება $d_0 + h_ბ = h'_c$ პირობა, ხოლო შემდეგ d_0-ის საშუალებით განვსაზღვრავთ ჭის პრაქტიკულ სიღრმეს (d), რომელიც პასუხობს დატბორილ ნახტომს

$$d_ჭ = \sigma d_0 , \tag{13.3}$$

სადაც $\sigma = 1{,}05 \cdots 1{,}10$ არის მარაგის კოეფიციენტი, რომელიც უზრუნველყოფს ნახტომის „დატბორვის აუცილებელ ხარისხს“.



ნახ. 13.10

მაშასადამე, რომ განვსაზღვროთ წყალსაცემი ჭის სიღრმე, საჭიროა, ვიცოდეთ მისი თეორიული სიღრმე (d_0). ამ უკანასკნელის გამოსათვლელად ვისარგებლოთ 13.10, ა ნახაზზე მოცემული სქემით. როგორც ვხედავთ, ჭის მოწყობით იზრდება წყალსაშვებზე გადადინებული ჭავლის ვარდნის სიმაღლე; ასევე იზრდება დაწნევა 1-1 კვეთში ჭის ფსკერის დონეზე გატარებული სიბრტყის მიმართ $T'_0 = T_0 + d_0$ სიდიდემდე, რაც, თავის მხრივ, შეკუმშულ

კვეთში h_c სიღრმის შემცირებას იწვევს. თუ ჩავთვლით, რომ h_c პირველი შეუღლებული სიღრმეა, მაშინ მისი შემცირებით უნდა გაიზარდოს h_c' მეორე შეუღლებული სიღრმე.

იმის გამო, რომ h_c' სიდიდე თვითონ არის d_0-ზე დამოკიდებული, ამოცანა ამოიხსნება თანამიმდევრულ მიახლოებათა მეთოდით. კერძოდ, ვუშვებთ d_0-ის რაიმე მნიშვნელობას და ვპოულობთ $T_0' = T_0 + d$ სიდიდეს. ამ უკანასკნელით (11.2) გამოსახულებიდან განვსაზღვრავთ h_c-ს, ხოლო ჰიდრავლიკური ნახტომის ძირითადი განტოლებიდან – მის შეუღლებულ h_c' სიღრმეს. h_c'-ს მიღებულ მნიშვნელობას შევადარებთ ქვედა ბიეფის ახალ $(d_0 + h_ბ)$ სიღრმეს. იმ შემთხვევაში, თუ $h_c' \neq d_0 + h_ბ$, ავიღებთ d_0-ის სხვა მნიშვნელობას და გამოთვლებს გავიმეორებთ. გაანგარიშების შედეგები შეგვაქვს ცხრილში:

d_0	$T_0' = T_0 + d_0$	h_c	h_c'	$d_0 + h_ბ$
…	…	…	…	…

ცხრილის მონაცემების საფუძველზე ავაგებთ გრაფიკს (ნახ. 13.10, ბ), რომლის ჰორიზონტალურ ღერძზე გადავზომავთ d_0-ის მნიშვნელობებს (ცხრილის 1-ლი სვეტი), ხოლო ვერტიკალურზე – h_c'-ს მნიშვნელობებს (ცხრილის მე-4 სვეტი), მივიღებთ $h_c' = f_1(d_0)$ ფუნქციის შესაბამის წირს. ამავე ვერტიკალურ ღერძზე გადავზომავთ აგრეთვე $(d_0 + h_ბ)$ სიდიდეებსაც (ცხრილის მე-5 სვეტი), რის შედეგადაც მივიღებთ $d_0 + h_ბ = f_2(d_0)$ ფუნქციის შესაბამის წრფეს. ცხადია, $h_c' = f_1(d_0)$ წირისა და $d_0 + h_ბ = f_2(d_0)$ წრფის გადაკვეთის წერტილს შეესაბამება d_0-ის საძიებელი მნიშვნელობა. შემდეგ (13.3) გამოსახულებიდან ვიპოვოთ წყალსაცემი ჭის სიღრმეს.

რაც შეეხება წყალსაცემი ჭის სიგრძეს, ის **პრაქტიკული პროფილის მრუდწირული მოსახაზულობის წყალსაშვებისათვის** შეიძლება გამოვთვალოთ ფორმულით:

$$\ell_ჭ = (0{,}7 \ldots 0{,}8)\ell_{ნახ}, \qquad (13.4)$$

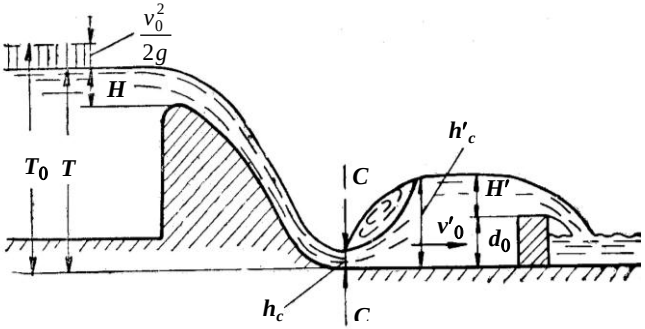
სადაც $\ell_{ნახ}$ არის ჰიდრავლიკური ნახტომის სიგრძე. $\ell_{ნახ}$ განისაზღვრება 8.4 პარაგრაფში მოყვანილი ფორმულებით იმის გათვალისწინებით, რომ $h = h_c$-ს და $h'' = h'$-ს.

$$\ell_{ჭ} = \ell_1 + (0{,}7\ldots0{,}8)\ell_{ნახ}\,, \qquad (13.5)$$

სადაც ℓ_1 არის ჭავლის გატყორცნის მანძილი:

$$\ell_1 = v_0\sqrt{\frac{2P + h_{კრ}}{g}}\,. \qquad (13.6)$$

2. **წყალსაცემი კედლის გაანგარიშება**. წყალსაცემი კედლის მოწყობისას ქვედა ბიეფის ფსკერის ჩაღრმავება არ ხდება (ნახ. 13.11). ამის გამო, ჭავლის ვარდნის სიმაღლე არ იცვლება და, მაშასადამე, h_c და h'_c სიღრმეებიც მუდმივი რჩება. ამიტომ, კედლის თეორიული სიმაღლის განსაზღვრის ამოცანა, როდესაც ნახტომი მდებარეობს შეკუმშულ კვეთში, წყდება შერჩევის მეთოდის გამოყენების გარეშე, თუ თვითონ კედელი მუშაობს, როგორც დაუტბორავი წყალსაშვები. მოგვყავს წყალსაცემი კედლის გაანგარიშების თანამიმდევრობა.



ნახ. 13.11

T_0-ის საშუალებით (13.2) ფორმულიდან განვსაზღვრავთ h_c-ს, ხოლო ჰიდრავლიკური ნახტომის ძირითადი განტოლებიდან – მის შეუღლებულ h'_c სიღრმეს. $v'_0 = g/h'_c = Q/bh'_c$ ფორმულით ვიპოვით წყალსაცემ კედელთან მოსვლის სიჩქარეს. ამის შემდეგ წყალსაშვების ფორმულიდან

$$q = m'\sqrt{2g}\left(H'_0\right)^{3/2}.$$

გამოვთვლით სრულ დაწნევას წყალსაცემ კედელზე

$$H'_0 = \left(\frac{q}{m'\sqrt{2g}}\right)^{3/2},$$

სადაც m' არის წყალსაცემი კედლის ხარჯის კოეფიციენტი $(m' = 0{,}41\cdots 0{,}44)$.

H_0'-ის მიხედვით ვიპოვით გეომეტრიულ დაწნევას

$$H' = H_0' - \frac{(v_0')^2}{2g}.$$

ამ უკანასკნელის საშუალებით წყალსაცემი კედლის თეორიულ სიმაღლეს:

$$d_0 = h_c' - H'. \tag{13.7}$$

კედლის პრაქტიკული სიმაღლე, რომელიც განაპირობებს ნახტომის დატბორვას, ტოლი იქნება:

$$d_პ = \alpha d_0 = (1{,}05\cdots 1{,}10)d_0. \tag{13.8}$$

წყალსაცემი კედლის გაანგარიშებისას ყოველთვის უნდა შევამოწმოთ, როგორია ნაკადების შეუღლება კედლის შემდეგ. თუ კედლის შემდეგ წამოწეული (დატბორილი) ნახტომია, მაშინ გაანგარიშება დამთავრებულია; თუ აღმოჩნდა, რომ წარმოიქმნება განდევნილი ნახტომი, მაშინ საჭირო ხდება პირველი კედლის შემდეგ შედარებით ნაკლები სიმაღლის მეორე წყალსაცემი კედლის მოწყობა. ზოგ შემთხვევაში, შეიძლება საჭირო შეიქმნას მესამე წყალსაცემი კედლის გაანგარიშებაც.

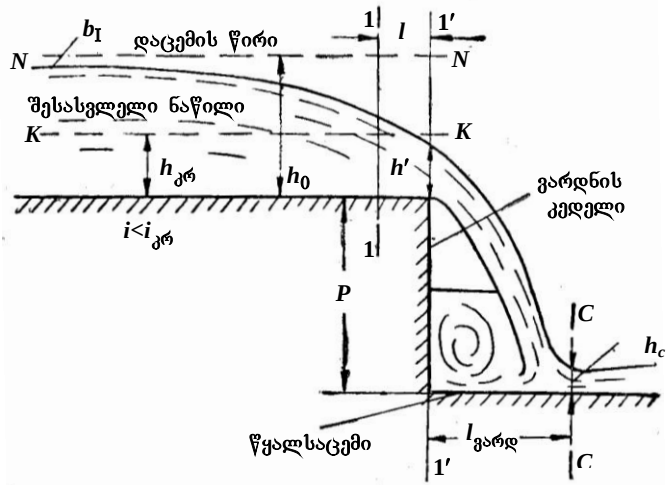
მანძილი შეკუმშული კვეთიდან წყალსაცემ კედლამდე განისაზღვრება (13.4) ან (13.5) ფორმულებით.

§ 13.4. ერთსაფეხურიანი ვარდნილის გაანგარიშება

ჰიდროტექნიკური მშენებლობის პრაქტიკაში ფართოდ გამოიყენება ვარდნილები სხვადასხვა დონეზე (ნიშნულზე) მყოფი ნაკადების ცალკეული უბნების შესაუღლებლად. იმის მიხედვით, თუ როგორია ზედა და ქვედა ბიეფებს შორის სხვაობა, აწყობენ ერთსაფეხურიან (ნახ. 13.12) და მრავალსაფეხურიან (ნახ. 13.13) ვარდნილებს.

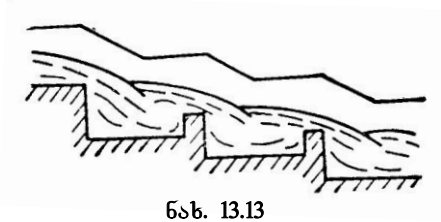
ერთსაფეხურიანი ვარდნილი შედგება **შესასვლელი ნაწილის,** ვერტიკალური (ზოგ შემთხვევაში, დახრილი ან მრუდწირული) **ვარდნის კედლისა** და მასთან მიმდებარე ქვედა ბიეფის საწყისი უბნისაგან ანუ **წყალსაცემისაგან** (ნახ. 13.12).

ვარდნილის **შესასვლელი ნაწილი,** უმეტეს შემთხვევაში მუშაობს, როგორც ფართოზღურბლიანი ან პრაქტიკული პროფილის დაუტბორავი წყალსაშვები. ზღურბლი შეიძლება იყოს მიმყვანი არხის ნიშნულზე, $P_1 = 0$ (ნახ. 13.12) რამდენადმე შემაღ-



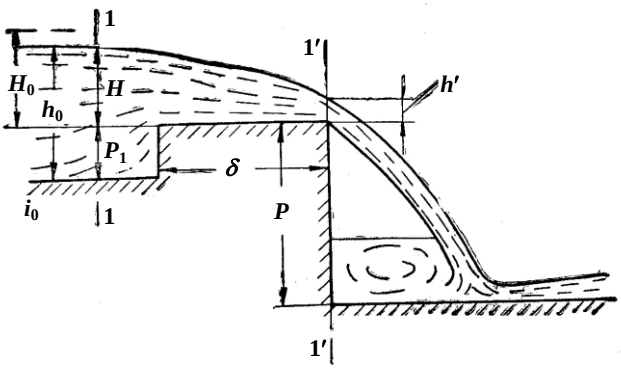
ნახ. 13.12

ლებული, $P_1 \neq 0$ (ნახ. 13.14). როცა $P_1 = 0$-ს და ნაკადი არ განიცდის გვერდით კუმშვას, მაშინ შესასვლელ ნაწილზე მყარდება მოძრაობა b_I ტიპის დაცემის წირით (ნახ. 13.12), ხოლო როცა $P_1 = 0$-ს, მაგრამ ნაკადი განიცდის გვერდით კუმშვას, მაშინ შესასვლელ ნაწილზე მოძრაობას ექნება



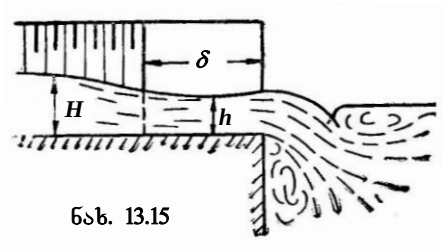
ნახ. 13.13

13.15 ნახაზზე მოცემული სახე.



ნახ. 13.14

ერთსაფეხურიანი ვარდნილის შესასვლელი ნაწილის ჰიდრავლიკური გაანგარიშება გულისხმობს მისი სიგანის განსაზღვრას ან H დაწნევის სიდიდის დადგენას წყალსაშვების საანგარიშო ფორმულების საფუძველზე.



ნახ. 13.15

შესასვლელი ნაწილის სიგანის შერჩევისას ყურადღება უნდა მიექცეს ვარდნილის წინ არხში შეტბორვის ან დაცემის წირის წარმოქმნის შესაძლებლობას. თუ არხში გაედინება მუდმივი Q ხარჯი მუდმივი h_0 ნორმალური სიღრმით, მაშინ ყოველთვის შეგვიძლია შევარჩიოთ ვარდ-ნილის შესასვლელი ნაწი-ლის ისეთი სიგანე, რომლისთვისაც არხში მოძრაობა იქნება თანაბარი (ე.ი. არ წარმოიქმნება არც შეტბორვის და არც დაცემის წირი). ამ შემთხვევისათვის, ვარდნილის სიგანის დადგენისას დაწნევა წყალსაშვებზე იქნება:

$$H = h_0 - P_1 . \qquad (13.9)$$

მაგრამ, როგორც წესი, ხარჯი მიმყვან არხში დროზე დამოკიდებული სიდიდეა და იცვლება $Q_{მინ}$-დან $Q_{მაქს}$-მდე, რომლის ფარგლებში მოთავსებულია Q საანგარიშო ხარჯი.

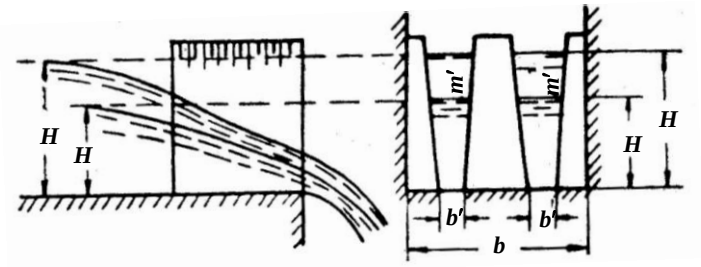
$Q = f(H)$ და $Q = f(h_0)$ დამოკიდებულებათა ცვლილების კანონზომიერება სხვადასხვაა. ამიტომ, საანგარიშოსაგან განსხვავებული ხარჯებისათვის მიმყვან არხში გვექნება არათანაბარი მოძრაობის რეჟიმი. კერძოდ, ხარჯისათვის, რომელიც ნაკლებია (13.9) ფორმულით გამოთვლილ H დაწნევის შესაბამის ხარჯზე, მიიღება დაცემის წირი, ხოლო პირიქით შემთხვევაში – შეტბორვის წირი.

არათანაბარი მოძრაობის რეჟიმი შეიძლება არასასურველი აღმოჩნდეს არხისათვის. $H < h_0 - P_1$ შემთხვევაში სიჩქარეები გაიზრდება და არხი შეიძლება წაირეცხოს, $H > h_0 - P_1$ შემთხვევაში კი – მოსალოდნელია არხის დალამვა. აღნიშნულის გამო, მიმყვან არხში თანაბარი მოძრაობის რეჟიმის შესანარჩუნებლად, ხშირად ეწყობა შემაღლებული ზღურბლი ან გამოიყენება ტრაპეციული ფორმის **ხვრელისებრი წყალსაშვები** (ნახ. 13.16). ეს უკანასკნელი ავტომატურად არეგულირებს მიმყვან არხში მოძრაობის თანაბარ რეჟიმს ხარჯის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის. ჰიდროტექნიკური მშენებლობის პრაქტიკიდან მიღებული

გამოცდილების საფუძველზე დადგენილია, რომ წყალსაშვების წინ თანაბარი მოძრაობის რეჟიმის შექმნა მიზანშეწონილია არა ზღვრული ხარჯებისათვის, არამედ $Q_1 < Q_{მაქ}$ და $Q_2 > Q_{მაქ}$ მნიშვნელობებისათვის. ე.ი. Q საანგარიშო ხარჯი ერთდროულად ნაკლები უნდა იყოს Q_1-ზე და მეტი Q_2-ზე. Q_1 და Q_2 ხარჯების შესაბამის ნორმალურ სიღრმეებს გამოითვლიან ფორმულებით:

$$\left.\begin{aligned} h_{01} &= h_{0მაქს} - 0{,}25(h_{0მაქს} - h_{0მინ});\\ h_{02} &= h_{0მინ} + 0{,}25(h_{0მაქს} - h_{0მინ}), \end{aligned}\right\} \qquad (13.10)$$

სადაც $h_{0მაქ}$ და $h_{0მინ}$ არის $Q_{მაქს}$ და $Q_{მინ}$ ხარჯების შესაბამისი ნორმალური სიღრმეები.



ნახ. 13.16

გამოვსახოთ ხარჯი H დაწნევითა და წყალსაშვების ტრაპეციული ხვრელის $b'_{საშ}$ სიგანით

$$Q = m_0 b'_{საშ}\sqrt{2g}H^{3/2} = M_1 b'_{საშ}H^{3/2}, \qquad (13.11)$$

სადაც

$$M = m_0\sqrt{2g},$$

ხოლო

$$b'_{საშ} = b' + 0{,}8m'H. \qquad (13.12)$$

აქ m' არის ფერდოს კოეფიციენტი წყალსაშვების ნახვრეტში; b' ხვრელის სიგანე ფუძეში. Q_1 და Q_2 ხარჯებისათვის გვექნება:

$$\left.\begin{aligned} Q_1 &= M_1 b'_{საშ.1}H_1^{3/2} = M_1(b' + 0{,}8m'H_1)H_1^{3/2};\\ Q_2 &= M_1 b'_{საშ.2}H_2^{3/2} = M_1(b' + 0{,}8m'H_2)H_2^{3/2}. \end{aligned}\right\} \qquad (13.13)$$

ამ სისტემის ამოხსნით ვიპოვით ტრაპეციული (ხვრელისებრი) წყალსაშვების ზომებს, როდესაც Q_1 და Q_2 ხარჯებისა და შესაბამისი H_1 და H_2 დაწნევებისათვის მოძრაობა მიმყვან არხში თანაბარი იქნება:

$$b' = \frac{H_1 b'_{\text{საშ}.2} - H_2 b'_{\text{საშ}.1}}{H_1 - H_2}; \qquad (13.14)$$

$$m' = 1{,}25\frac{b'_{\text{საშ}.1} - b'_{\text{საშ}.2}}{H_1 - H_2}, \qquad (13.15)$$

სადაც

$$\left.\begin{aligned} b'_{\text{საშ}.1} &= \frac{Q_1}{MH_1^{3/2}}; \quad & b'_{\text{საშ}.2} &= \frac{Q_2}{MH_2^{3/2}}; \\ H_1 &= h_{01} - P_1; & H_2 &= h_{02} - P_1. \end{aligned}\right\} \qquad (13.16)$$

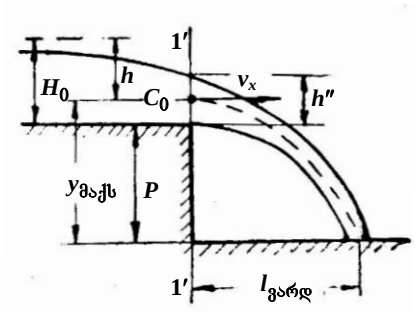
ჩვეულებრივ, ხვრელისებრ წყალსაშვებს აწყობენ რამდენიმე ერთნაირი ხვრელის სახით, რომელთაგან თითოეული ატარებს საერთო ხარჯის ნაწილს (ნახ. 13.16). წყალსაშვების ხვრელების რიცხვი გამოითვლება ფორმულით:

$$n = \frac{b}{(1{,}2\cdots 1{,}5)h_{\text{მაქს}}}, \qquad (13.17)$$

სადაც b არის მიმყვანი არხის სიგანე.

ხვრელის ზომები ამ შემთხვევაში განისაზღვრება ერთ ხვრელში გამავალი Q/n ხარჯისათვის.

ვარდნილის წყალსაცემი ნაწილი ნაგებობის მნიშვნელოვანი ელემენტია, რადგან ძირითადად მის ფარგლებში ხდება ნაკადის ენერგიის ჩაქრობა. წყალსაცემის ჰიდრავლიკური გაანგარიშება გულისხმობს ჭავლის ქვედა ბიეფთან შეუღლების ხასიათის დადგენას და ისეთ ღონისძიებათა განხორციელებას, რომლებიც უზრუნველყოფს შეუღლებას წამოწეული ნახტომის ფორმით, რადგანაც ამ დროს წყალსაცემი ნაწილის სიგრძე იქნება მინიმალური. ჭავლის წყალსაცემზე ვარდნისას შეკუმშულ C-C კვეთში (ნახ. 13.8) h_c სიღრმე შეიძლება გამოვთვალოთ (13.2) ფორმულით, ხოლო ჰიდრავლიკური ნახტომის ძირითადი განტოლებით – მისი შეუღლებული h'_c სიღრმე. გამყვან არხში, როგორც წესი, $h_ბ$ სიღრმე ცნობილია. ამ სიღრმეების შედარება საშუალებას გვაძლევს დავადგინოთ ბიეფების შეუღლების ხასიათი. კერძოდ, თუ აღმოჩნდა, რომ $h'_c > h_ბ$, ე.ი. ნახტომი განდევნილია, მაშინ



ნახ. 13.17

წყალსაცემ ნაწილს აწყობენ წყალსაცემი ჭის ან კედლის სახით. ასეთ შემთხვევაში ენერგიის ჩამქრობი ნაგებობის (წყალსაცემი ჭის) სიგრძეს განსაზღვრავენ ჭავლის ვარდნის მანძილისა და ნახტომის სიგრძის საშუალებით:

$$\ell_{ჭ} = \ell_{ვარდ} + 3h'_c . \qquad (13.18)$$

$\ell_{ვარდ}$ მანძილის გასაგებად განვიხილოთ 1′-1′ კვეთის (ნახ. 13.18) C_0 სიმძიმის ცენტრში მყოფი სითხის ნაწილაკის თავისუფალი ვარდნა. ცხადია, ეს ნაწილაკი t დროის განმავლობაში ჰორიზონტალური და ვერტიკალური მიმართულებით გაივლის მანძილებს:

$$x = v_x t ; \quad y = \frac{dt^2}{2} .$$

თუ ამ განტოლებებიდან t პარამეტრს გამოვრიცხავთ, მივიღებთ სითხის ნაწილაკის მოძრაობის ტრაექტორიის განტოლებას:

$$x = \varphi\sqrt{2gh}\sqrt{\frac{2y}{g}} = 2\varphi\sqrt{hy} , \qquad (13.19)$$

სადაც h არის სრული დაწნევა C_0 წერტილზე გამავალი ჰორიზონტალური სიბრტყის მიმართ;

$$v_x = \varphi\sqrt{2gh} .$$

ჭავლის ვარდნის მანძილს ავითვლით 1′-1′ კვეთიდან. მაშინ უზღურბლო ვარდნილისათვის

$$\ell_{ვარდ} = 2\varphi\sqrt{hy_{მაქს}} . \qquad (13.20)$$

თუ ვარდნილის შესასვლელ ნაწილზე მოწყობილია ფართოზღურბლიანი წყალსაშვები (ნახ. 13.15), მაშინ

$$\ell_{ვარდ} = 2\varphi\sqrt{\left(H_0 - \frac{1}{2}h'\right)\left(P + \frac{1}{2}h'\right)} , \qquad (13.21)$$

სადაც h' არის ნაკადის სიღრმე ვარდნის კედლის წიბოზე და გამოითვლება ფორმულით:

$$h' = \left[1 - \left(1 - \frac{3}{2}\frac{m}{\varphi}\right)^{2/3}\right] H_0 . \qquad (13.22)$$

ამ გამოსახულებაში წინასწარი გაანგარიშებისას შეიძლება მივიღოთ, რომ $\varphi = 1$, $m = 0{,}385$. მაშინ $h' \approx 0{,}44H_0$ და

$$\ell_{ვარდ} = 1{,}75\sqrt{H_0(P + 0{,}22H_0)} . \qquad (13.21′)$$

პრაქტიკულად პროფილის წყალსაშვებისათვის (ნახ. 13.18), თუ

დავუშვებთ, რომ $h' = 0,h4H_0$; $\varphi \approx 1$ და $\ell_0 = 0,3H_0$ (ნ. პავლოვსკის მონაცემების თანახმად), გვექნება:

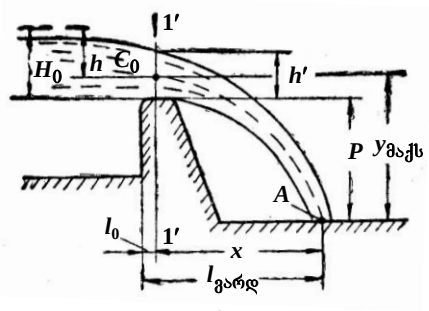
$$h = H_0 - \frac{1}{2}h' = 0,68H_0;$$

$$y_{მაქს} = P + \frac{1}{2}h' = P + 0,32H_0.$$

ამიტომ

$$\ell_{ვარდ} = l_0 + 2\varphi\sqrt{hy_{მაქს}} = 0,3H_0 + 1,65\sqrt{H_0(P + 0,32H_0}\ . \qquad (13.23)$$

ამ ფორმულით სარგებლობენ ხვრელისებრი წყალსაშვებიდან გამოდინებული ჭავლის ვარდნის მანძილის გამოსათვლელადაც.



ნახ. 13.18

ხშირად ვარდნილის შესასვლელი ნაწილის განივი პროფილი ისეთივეა, როგორც მიმყვანი და გამყვანი არხების განივკვეთის ფორმა. მიმყვან პრიზმულ კალაპოტში მოძრაობა მდოვრედ ცვალებადია, რაც არ ითქმის შესასვლელი ნაწილის ბოლოს ℓ სიგრძის უბანზე (ნახ. 13.13), სადაც ჭავლის დენის წირების სიმრუდე მნიშვნელოვანია და, მაშასადამე, მოძრაობა მკვეთრად ცვალებადად უნდა ჩაითვალოს.

თუ მიმყვან პრიზმულ კალაპოტში ნაკადი წყნარ მდგომარეობაშია, მაშინ სიღრმე 1-1 კვეთში, სადაც მოძრაობა ჯერ კიდევ მდოვრედ ცვალებადია, კრიტიკულის ტოლია. რაც შეეხება 1′-1′ კვეთს, იქ სიღრმე, მ. ჩეროუსოვის გამოკვლევების თანახმად, განისაზღვრება ფორმულით:

$$h' = 0,7h_{კრ}. \qquad (13.24)$$

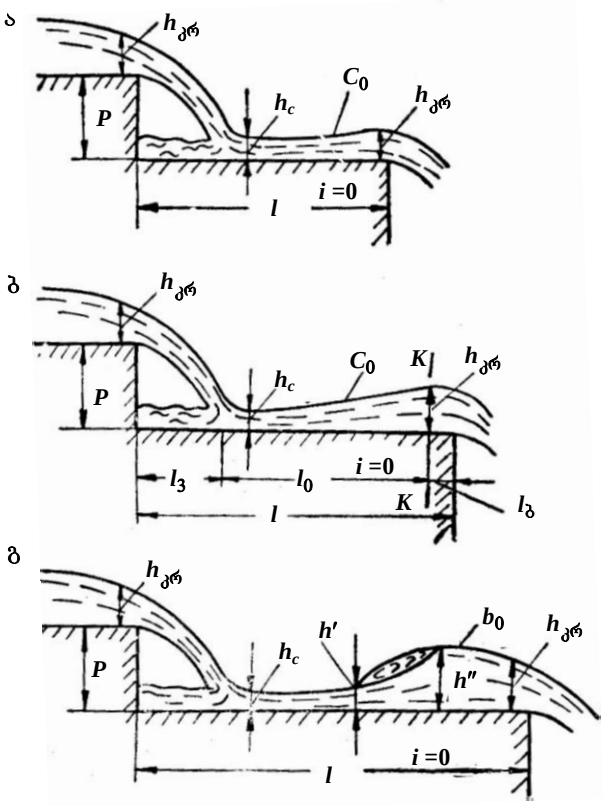
მანძილი 1-1 და 1′-1′ კვეთებს შორის გამოითვლება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$\ell = (2\cdots2,5)h_{კრ}. \qquad (13.25)$$

§ 13.5. მრავალსაფეხურიანი ვარდნილის გაანგარიშება

თუ ვარდნილის საფეხურის რიცხვი ერთზე მეტია, მაშინ ვარდნილს მრავალსაფეხურიანს უწოდებენ. მრავალსაფეხურიანი

ვარდნილის ჰიდრავლიკური გაანგარიშება გულისხმობს შესასვლელი ნაწილის, საფეხურებისა და გამოსასვლელი ნაწილის გაანგარიშებას.



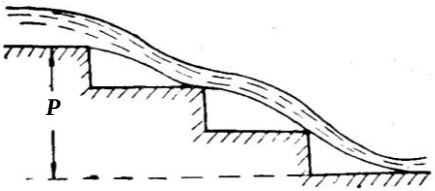
ნახ. 13.19

შესასვლელი ნაწილის გაანგარიშების მეთოდიკა ისეთივეა, როგორც ერთსაფეხურიანი ვარდნილის შემთხვევაში.

ვარდნილის საფეხურების გაანგარიშება ხდება იმის გათვალისწინებით, რომ თითოეულ საფეხურზე შემცირდეს ჭავლის ვარდნის კინეტიკური ენერგია. ვიგულისხმოთ, რომ ვარდნილის კალაპოტი პრიზმული ფორმისაა, ხოლო საფეხურები – ჰორიზონტალური.

დავუშვათ, მოცემულია ისეთი სიგრძის საფეხური, რომლის ბოლოს მყარდება კრიტიკულზე ნაკლები h სიღრმე (ნახ. 13.19, ა).

იმის გამო, რომ კრიტიკული სიღრმისას კვეთის კუთრი ენერგია (ნულოვანი ქანობის შემთხვევაში – ნაკადის კუთრი ენერგიაც) მინიმალურია, საფეხურის ბოლოს კუთრი ენერგიის მნიშვნელობა მეტი იქნება, ვიდრე ზედა ბიეფის შესასვლელი ნაწილის ბოლოს, სადაც კრიტიკული სიღრმე მყარდება. თუ ვარდნის კედლების სიმაღლე ერთნაირია, ხოლო საფეხურების სიგრძე ტოლი, მაშინ კუთრი ენერგიის მნიშვნელობები მეორე საფეხურის შეკუმშულ და ბოლო კვეთებში მეტი იქნება, ვიდრე პირველი საფეხურის შესაბამის კვეთებში. მაშასადამე, საფეხურის არასაკმაო სიგრძისას $Э_c - Э_{მინ}$ ჭარბი ენერგია (სადაც $Э_c$ არის კუთრი ენერგია შეკუმშულ კვეთში) მთლიანად არ ჩაქრება საფეხურებზე, რასაც მოჰყვება ჭავლის ვარდნის მიმართულებით კინეტიკური ენერგიის ზრდა, ჭავლის საფეხურიდან საფეხურზე გადახტომა (ნახ. 13.20) და საბოლოოდ – ნაგებობის დეფორმაცია.



ნახ. 13.20

ვიგულისხმოთ, რომ საფეხურის სიგრძის გაზრდით მივაღწიეთ ისეთ მდგომარეობას, როდესაც სიღრმე პირველი საფეხურის ბოლოს კრიტიკულის ტოლია (ნახ. 13.20, ბ). ცხადია, ამ დროს საფეხურის ბოლოს კუთრი ენერგია მინიმალური იქნება, $Э_c - Э_{მინ}$ ჭარბი ენერგია მთლიანად ჩაქრება საფეხურზე და, მაშასადამე, ენერგიის არავითარი დაგროვება ჭავლის მოძრაობის მიმართულებით არ ხდება.

ახლა განვიხილოთ ნაკადის მოძრაობის პირობები კიდევ უფრო გრძელი საფეხურის შემთხვევაში (ნახ. 13.20, გ). ამ დროს წარმოიქმნება ჰიდრავლიკური ნახტომი და სითხის თავისუფალ ზედაპირს ექნება (13.20, გ) ნახაზზე ნაჩვენები სახე. ნახაზიდან ჩანს, რომ განსახილველ შემთხვევაშიც საფეხურის ბოლოს მყარდება კრიტიკული სიღრმე შესაბამისი მინიმალური კუთრი ენერგიით. მაშასადამე, არც აქ ხდება ენერგიის დაგროვება.

აღნიშნულის საფუძველზე დავასკვნით: ა) პირველი სქემა (ნახ. 13.20, ა) მიუღებელია; ბ) მესამე სქემას (ნახ. 13.20, გ) არავითარი უპირატესობა არ გააჩნია მეორე სქემასთან (ნახ. 13.20, ბ) შედარებით, ენერგიის ჩაქრობის თვალსაზრისით, ამასთან ეკონომიკურადაც არახელსაყრელია. მაშასადამე, ამოცანა დაიყვანება საფეხურის ისეთი სიგრძის შერჩევაზე, რომლის დროსაც საფეხურზე ნაკადი გაედინება მეორე სქემის პირობებში. ამ შემთხვე-

ვისათვის საფეხურის სიგრძე (ნახ. 13.20, ბ) გამოითვლება ფორმულით:

$$\ell = \ell_{\text{ვარდ}} + \ell_0 + \ell_{\text{ბ}}, \tag{13.26}$$

სადაც $\ell_{\text{ვარდ}}$ არის ჭავლის ვარდნის მანძილი;

ℓ_0 – შეტბორვის c_0 წირის სიგრძე *c-c* და *k-k* წირებს შორის;

$\ell_{\text{ბ}}$ – მანძილი *k-k* კვეთიდან საფეხურის ბოლომდე.

ვ. ჟურინის გამოკვლევების თანახმად, მიახლოებით შეიძლება მივიღოთ, რომ

$$\ell_{\text{ვარდ}} = P + h_{\text{კრ}}; \quad \ell_0 = \frac{1}{i_{\text{კრ}}}(0{,}75h_{\text{კრ}} - h_c); h_{\text{ბ}} = 2h_{\text{კრ}}, \tag{13.27}$$

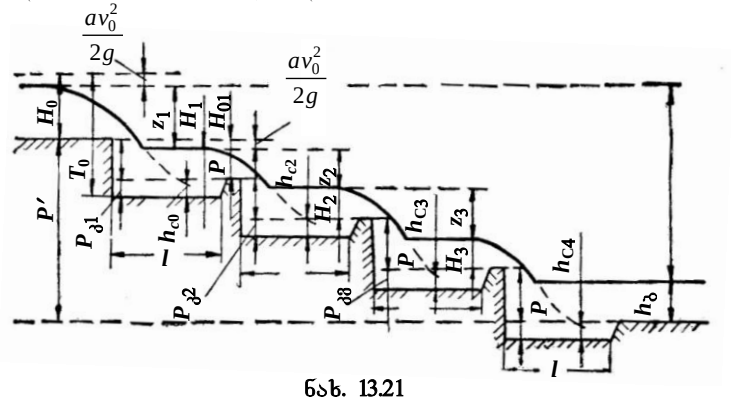
სადაც $i_{\text{კრ}}$ არის საფეხურისათვის გამოთვლილი კრიტიკული ქანობის მნიშვნელობა (დანარჩენი აღნიშვნები ცნობილია).

მაშინ (13.26) გამოსახულება ასეთ სახეს მიიღებს

$$\ell = P + 3h_{\text{კრ}} + \frac{1}{i_{\text{კრ}}}(0{,}75h_{\text{კრ}} - h_c). \tag{13.28}$$

ენერგიის ჩაქრობა c_0 ტიპის შეტბორვის წირის ზონაში ძალზე ნელა ხდება, რიც გამოც ვარდნილი საფეხურის ℓ სიგრძე, ჩვეულებრივ, დიდი გამოდის. მის შესამცირებლად პრაქტიკაში ხშირად მიმართავენ ძალზე ეფექტურ საშუალებას – საფეხურებზე ხორკლიანობის გაზრდას, რაც გაანგარიშების მეთოდიკის არსს არ ცვლის.

არსებობს საფეხურის სიგრძის შემცირების სხვა საშუალებაც – საფეხურების ბოლოში $P_{\text{კ}}$ სიმაღლის წყალსაცემი კედლების მოწყობა (ნახ. 13.21). ასეთ შემთხვევაში ვარდნილს უწოდებენ **მრავალსაფეხურიან ვარდნილს ჭით.** ასეთი ვარდნილის შესასვ-



ნახ. 13.21

ლელი და გამოსასვლელი ნაწილების ჰიდრავლიკური გაანგარიშება ერთსაფეხურიანი ვარდნილის გაანგარიშების ანალოგიურია.

დავუშვათ, რომ ზედა და ქვედა ბიეფებში თავისუფალი ზედაპირების ნიშნულების სხვაობა არის Z. მაშინ, თუ საფეხურების სიმაღლეს ერთნაირს ავიღებთ, ორ მეზობელ საფეხურს შორის ვარდნილი ტოლი იქნება:

$$z = Z/n\,,$$

სადაც n არის ტექნიკურ-ეკონომიკური გაანგარიშების საფუძველზე აღებული საფეხურების რიცხვი.

თუ ცნობილია მიმყვანი და გადამყვანი კალაპოტების ფსკერის ნიშნულების სხვაობა (P'), მაშინ ვარდნის კედლის სიმაღლეს (P) გამოვთვლით ფორმულით:

$$P = P'/n\,.$$

ვარდნილის გაანგარიშებით ხდება წყალსაცემი კედლების სიმაღლის დადგენა იმ პირობით, რომ საფეხურებზე ჰიდრავლიკური ნახტომი იყოს დატბორილი, ე.ი. ადგილი ჰქონდეს ტოლობას:

$$P_{კ} = \sigma h'_{ci} - H_i\,,$$

სადაც h'_{ci} არის i-ურ ჭის შეკუმშულ კვეთში h_{ci} სიღრმის შეუღლებული სიღრმე; $\sigma = 1{,}05 \div 1{,}10$ – ჭავლის დატბორვის კოეფიციენტი; H_u – დაწნევა წყალსაცემ კედელზე. ამ უკანასკნელის გაანგარიშება ხდება წყალსაშვების ანალოგიურად.

სხვადასხვა ავტორის გამოკვლევების თანახმად, თანაბარ პირობებში, დატბორილი ჰიდრავლიკური ნახტომის სიგრძე შეიძლება 2–3-ჯერ იქნეს შემცირებული თავისუფალი ჰიდრავლიკური ნახტომის სიგრძესთან შედარებით, რაც, ცხადია, ვარდნილის საფეხურის სიგრძის ამდენჯერვე შემცირებას გამოიწვევს. ქვემოთ მოგვყავს სწორკუთხა განივკვეთის მქონე მრავალსაფეხურიანი ვარდნილის (ჭით) გაანგარიშების თანამიმდევრობა ი. ნაუმენკოს მიხედვით:

1. ჩავინიშნავთ საფეხურების n რიცხვს P'-ის გათვალისწინებით და ყველაზე ქვედა შეკუმშული კვეთისათვის გამოვთვლით φ_c სიჩქარის კოეფიციენტს:

$$\varphi_c = 0{,}456 - 0{,}009n + (1.047 - 0{,}0716n + 0{,}0041n^2)\frac{h_{კრ}}{P'}\,. \qquad (13.29)$$

2. გამოვთვლით წყალსაცემი კედლების სიმაღლეს:

ა) ყველა საფეხურისათვის, როცა $h_{კრ}/P < 0{,}8$,

$$P_{კ} = 0{,}6\sqrt{Ph_{კრ}}\;; \qquad (13.30)$$

ბ) როცა $h_{კრ}/P < 0{,}8$, პირველი საფეხურისათვის წყალსაცემი კედლის სიმაღლეს გამოვთვლით (11.45) გამოსახულებით, ყველა დანარჩენისათვის შემდეგი ფორმულით:

$$P_კ = 0{,}23P + 0{,}39h_{კრ}. \qquad (13.31)$$

3. საფეხურის სიგრძეს განვსაზღვრავთ დამოკიდებულებით:

$$\ell = \ell_{ვარდ} + \ell_{დნ} + \delta_კ, \qquad (13.32)$$

სადაც $\ell_{ვარდ}$ არის ჭავლის ვარდნის მანძილი, $\ell_{დნ}$ – დატბორილი ნახტომის სიგრძე, ხოლო $\delta_კ$ – წყალსაცემი კედლის ზღურბლის სისქე. $\ell_{ვარდ}$ და $\ell_{დნ}$ სიდიდეები გამოითვლება ფორმულებით:

$$\ell_{ვარდ} = 1{,}65h_{კრ} + 0{,}65(P + P_კ); \qquad (13.33)$$

$$\ell_{დნ} = 1{,}5h'_c. \qquad (13.34)$$

შევნიშნავთ, რომ ყველა საფეხურის სიგრძეს ერთნაირს ვიღებთ.

4. გამყვან კალაპოტში ბიეფების შეუღლების ხასიათის დადგენისას ვითვალისწინებთ მრავალსაფეხურიანი ვარდნილის ბოლო შეკუმშულ კვეთში ენერგიის მარაგის სიდიდეს

$$T_c = \varphi_c T_0. \qquad (13.35)$$

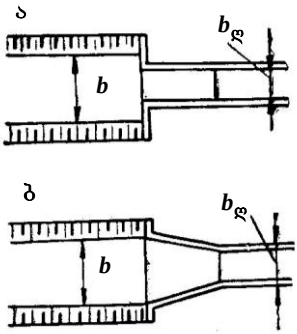
მრავალსაფეხურიანი ვარდნილის (ჭით) ჰიდრავლიკური გაანგარიშების აქ მოყვანილი თანამიმდევრობა მართებულია იმ შემთხვევისათვის, როდესაც $H_0 = 3\cdots5$ მ, $q = 2\cdots5$ მ²/წმ და $P' = 5\cdots15$ მ.

სწორკუთხა განივკვეთისაგან განსხვავებული ფორმის ვარდნილების გაანგარიშების მეთოდიკა მოცემულია სპეციალურ ლიტერატურაში.

§ 13.6. სწრაფდენი

ხელოვნურ კალაპოტს, რომლის ქანობი კრიტიკულზე მეტია, **სწრაფდენი** ეწოდება. სწრაფდენი შედგება **შესასვლელი ნაწილის, ღარისა და გამოსასვლელი ნაწილისაგან.** ჰიდროტექნიკურ პრაქტიკაში განასხვავებენ **ჩვეულებრივი** და **გაზრდილი (ხელოვნური) ხორკლიანობის** მქონე სწრაფდენებს.

სწრაფდენი, როგორც ვარდნილი, შესაუღლებელი ნაგებობაა. მისი **შესასვლელი ნაწილი** ეწყობა ფართოზღურბლიანი (ნახ. 13.22, ა) ან პრაქტიკული პროფილის (ნახ. 13.22, ბ) წყალსაშვების სახით. ამიტომ სწრაფდენის შესასვლელი ნაწილის გაანგარიშება

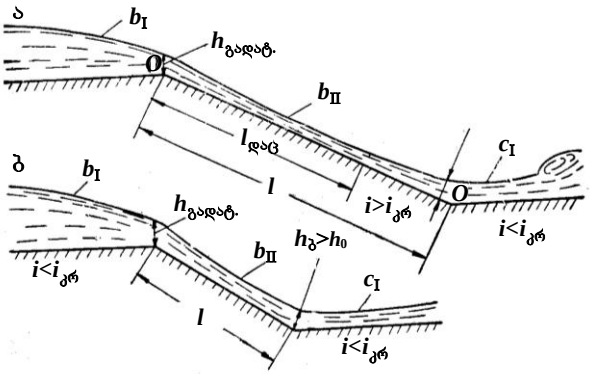


ნახ. 13.22

ხდება წყალსაშვების ფორმულების საშუალებით, კერძოდ, ღარის სიგანე გამოითვლება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$b_{ღ} = \frac{Q}{m\sqrt{2g}H^{3/2}}.$$

თუ სწრაფდენის შესასვლელი ნაწილისა და მიმყვანი არხის განივკვეთები ერთნაირია, მაშინ მიმყვან არხში წარმოიქმნება b_{I} ტიპის დაცემის წირი (ნახ. 13.23, ა), ფსკერის გადატეხის კვეთში კრიტიკული სიღრმით $(h_{გადატ} = h_{კრ})$. თუ სწრაფდენის ღარში ნორმალური სიღრმე $h_0 \le 0{,}5h_{კრ}$, მაშინ, ვ. ბოლშაკოვის მონაცემის თანახმად, $h_{გადატ} = (0{,}7\cdots 0{,}8)h_{კრ}$.



ნახ. 13.23

სწრაფდენის ღარის ჰიდრავლიკური გაანგარიშება გულისხმობს მის ბოლოში ნაკადის $h_ბ$ სიღრმის დადგენას, $h_{გადატ}$ და $h_ბ$ სიღრმეებს შორის თავისუფალი ზედაპირის b_{II} ტიპის დაცემის წირის აგებასა და ღარის კედლების გამაგრების ტიპის შერჩევას. თავისუფალი ზედაპირის წირის აგება ხდება მე-9 თავში მოცემული მეთოდების გამოყენებით. გრძელი ღარის შემთხვევაში დაცემის წირის სიგრძე $(\ell_{დაც})$ შეიძლება ღარის სიგრძეზე (ℓ) ნაკლები აღმოჩნდეს $(\ell_{დაც} < \ell)$; ამ დროს მის ქვემოთ დამყარდება

თანაბარი მოძრაობა და ღარის ბოლოში სიღრმე ნორმალურის ტოლი იქნება ($h_ბ = h_0$). ასეთ შემთხვევაში სწრაფდენს გრძელს უწოდებენ (ნახ. 13.23, ა). თუ $\ell_{ღია} > \ell$, მაშინ სწრაფდენი არის **მოკლე** (ნახ. 13.23, ბ) და მის ბოლოში მყარდება ნორმალურ სიღრმეზე მეტი სიღრმე ($h_ბ h_0$).

თავისუფალი ზედაპირის წირის აგების შემდეგ შეიძლება განვსაზღვროთ სიჩქარეები ღარის სხვადასხვა კვეთში. დიდი სიჩქარეების შემთხვევაში ($i > 0,2$) სწრაფდენზე ხდება ნაკადის **აერირება,** რაც იწვევს სიღრმეების გაზრდას. აერირებული ნაკადის სიღრმე შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით:

$$h_ბ = (1+e)h, \qquad (13.36)$$

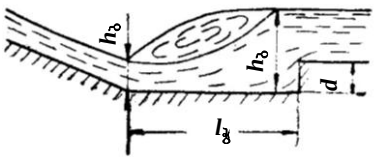
სადაც h არის არაერირებული ნაკადის სიღრმე; e – ნაკადის ჰაერით გაჯერების ხარისხი; ნ. ისაჩენკოს გამოკვლევების თანახმად:

$$e = \left(0,035 + 0,83\frac{\Delta}{R}\right)\sqrt{Fr - Fr_{მინ}}\,. \qquad (13.37)$$

ამ გამოსახულებაში Δ არის აბსოლუტური ხორკლიანობა; R – არააერირებული ნაკადის ჰიდრავლიკური რადიუსი; $Fr = v^2/gR$ – ფრუდის რიცხვის მნიშვნელობა სწრაფდენზე, $Fr_{მინ}$ – მინიმალური მნიშვნელობა, რომლის დროსაც იწყება ნაკადის აერაცია. $Fr_{მინ}$-ის რიცხვითი სიდიდეები დამოკიდებულია Δ/R ფარდობაზე:

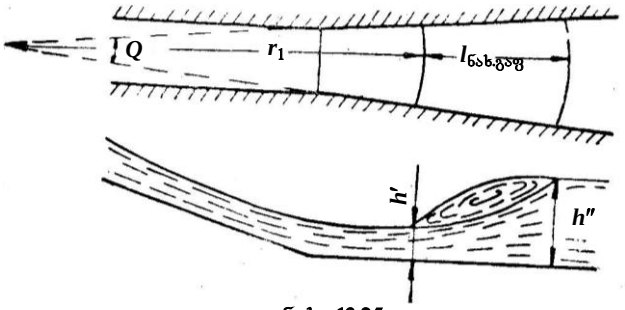
Δ/R	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
$Fr_{მინ}$	45	39	34	29,4	25,4	22	19	16,3	14	11,7	10,3

სწრაფდენის **გამოსასვლელი ნაწილის** გაანგარიშებისას უნდა დადგინდეს ენერგიის ჩამქრობი ნაგებობების ზომები ან დაინიშნოს გამაგრების ტიპი სწრაფდენის ბოლოში (თუ ენერგიის ჩამწრობი არ ეწყობა). თუ ქვედა ბიეფის ფსკერის ქანობი კრიტიკულზე ნაკლებია ($i < i_{კრ}$), ბიეფების შეუღლების ხასიათის დადგენა და ენერგიის ჩამქრობი ნაგებობის გაანგარიშება ხდება ისე, როგორც წყალსაშვებისა და ვარდნილისათვის (§§ 13.3, 13.4). 13.24 ნახაზზე მაგალითის სახით მოცემულია სწრაფდენის ბოლოს მოწყობილი წყალსაცემი ჭის საანგარიშო სქემა.



ნახ. 13.24

სწრაფდენის ღარი თითქმის ყოველთვის გამყვან არხზე ნაკლები სიგანისაა. ასეთ შემთხვევაში ჰიდრავლიკური ნახტომი წარმოიქმნება გაფართოებულ გამოსასვლელ ნაწილში (ნახ. 13.25) ან გაფართოებულ წყალსაცემ ჭაში. შეუღლებული სიღრმეები კალაპოტის მდოვრედ გაფართოებისას შეიძლება გამოვთვალოთ ო. ვასილიევის ფორმულით:



ნახ. 13.25

$$2\frac{\alpha'}{g}\left(\frac{Q}{\theta}\right)^2\frac{1}{r_1 h'}+r_1(h')^2=2\frac{\alpha'}{g}\left(\frac{Q}{\theta}\right)^2\frac{1}{\left(\ell_{ნახგაფ}+r_1\right)h''}+$$

$$(\ell_{ნახგაფ}+r_1)h''^2-0{,}3[(h')^2+h'h''+(h'')^2] \qquad (13.38)$$

სადაც r_1 არის პირველი შეუღლებული სიღრმის შესაბამისი რადიუსი; θ – კალაპოტის გაფართოების კუთხე (რად.); $\ell_{ნახგაფ}$ – ნახტომის სიგრძე კალაპოტის გაფართოებულ ნაწილში და გამოითვლება ფორმულით

$$\ell_{ნახგაფ}=\frac{\ell_{ნახპრ}}{1+0{,}052\dfrac{\ell_{ნახპრ}}{r_1}}. \qquad (13.39)$$

აქ $\ell_{ნახპრ}$ არის ნახტომის სიგრძე პრიზმულ კალაპოტში, რომელიც შეიძლება განვსაზღვროთ (10.16)–(10.18) ფორმულებით. ამასთან, ფრუდის რიცხვის მნიშვნელობა ნახტომის საწყის კვეთში იქნება:

$$Fr'=\left(\frac{h_{კრ}}{h'}\right)^3=\frac{\alpha}{g(h')^3}\left(\frac{Q}{\theta r_1}\right)^2. \qquad (13.40)$$

(13.38) და (13.39) გამოსახულებებში α და α' კოეფიციენტების მნიშვნელობები დაახლოებით ერთის ტოლი მიიღება $(\alpha \approx \alpha' \approx 1)$.

ხშირად სწრაფდენის მოწყობა გვიხდება ციცაბო რელიეფის პირობებში, რის გამოც იძულებული ვართ ღარის ფსკერს მივცეთ დიდი ქანობი. შედეგად სწრაფდენში მყარდება სიჩქარეები, რომლებიც სხვადასხვა მოსაზრებით შეიძლება მიუღებელი აღმოჩნდეს. კერძოდ, სიჩქარემ ღარში შეიძლება გადააჭარბოს დასაშვებ მნიშვნელობას, რაც გამოიწვევს ნაგებობის დეფორმაციას (ნგრევა); სიჩქარე ღარში დასაშვებია, მაგრამ იქმნება ქვედა ბიეფთან შეუღლების არახელსაყრელი პირობები; სიჩქარე ღარში ვერ უზრუნველყოფს მიზნობრივ ღონისძიებათა განხორციელებას (თევზის გატარება, ხე-ტყის დაცურება და სხვა).

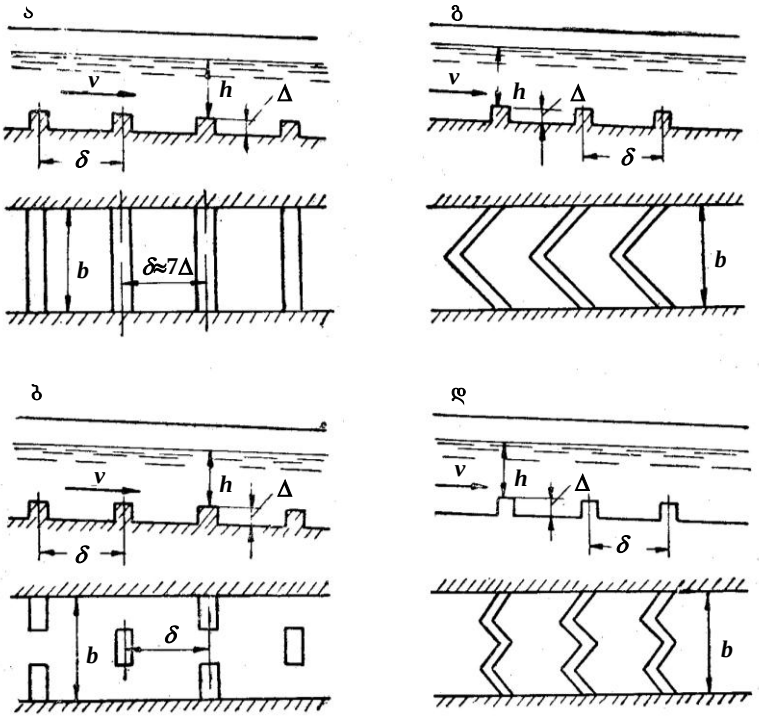
ასეთ შემთხვევებში სწრაფდენზე ნაკადის სიჩქარის შესამცირებლად მიმართავენ **ღარის ფსკერის ხორკლიანობის ხელოვნურად გაზრდას** სხვადასხვა კონსტრუქციის წიბოსა და წინაღობის მოწყობის საშუალებით (ნახ. 13.26).

გამოკვლევებმა ცხადყო, რომ ფსკერული კვადრატული კვეთის წიბოვანი ხორკლიანობისას სწრაფდენში დინების გასწვრივ მყარდება თითქმის მუდმივი სიღრმე და, მაშასადამე, მოძრაობა პირობითად შეიძლება თანაბრად ჩაითვალოს. დარსის კოეფიციენტს გამოვთვლით შემდეგი ემპირიული დამოკიდებულებით:

$$\lambda = M + 2i^2 - Ni\frac{\Delta}{h}\frac{b_{ღ}}{\chi}\frac{1}{\sqrt{\Pi_{კ}}}\lg i\,, \qquad (13.41)$$

სადაც M და N არის გაზრდილი ხორკლიანობის ტიპზე დამოკიდებული პარამეტრები და აიღება საცნობარო ლიტერატურაში მოცემული ცხრილებიდან; i – სწრაფდენის ღარის ქანობი; Δ – კვადრატული კვეთის წიბოს სიმაღლე, $\Delta \approx \delta/7$ (δ წიბოებს შორის მანძილია); h – წიბოს ზედა სიბრტყიდან ათვლილი ნაკადის სიღრმე; χ – ღარის მთლიანი სველი პერიმეტრი; $\Pi_{კ}$ – კინეტიკურობის პარამეტრი.

შევნიშნავთ, რომ (13.41) დამოკიდებულება მიღებულია ნორმალური (ნახ. 13.26, ა), ნორმალური ჭადრაკულად განლაგებული (ნახ. 13.26, ბ) და ზიგზაგური (ნახ. 13.26, გ, დ) წიბოებით შექმნილი წინაღობის მქონე ღარებში ჩატარებული ექსპერიმენტებით და მართებულია, როცა $h \geq 3\Delta$. თუ ეს პირობა დაცული არ არის, ნაკადის თავისუფალი ზედაპირი მნიშვნელოვნად დეფორმირდება და მოძრაობის თანაბარი რეჟიმი ირღვევა.



ნახ. 13.26

იმის გამო, რომ სწრაფდენის ღარში მოძრაობა თანაბრად ითვლება, λ კოეფიციენტის გამოსათვლელად შეიძლება ვისარგებლოთ (6.15) გამოსახულებითაც, თუ გავითვალისწინებთ, რომ $i = h_{\text{ხიბ}} / \ell$,

$$\lambda = \frac{8gRi}{v^2} = \frac{8gi}{Q^2} \cdot \frac{\omega^3}{\chi} . \qquad (13.42)$$

(13.41) და (13.42) განტოლებათა ერთობლივი ამოხსნით მივიღებთ:

$$\Delta = \frac{\dfrac{8gi}{Q^2} \cdot \dfrac{\omega^3}{\chi} - \dfrac{M + 2i^2}{i}}{-N \lg i} h \frac{\chi}{b} \sqrt{\Pi_{ა}} \qquad (13.43)$$

ან

$$\frac{\omega^3}{\chi}+\frac{Q^2}{8g}bN\Delta\lg i\frac{1}{h\chi\sqrt{\Pi_{ა}}}=\frac{Q^2}{8g}\cdot\frac{M+2i^2}{i}. \qquad (13.44)$$

კერძო შემთხვევაში, სწორკუთხა კვეთისათვის $\Pi_{ა}=q^2/gh^3$; ამიტომ (13.44) გამოსახულებიდან გვექნება:

$$\frac{h^3}{\chi}+\frac{1}{8\sqrt{g}}qN\Delta\lg i\frac{\sqrt{h}}{\chi}=\frac{1}{8g}=\frac{q^2}{b}\cdot\frac{M+2i^2}{i}. \qquad (13.45)$$

მიღებულ დამოკიდებულებათა გამოყენებით შეგვიძლია გადავწყვიტოთ ორი სახის ამოცანა: 1) განვსაზღვროთ შერჩეული ტიპის წიბოს სიმაღლე და წიბოებს შორის მანძილი იმ პირობით, რომ სწრაფდენის ღარში მოცემული ხარჯისათვის შევინარჩუნოთ მუდმივი სიღრმე; 2) განვსაზღვროთ სიღრმე ღარში გარკვეული ფორმისა და ზომების წიბოებისათვის. პირველი ტიპის ამოცანა უშუალოდ წყდება (13.43) ფორმულის გამოყენებით, რადგან Δ-ს გარდა ყველა სიდიდე ცნობილია. მეორე ტიპის ამოცანის ამოსახსნელად ვისარგებლებთ (13.44) ფორმულით. ამ შემთხვევაში განტოლების მარჯვენა ნაწილი ცნობილია, ხოლო მარცხენა ნაწილში უცნობია ω^3/χ და $1/h\chi\sqrt{\Pi_{ა}}$ სიდიდეები, რომლებიც h სიღრმის ფუნქციებს წარმოადგენს, (13.44) განტოლება h-ის მიმართ ამოიხსნება თანამიმდევრულ მიახლოებათა მეთოდით.

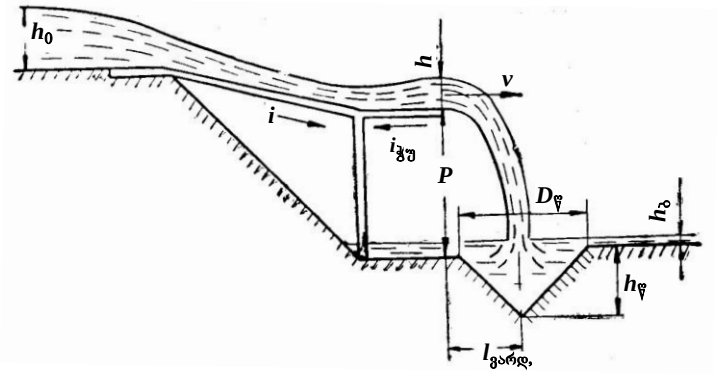
დასასრულ, შევნიშნავთ, რომ მიღებულ დამოკიდებულებებში, როცა $i>0{,}2$, იგულისხმება არა წყლის ნაკადის, არამედ აერირებული ნაკადის გეომეტრიული და ჰიდრავლიკური ელემენტები.

§ 13.7. კონსოლური წყალსაგდები (ვარდნილი)

კონსოლური წყალსაგდები ეწოდება დიდი ქანობის მქონე ღარს, რომელიც დედამიწის ზედაპირიდან გარკვეულ სიმაღლეზე მოთავსებულია საყრდენებზე და ბოლოში აქვს მოკლე (1–2 მ სიგრძის) ჭავლმიმმართველი უბანი (ნახ. 13.27). ეს უკანასკნელი შეიძლება იყოს ჰორიზონტალური ან უკუქანობით $i_{ჭუ}\le 0{,}25$. ჭავლმიმმართველი უბნიდან წყლის გადაგდება ნაგებობის ფარგლებს გარეთ ხორციელდება P სიმაღლიდან ჭავლის თავისუფალი ვარდნის გზით.

ქვედა ბიეფში ჭავლის ვარდნის ადგილას წარმოიქმნება წარეცხვის ძაბრი, რომლის ზომები კონსოლური წყალსაგდების

მუშაობის საწყის პერიოდში სწრაფად იზრდება, შემდეგ თანდათანობით სტაბილიზდება.



ნახ. 13.27

კონსოლური ვარდნილის ჰიდრავლიკური გაანგარიშება გულისხმობს ჭავლმიმმართველი უბნის ბოლოში h სიღრმის, ჭავლის ვარდნის $\ell_{\text{ვარდ}}$ მანძილისა და ქვედა ბიეფში წარეცხვის ძაბრის ზომების დადგენას. რაც შეეხება **შესასვლელი ნაწილისა და ღარის** გაანგარიშებას, ის სწრაფდენის გაანგარიშების ანალოგიურია.

ჭავლის ვარდნის მანძილი, აერაციისა და ჰაერის წინაღობის მხედველობაში მიუღებლად, გამოითვლება შემდეგი მიახლოებითი ფორმულით (იგულისხმება, რომ $i_{\text{ჭუ}} \le 0{,}25$):

$$\ell_{\text{ვარდ}} = \frac{v^2}{g} i_{\text{ჭუ}} + v\frac{\sqrt{2P+h}}{g}. \qquad (13.46)$$

წარეცხვის ძაბრის სიღრმე ($h_{\text{წ}}$) შეიძლება განვსაზღვროთ ა. პატრაშევის ემპირიული დამოკიდებულებით:

$$h_{\text{წ}} = \sigma_{\text{წ}}\left(\frac{Q}{b}\right)^{0,5}\left(\frac{Z_0}{d_{90}}\right)^{0,25} - h_{\text{ბ}}, \qquad (13.47)$$

სადაც b არის ჭავლმიმმართველი უბნის სიგანე, მ; $h_{\text{ბ}}$ – სიღრმე ქვედა ბიეფში, მ; Z_0 – დაწნევა, რომელიც გამოითვლება ფორმულით:

$$Z_0 = P + h - h_{\text{ბ}} + \alpha v_0^2/2g, \qquad (13.48)$$

d_{90} გრუნტის ისეთი ფრაქციის მარცვლების დიამეტრია, მმ, რომელზე ნაკლებიც მოცემულ გრუნტში შეადგენს 90%-ს მასით. **არაბმული გრუნტებისათვის**

გრუნტის სახე	ქვიშა	ხრეში	ღორღი
d_{90}, მმ	0,5...1	1...10	20...80

ბმული თიხნარი გრუნტისათვის, ნ. ბელიაშევსკის რეკომენდაციით, d_{90} შეიძლება გამოვსახოთ არაბმული გრუნტის ეკვივალენტური დიამეტრით

თიხნარი	მცირე სიმკვრივის	საშუალო სიმკვრივის	მკვრივი	ძალიან მკვრივი
d_{90}, მმ	0,7	6	18	50

σ_ψ კოეფიციენტი, მ ჩერტოუსობის გამოკვლევების თანახმად, დამოკიდებულია გრუნტის მარცვლების დიამეტრზე:

d, მმ	0,5...4	4...8	8...12	12...15
σ_ψ, ψმ^{0,5}	4,25...4,1	4,1....3,75	3,75...3,05	3,05....2,25

წარეცხვის ძაბრის დიამეტრი გამოითვლება ფორმულით:

$$D_\psi \approx 2h_\psi . \qquad (13.49)$$

თავი XIV. ბრუნტის წყლების მოძრაობა

§ 14.1. ზოგადი ცნობები

ბუნებრივ პირობებში **გრუნტი რთული არაერთგვაროვანი ფოროვანი გარემოა,** რომლის სტრუქტურა იცვლება დროის მიხედვით (თუმცა ძალზე ნელა) გეოფიზიკური ფაქტორების ზემოქმედებით. წყალშეღწევადი გრუნტი შედგება ცალკეული ნაწილაკებისაგან, რომელიც შეიძლება დავახასიათოთ ამ ნაწილაკების **პირობითი დიამეტრის** მიხედვით. ასე, მაგალითად, თიხოვანი გრუნტის პირობითი დიამეტრი 0,005 მმ-ის ტოლია, ქვიშის – 0,01÷2 მმ-ის, ხრეშის 2÷20 მმ-ის.

გრუნტის ფორიანობას ახასიათებენ **მოცულობითი ფორიანობის კოეფიციენტით**

$$p = W_{\text{ფორ}} / W , \qquad (14.1)$$

სადაც $W_{\text{ფორ}}$ არის ფორების მოცულობა; W – გრუნტის საერთო მოცულობა ფორების ჩათვლით.

რაც წვრილია გრუნტის მარცვლები, მით მეტია ფორიანობის კოეფიციენტი. მაგალითად, 1 მმ დიამეტრის მქონე ქვიშისათვის $p \approx 0{,}3$, ხოლო თიხისათვის – $p \approx 0{,}5$.

წყალი, რომელიც გრუნტის ფორებში ხვდება სხვადასხვა მიზეზით, შეიძლება იმყოფებოდეს სხვადასხვა მდგომარეობაში:

1) **ორთქლისებრი წყალი** ფორებში იმყოფება ჰაერთან ერთად და ავსებს მათ;

2) **ჰიგროსკოპული წყალი** შეჭიდულობის ძალების ზემოქმედებით ეკვრის გრუნტის ნაწილაკებს თხელი შრის სახით. ასეთი წყალი გრუნტიდან შეიძლება მოცილებულ იქნეს 100°C-მდე გაცხელებით;

3) **აფსკური წყალი** გრუნტის ნაწილაკებით შეკავებულია მოლეკულური ძალების ზემოქმედებით;

4) **კაპილარული წყალი** ფორებში იმყოფება ზედაპირული დაჭიმულობის ძალების გავლენით;

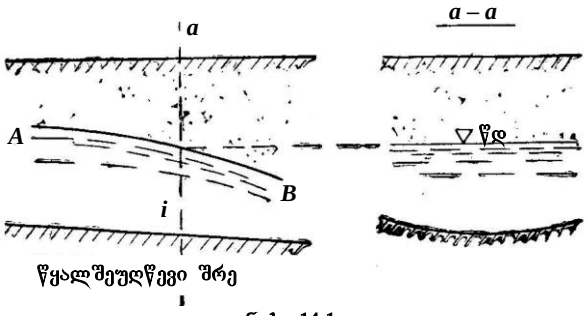
5) **გრავიტაციული ანუ გრუნტის წყალი** მთლიანად ავსებს გრუნტის ფორებს და განიცდის მიზიდულობის ძალის ზემოქმედებას (ეს არის წყლის ის მასა, რომელიც თავისუფალია გრუნტის მყარი ნაწილაკებისა და თხევადი ნაწილაკების მოლეკულური ურთიერთქმედების გავლენისაგან). სწორედ დედამიწის მიზიდულობის ძალა განაპირობებს ფორებში გრავიტაციული ანუ გრუნტის წყლის გადაადგილებას.

გრუნტის ფორებში წყლის მოძრაობის მოვლენას **ფილტრაცია** ეწოდება. მოძრავი გრუნტის წყალი წარმოქმნის **გრუნტის წყლის** ანუ **ფილტრაციულ ნაკადს,** რომელიც ხასიათდება ჰიდრავლიკური ნაკადის ზოგიერთი თავისებურებით.

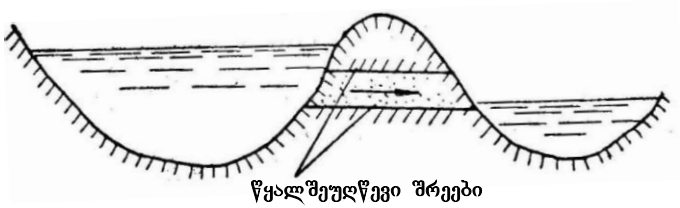
წყალი ფორებში ხვდება სხვადასხვა მიზეზით (მაგალითად, წვიმის წყლის გრუნტში გაჟონვით). გარკვეულ სიღრმეზე ასეთი წყალი შეიძლება შეაკავოს წყალშეუღწევი გრუნტის (მკვრივი თიხის, კლდის და სხვ.) შრემ; თუ ამ შრის ქანობი ნულისაგან განსხვავდება. წყალი დაიწყებს მოძრაობას მის ზედაპირზე (ნახ. 14.1). ამგვარად, წყალშეუღწევი შრე წარმოქმნის ერთგვარ კალაპოტს, რომელშიც მოძრაობს **თავისუფალი ზედაპირის** ფილტრაციული ნაკადი. ასეთ მოძრაობას **უდაწნეო** ეწოდება.

ფილტრაციული ნაკადის თავისუფალ ზედაპირს, რომლის ყოველ წერტილში წნევა ატმოსფერულის ტოლია, **დეპრესიულ ზედაპირს** უწოდებენ, ხოლო თავისუფალი ზედაპირის *AB* წირს – **დეპრესიის წირს**.

თუ ფილტრაციული ნაკადი ზემოდანაც და ქვემოდანაც შემოფარგლულია გრუნტის წყალშეუღწევი შრეებით (ნახ. 14.2), მოძრაობას **დაწნევითი** ეწოდება.



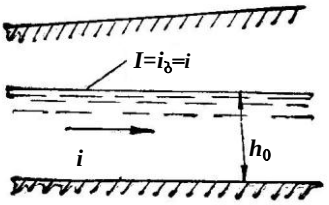
ნახ. 14.1



ნახ. 14.2

გრუნტის წყლის, ისევე, როგორც მიწისზედა წყლის მოძრაობა, შეიძლება იყოს **მდოვრედ ცვალებადი** და მკვეთრად ცვალებადი, **დამყარებული** და **დაუმყარებელი, თანაბარი** და **არათანაბარი.** ფილტრაციული ნაკადის მოძრაობა დაუმყარებელია, თუ მისი ჰიდრავლიკური მახასიათებლები დამოკიდებულია როგორც სივრცის კოორდინატებზე, ისე დროზე: $p = f_1(x, y, z, t)$; $v = f_2(x, y, z, t)$. ფილტრაციული ნაკადი დამყარებულია, თუ მისი ჰიდრავლიკური მახასიათებლები მხოლოდ სივრცის კოორდინატების ფუნქციაა.

გრუნტის წყლის თანაბარი მოძრაობის მაგალითი ნაჩვენებია 14.3 ნახაზზე, ხოლო არათანაბარი მოძრაობის – 14.1 ნახაზზე. გრუნტის წყლის თანაბარი მოძრაობისას სითხის თავისუფალი ზედაპირის $i_ჳ$ ქანობი (პიეზომეტრული ქანობი) წყალშეუღწევი შრის i ქანობის ტოლია $(i_ჳ = i)$, არათანაბარი მოძრაობისას – $i_ჳ \neq i$.

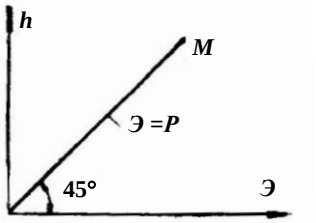


ნახ. 14.3

ფილტრაცია შეიძლება იყოს

ლამინარული და **ტურბულენტური.** ლამინარული მოძრაობა, ისევე, როგორც მილსადენებში, ხასიათდება დაწნევის დანაკარგით, რომელიც ფილტრაციული ნაკადის სიჩქარის პირველი ხარისხის პროპორციულია. ასეთი მოძრაობა ძირითადად ხდება წვრილმარცვლოვან გრუნტებში (წყალგამტარი თიხა, თიხნარი, ქვიშა). მსხვილმარცვლოვან გრუნტებში (ხრეში, ღორღი, ქვანაყარი) მყარდება მოძრაობის ტურბულენტური რეჟიმი, რომლის დროსაც დაწნევის დანაკარგი სიჩქარის ერთზე მეტი ხარისხის პროპორციულია. იმის გამო, რომ ლამინარული ფილტრაციის შემთხვევაში სიჩქარეები ძალზე მცირეა, H დაწნევის განსაზღვრისას $v^2/2g$ სიჩქარით დაწნევას უგულებელვყოფთ. ამიტომ, ჰიდრავლიკური და პიეზომეტრული ქანობები ერთმანეთის ტოლი იქნება $(I = i_ვ)$.

გრუნტის წყლის მოძრაობის შემთხვევისათვის კვეთის კუთრი ენერგიის გრაფიკი ღებულობს 14.4 ნახაზზე ნაჩვენებ *OM* წრფის სახეს. მართლაც, იმის გამო, რომ $v^2/2g$ სიჩქარით დაწნევას უგულებელვყოფთ, კვეთის კუთრი ენერგიის გამოსათვლელი ფორმულიდან გვექნება: $Э = h$. ეს კი კოორდინატთა სათავეზე გამავალი აბსცისთა ღერძისადმი 45°-იანი კუთხით დახრილი წრფის განტოლებაა.



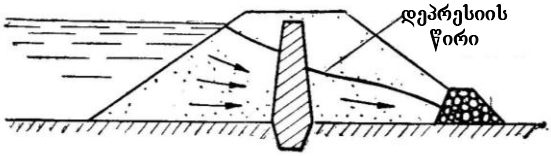
ნახ. 14.4

14.4 ნახაზზე მოცემული გრაფიკიდან ჩანს, რომ გრუნტის წყლის ნაკადისათვის კრიტიკული სიღრმე ყოველთვის პრაქტიკულად ნულის ტოლია $(h_{კრ} = 0)$. ამიტომ, კრიტიკულ სიღრმესთან შესაბამისი *k-k* წირი შეთავსებულია ფსკერთან. რაც შეეხება კრიტიკულ ქანობს, ის გრუნტის წყლის უდაწნეო მოძრაობისას უსასრულობის ტოლი უნდა იყოს, რადგანაც მხოლოდ ამ შემთხვევაში იქნება დაცული პირობა: $h_0 = h_{კრ} = 0$. ცხადია, ასეთი ქანობი არ არსებობს. ამიტომ უნდა ჩავთვალოთ, რომ ფილტრაციული ნაკადი ყოველთვის წყნარ მდგომარეობაშია, ხოლო წყალშეუღწევი ფსკერის ქანობი კრიტიკულზე ნაკლებია $(i < i_{კრ})$.

ყოველი ბუნებრივი გრუნტი წარმოადგენს ძირითადი ქანების სხვადასხვა ფაქტორის (წყლის, ყინულის, ქარის, ტემპერატურის და სხვა) ზემოქმედებით გამოწვეულ რღვევის პროდუქტს. ერთი მხრივ, აღნიშნული ფაქტორების მოქმედების ინტენსიურობის,

ხოლო მეორე მხრივ, ქანის მინერალოგიური შედგენილობის სხვადასხვაობის გამო, ბუნებრივი გრუნტები ხასიათდება განსხვავებული ფილტრაციული თვისებებით. ამ თვალსაზრისით გრუნტები იყოფა **ერთგვაროვან** და **არაერთგვაროვან** გრუნტებად. **ერთგვაროვანი გრუნტის** ფილტრაციული თვისებები მისი ყველა წერტილისათვის ერთნაირია, ხოლო **არაერთგვაროვანი გრუნტის** – განსხვავებული. თუ გრუნტის ფილტრაციული თვისებები არ არის დამოკიდებული ნაკადის მოძრაობის მიმართულებაზე, გრუნტს **იზოტროპულს** უწოდებენ, წინააღმდეგ შემთხვევაში – **ანიზოტროპულს**.

ამ თავში **ძირითადად განვიხილავთ ერთგვაროვან იზოტროპულ გრუნტში ფილტრაციული ნაკადის მდოვრედ ცვალებად, დამყარებულ, უდაწნეო, თანაბარ ლამინარულ მოძრაობასთან დაკავშირებულ ბრტყელ ამოცანებს.**



ნახ. 14.5

გრუნტის წყლების მოძრაობის კანონები ფართო გამოყენებას პოულობს მელიორაციული, წყალმომარაგების, საგზაო ჰიდროტექნიკური ნაგებობების და, კერძოდ, კაშხლებისა და ზღუდარების მშენებლობის პრაქტიკაში. ასე, მაგალითად, თიხის გულის მქონე მიწის კაშხლის (ზღუდარის) (ნახ. 14.5) ცალკეული ელემენტების ზომები შეიძლება განისაზღვროს მხოლოდ კაშხლის (ზღუდარის) ტანში ფილტრაციული მოვლენების შესწავლის საფუძველზე.

§ 14.2. ფილტრაციის ძირითადი კანონი

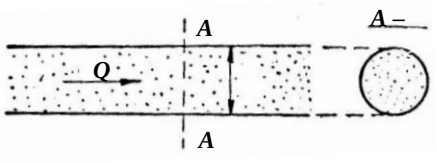
გრუნტის წყლების მოძრაობის თეორიაში მნიშვნელოვანი თანაფარდობაა **ლამინარული ფილტრაციის ძირითადი კანონის** ანალიზური გამოსახულება, რომელიც მიღებულ იქნა ქვიშოვან გრუნტებზე ჩატარებული ექსპერიმენტული გამოკვლევების საფუძველზე

$$v = ki_{ს}, \qquad (14.2)$$

სადაც v არის ე.წ. ფილტრაციის სიჩქარე; k – ფილტრაციის კოეფიციენტი, რომელიც დამოკიდებულია გრუნტის თვისებებზე,

სითხის გვარობასა და ტემპერატურაზე; $i_ჰ$ – პიეზომეტრული ქანობი, რომელიც, ლამინარული ფილტრაციის შემთხვევაში, პრაქტიკულად ჰიდრავლიკური ქანობის ტოლია (იხ. § 14.1). $i_ჰ$ გამოსახავს დაწნევის დანაკარგს ფილტრაციული ნაკადის ერთეულ სიგრძეზე $(i_ჰ = h_{სრგ}/\ell)$.

(14.2) გამოსახულება ცნობილია **დარსის ფორმულის** სახელწოდებით.



ნახ. 14.6

გავარკვიოთ ფილტრაციის სიჩქარის ცნება. ამისათვის განვიხილოთ ქვიშით შევსებული d დიამეტრის მილი (ნახ. 14.6) და ვიგულისხმოთ, რომ ამ მილში ქვიშის ფორებში მოძრაობს წყალი Q ხარჯით. მილის განივკვეთში (ჭრილი A-A) შეიძლება განვასხვაოთ სამი სხვადასხვა ფართობი: ა) გრუნტის ფორების ფართობი ($\omega_{ფორ}$), რომელიც ნაკადის ნამდვილი ცოცხალი კვეთის ფართობია; ბ) გრუნტის მარცვლების კვეთის ფართობი ($\omega_{მარც}$), რომელშიც წყალი სინამდვილეში არ გაედინება; გ) მილის განივკვეთის ფართობი $\left(\omega = \pi d^2/4\right)$. ცხადია, $\omega = \omega_{ფორ} + \omega_{მარც}$.

მაშასადამე, გრუნტის ფორებში წყლის მოძრაობის **ნამდვილი სიჩქარე** იქნება:

$$v_{ფორ} = Q/\omega_{ფორ} \,. \tag{14.3}$$

მაგრამ, გრუნტის ფორებში სითხის დინების ფიზიკური პროცესის სირთულის გამო, მოძრაობას განიხილავენ, როგორც **რეალური ნაკადის თეორიულ მოდელს**. ეს კი პირობითი ნაკადია, რომელიც მთლიანად ავსებს გრუნტის მიერ დაკავებულ სივრცეს (განსახილველ შემთხვევაში მილის მთელ სივრცეს ω ცოცხალი კვეთის ფართობი) ფორებისა და მყარი ნაწილაკების ჩათვლით. სხვანაირად რომ ვთქვათ, ეს არის უწყვეტი დეფორმირებადი გარემოს მოდელი, რომელიც ხასიათდება მოცემული სითხის სიმკვრივითა და სიბლანტით. სწორედ მოდელური ნაკადის სიჩქარე შეადგენს **ფილტრაციის სიჩქარეს.**

$$v = Q/\omega \,, \tag{14.4}$$

სადაც Q არის ფილტრაციული ნაკადის ნამდვილი ხარჯი; რომელშიც $\omega = \omega_{ფორ} + \omega_{მარც}$.

მაშასადამე, **ფილტრაციის სიჩქარე** არის ფიქტიური (წარმოსახვითი) სიჩქარე, რომელიც ექნებოდა ფილტრაციულ ნაკადს, მას რომ ემოძრავა არა მარტო გრუნტის ფორებში, არამედ მარცვლების მიერ დაკავებულ სივრცეშიც.

აღვნიშნოთ p'-ით ე.წ. **ზედაპირული ფორიანობის კოეფიციენტი**.

$$p' = \omega_{\text{ფორ}} / \omega . \tag{14.5}$$

ერთგვაროვანი გრუნტის შემთხვევაში მოცულობითი (§ 14.1) და ზედაპირული ფორიანობის კოეფიციენტები ტოლია: $p = p'$, ამიტომ (14.1), (14.3) და (14.4) გამოსახულებების გათვალისწინებით გვექნება:

$$v = pv_{\text{ფორ}} . \tag{14.6}$$

რადგანაც $p \approx (0{,}3 \cdots 0{,}5) < 1$, ფილტრაციის v სიჩქარე ყოველთვის ნაკლებია გრუნტის ფორებში წყლის მოძრაობის $v_{\text{ფორ}}$ სიჩქარეზე.

დარსის ფორმულა (14.2) შეიძლება ასეთი სახითაც ჩავწეროთ:

$$\omega v = \omega k i_{ჯ}$$

ანუ

$$Q = k\omega i_{ჯ} . \tag{14.7}$$

(14.2) გამოსახულებიდან ჩანს, რომ ფილტრაციის კოეფიციენტი (k) ახასიათებს ფილტრაციის სიჩქარეს, როდესაც პიეზომეტრული ქანობი $i_{ჯ} = 1$-ს და აქვს სიჩქარის განზომილება. ამავე ფორმულიდან ისიც ჩანს, რომ ლამინარული ფილტრაციის სიჩქარე პირველი ხარისხის პიეზომეტრული ქანობის პროპორციულია.

დარსის ფორმულა (14.2 ან 14.7) გამოსახავს ფილტრაციის ძირითად კანონს გრუნტის წყლის **ლამინარული მოძრაობისათვის,** რომელიც ყველაზე უფრო ხშირად გვხვდება პრაქტიკაში. მაგრამ ჰიდროტექნიკური მშენებლობაში არის შემთხვევები, როცა მფილტრავი გარემო არის არა გრუნტი, არამედ ხელოვნური ყრილი, საკმაოდ დიდი ზომის ფორებით. ამ დროს ფილტრაციული ნაკადის დინება შეიძლება აღარ იყოს ლამინარული და მაშინ დარსის კანონიც გამოუყენებელი ხდება.

დარსის ფორმულის გამოყენების საზღვრები საკმარისად არ არის შესწავლილი, ამიტომ ლიტერატურაში გვხვდება მოძრაობის ლამინარული რეჟიმიდან ტურბულენტურში გადასვლის ერთმანეთისაგან განსხვავებული კრიტერიუმები. ერთ-ერთი კრიტერიუმის მიხედვით, თუ

$$\mathrm{Re} = \frac{vd}{\nu} < 1\cdots 7\,, \qquad (14.8)$$

მოძრაობა ლამინარულია, თუ $\mathrm{Re} > 1\cdots 7$, ტურბულენტური. ამ ფორმულაში ν არის ფილტრაციის სიჩქარე, d – გრუნტის მარცვლების საშუალო დიამეტრი.

ნ. პავლოვსკის გამოკვლევების თანახმად, მოძრაობა ლამინარულია, თუ

$$\mathrm{Re} = \frac{vd}{\nu(0{,}75p + 0{,}23)} < 7 \div 9\,. \qquad (14.9)$$

ტურბულენტური ფილტრაციის შემთხვევაში, ფილტრაციის სიჩქარე I ჰიდრავლიკური ქანობის $m < 1$ ხარისხის პროპორციულია:

$$v = K_{\text{ტ}} I^m\,, \qquad (14.10)$$

სადაც $K_{\text{ტ}}$ არის ტურბულენტური ფილტრაციის კოეფიციენტი $(0{,}5 \div 1)$ მ.

ლიტერატურაში მოცემულია შესაბამისი ექსპერიმენტული მასალა, რომელიც საშუალებას იძლევა დავადგინოთ $K_{\text{ტ}}$ კოეფიციენტის მნიშვნელობები გრუნტის საშუალო დიამეტრის მიხედვით.

რეინოლდსის რიცხვის შედარებით დიდი მნიშვნელობებისათვის m ხარისხის მაჩვენებელი შეიძლება მივიღოთ 0,5-ის ტოლად და მაშინ (14.10) ფორმულიდან გვექნება:

$$v = K_{\text{ტ}} \sqrt{I}\,. \qquad (14.11)$$

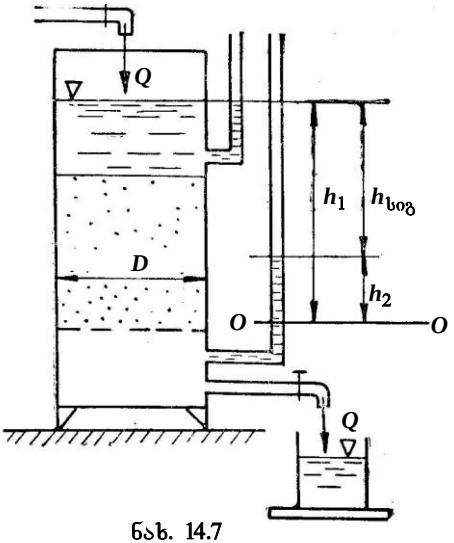
შევნიშნავთ, რომ ტურბულენტური ფილტრაციის შემთხვევაში $i_{\text{ჰ}} \neq I$, რადგანაც ფილტრაციის სიჩქარე შედარებით დიდია და $\alpha v^2/2g$ სიჩქარითი დაწნევა უნდა იქნეს გათვალისწინებული. ამიტომ არის, რომ (14.10) და (14.11) გამოსახულებებში შედის ჰიდრავლიკური (I) და არა პიეზომეტრული ($i_{\text{ჰ}}$) ქანობი.

(14.8) და (14.9) დამოკიდებულებებიდან, იმის გათვალისწინებით, რომ ფორიანობის კოეფიციენტი $p = 0{,}3\cdots 0{,}5$, წყლის სიბლანტის კინემატიკური კოეფიციენტი $\nu \approx 0{,}01$ სმ²/წმ ($t = 20°C$ ტემპერატურისას), ხოლო წვრილმარცვლოვანი გრუნტების ნაწილაკთა დიამეტრი 1–2 მმ-ზე ნაკლებია, შეიძლება დავადგინოთ, რომ ლამინარული ფილტრაციის შემთხვევაში ფილტრაციის სიჩქარე უმნიშვნელოა და იზომება წამში რამდენიმე მილიმეტრის რიგის სიდიდეებით.

ფილტრაციის კოეფიციენტის თეორიული გზით განსაზღვრა ძალზე რთულია. ამიტომ, მის მნიშვნელობას ადგენენ ემპირიული დამოკიდებულებებით ან ლაბორატორიაში გრუნტის ნიმუშების

გამოცდით, ან საველე პირობებში სპეციალური გამოკვლევებით.

საველე მეთოდის არსი შემდეგში მდგომარეობს: ფილტრაციულ ნაკადთან დაკავშირებული სპეციალური ჭიდან (შურფიდან) ამოტუმბავენ ან ჩატუმბავენ წყალს, რითაც ხელოვნურად ცვლიან გრუნტის წყლის დეპრესიის წირის სახეს. ამ წირის პარამეტრების გაზომვის მონაცემების საფუძველზე სპეციალური ფორმულებით გამოითვლიან ფილტრაციის მნიშვნელობას. საველე მეთოდი ფილტრაციის კოეფიციენტის განსაზღვრის სხვა მეთოდებთან შედარებით ზუსტია, რადგანაც ამ დროს გრუნტი იმყოფება ბუნებრივ მდგომარეობაში, არ ხდება მისი სტრუქტურული რღვევა.



ნახ. 14.7

ლაბორატორიული მეთოდით ფილტრაციის კოეფიციენტის მნიშვნელობას გამოითვლიან დარსის ხელსაწყოს (ნახ. 14.7) მეშვეობით. გრუნტის ნიმუშს ათავსებენ ცილინდრში, რომელშიც გაედინება რაიმე Q ხარჯი. აითვლიან $h_{\text{სიგ}} = h_1 - h_2$ ვარდნილს (დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგს) და რომელიმე წესით (ვთქვათ, მოცულობითი წესით) ზომავენ Q ხარჯს. ფილტრაციის კოეფიციენტი განისაზღვრება (14.7) ფორმულიდან:

$$K = \frac{Q}{\omega i_{\text{ვ}}}.$$

გრუნტის ნიმუში ლაბორატორიულ გამოცდამდე ხშირად კარგავს პირვანდელ (ბუნებრივ) სტრუქტურას, ამიტომ ფილტრაციის კოეფიციენტის მიღებული მნიშვნელობა შეიძლება მთლად ზუსტი არ აღმოჩნდეს.

K კოეფიციენტის გამოსათვლელად პრაქტიკაში ხშირად სარგებლობენ ბაზენის **ემპირიული** ფორმულით:

$$K = 0{,}75d(0{,}70 \div 0{,}03t^\circ). \qquad (14.11)$$

§ 14.3. გრუნტის წყლების თანაბარი მოძრაობა

გრუნტის წყლების თანაბარი მოძრაობისას ჰიდრავლიკური და პიეზომეტრული ქანობები წყალშეუღწევი შრის i ქანობის (ნახ. 14.3) ტოლია:

$$I = i_ჳ = i \,. \tag{14.13}$$

ამ შემთხვევაში

$$Q = \omega k i \,. \tag{14.14}$$

ბრტყელი ამოცანის პირობებში $\omega = bh_0$ და თანაბარი მოძრაობის შესაბამისი სიღრმე

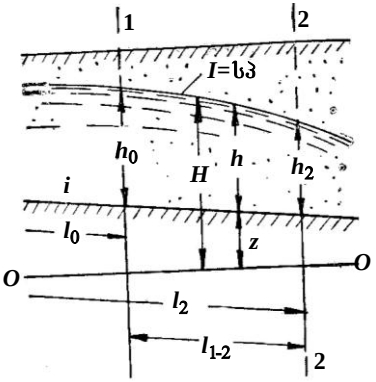
$$h_0 = \frac{Q}{bki} = \frac{q}{ki} \,, \tag{14.15}$$

სადაც $q = \dfrac{Q}{b}$ არის ხარჯი ნაკადის ერთეულ სიგანეზე (კუთრი ხარჯი).

გრუნტის წყლების თანაბარი უდაწნეო მოძრაობა პრაქტიკაში იშვიათად გვხვდება.

§ 14.4. გრუნტის წყლების არათანაბარი მოძრაობა

გრუნტის წყლების არათანაბარი მოძრაობისას ნაკადის სიღრმე სიგრძეზე იცვლება (ნახ. 14.8), მაშასადამე, ნებისმიერ კვეთში გვექნება დეპრესიის წირის განსხვავებული ქანობი:



ნახ. 14.8

$$i_ჳ = -\frac{dH}{d\ell} \,, \tag{14.16}$$

სადაც H არის პიეზომეტრული დაწნევა საფარდ სიბრტყეზე.

იმის გამო, რომ $h = z + h$ (სადაც z არის წყალშეუღწევი შრის ნიშნული, ხოლო h – ფილტრაციული ნაკადის სიღრმე), ამიტომ (14.16) გამოსახულებიდან

$$i_ჳ = -\frac{d}{d\ell}(z + h) = -\frac{dz}{d\ell} - \frac{dh}{d\ell} \,,$$

ანუ

$$i_ჳ = i - \frac{dh}{d\ell} \,. \tag{14.17}$$

ამ უკანასკნელის გათვალისწინებით (14.7) განტოლება ასეთ სახეს მიიღებს:

$$Q = k\omega\left(i - \frac{dh}{d\ell}\right) \tag{14.18}$$

ან ბრტყელი ამოცანის პირობებში

$$q = kh\left(i - \frac{dh}{d\ell}\right). \tag{14.19}$$

(14.19) გამოსახულება არის **პრიზმულ კალაპოტში გრუნტის წყლების არათანაბარი მდოვრედ ცვალებადი მოძრაობის ძირითადი დიფერენციალური განტოლება** (პირველი სახე). ინტეგრირების გასამარტივებლად მას სხვა სახე მივცეთ. ამისათვის q ხარჯი (14.15) ფორმულიდან გამოვსახოთ h_0 ნორმალური სიღრმის მეშვეობით და შევიტანოთ (14.19) განტოლებაში

$$kh_0 i = kh\left(i - \frac{dh}{d\ell}\right)$$

საიდანაც

$$\frac{dh}{d\ell} = i\frac{h - h_0}{h}. \tag{14.20}$$

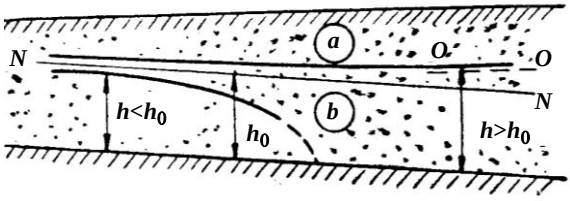
ეს უკანასკნელი არის **გრუნტის წყლების მოძრაობის ძირითადი დიფერენციალური განტოლების მეორე სახე.** როგორც ვხედავთ, ამ განტოლებაში არ შედის ფილტრაციის კოეფიციენტი, მაშასადამე, თავისუფალი ზედაპირის ფორმა (ან, რაც იგივეა, დეპრესიის წირის ფორმა) დამოკიდებულია მხოლოდ სასაზღვრო პირობებზე.

§ 14.5. ფილტრაციული ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ფორმები

განვიხილოთ თავისუფალი ზედაპირის შესაძლო ფორმები, გრუნტის წყლების პრიზმულ კალაპოტში არათანაბარი მდოვრედ ცვალებადი მოძრაობისას, როცა წყალშეუღწევი ფსკერის (შრის) ქანობი $i > 0$, $i = 0$ და $i < 0$.

1. **ფსკერის ქანობი დადებითია** $(i > 0)$. ფილტრაციული ნაკადის არეში გავატაროთ h_0 ნორმალური სიღრმის შესაბამისი N-N წირი (ნახ. 14.9), რომელიც მას ორ a და b ზონად გაყოფს. აქ c ზონა არ გვექნება, რადგან, როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ (§12.1), გრუნტის წყლის ნაკადისათვის კრიტიკული სიღრმე ყოველთვის პრაქტიკულად ნულის ტოლია და ამიტომ კრიტი-

კული სიღრმის შესაბამისი *K-K* წირი შეთავსებულია ფსკერის წირთან.



ნახ. 14.9

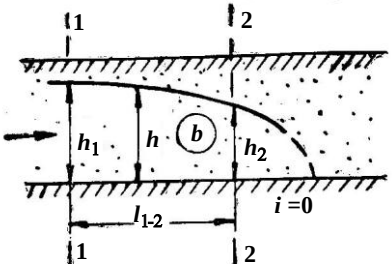
a ზონაში h სიღრმე h_0 ნორმალურ სიღრმეზე მეტია $(h > h_0)$. ამიტომ (14.20) განტოლებიდან მივიღებთ $dh/d\ell > 0$. მაშასადამე, განსახილველ შემთხვევაში ნაკადის თავისუფალ ზედაპირს ექნება **შეტბორვის წირის** სახე. როცა $h \to h_0$, $dh/d\ell \to 0$, ხოლო როცა $h \to \infty$, $dh/d\ell \to i$. ეს ნიშნავს, რომ შეტბორვის წირი მოძრაობის საწინააღმდეგო მიმართულებით ასიმპტოტურად უახლოვდება *N-N* წირს, ხოლო მოძრაობის მიმართულებით – *O-O* ჰორიზონტალურ წირს.

b ზონაში $h < h_0$, ამიტომ (14.20) განტოლებიდან $dh/d\ell < 0$, ე.ი. ფილტრაციული ნაკადის სიღრმე დინების მიმართულებით მცირდება. მაშასადამე, ამ შემთხვევაში თავისუფალ ზედაპირს ექნება **დაცემის წირის** სახე. როცა $h \to h_0$, $dh/d\ell \to 0$, ხოლო, როცა $h \to 0$, $dh/d\ell \to \infty$. ეს ნიშნავს, რომ დაცემის წირის ზედა ნაწილი ასიმპტოტურად უახლოვდება *N-N* წირს, ხოლო ქვედა ნაწილი – მკვეთრად ეშვება ქვემოთ.

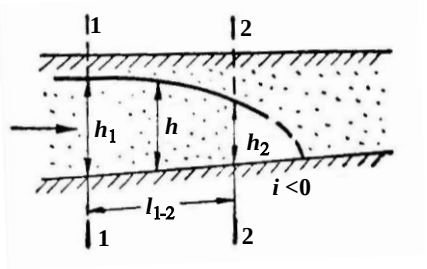
2. **ფსკერი ჰორიზონტალურია** $(i = 0)$. შევნიშნავთ, რომ ნულოვანი ქანობისას თანაბარი მოძრაობა საერთოდ შეუძლებელია; ამ დროს $h_0 \to \infty$ და, მაშასადამე, *a* ზონა გადადის უსასრულობაში. გვექნება მხოლოდ ერთი *b* ზონა. (14.19) განტოლებიდან, იმის გათვალისწინებით, რომ $i = 0$-ს, მივიღებთ:

$$q = -kh\frac{dh}{d\ell},$$

საიდანაც $dh/d\ell < 0$. ამგვარად, განსახილველ შემთხვევაში გვექნება **დაცემის წირი** (ნახ. 14.10).



ნახ. 14.10



ნახ. 14.11

3. **ფსკერის ქანობი უარყოფითია** $(i<0)$. იგივე (14.19) განტოლებიდან, როცა $i<0$, მიიღებთ:

$$\frac{dh}{d\ell}=i-\frac{q}{kh}<0\,.$$

მაშასადამე, გვექნება **დაცემის წირი** (ნახ. 14.11).

§ 14.6. არათანაბარი მდოვრედ ცვალებადი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლების ინტეგრირება (ბრტყელი ამოცანა)

1. **ფსკერის ქანობი დადებითია** $(i>0)$. (14.20) განტოლებიდან ცვლადთა დაცალკევებით მივიღებთ:

$$id\ell=\frac{hdh}{h-h_0}=\frac{(h-h_0)+h_0}{h-h_0}dh=dh+h_0\frac{dh}{h-h_0}\,. \qquad (14.21)$$

ამ უკანასკნელის ინტეგრირებით

$$i(\ell_2-\ell_1)=h_2-h_1+h_0\ln\frac{h_2-h_0}{h_1-h_0}\,. \qquad (14.22)$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ $\ell_2-\ell_1=\ell_{1-2}$ (ნახ. 14.8) და ნატურალური ლოგარითმიდან გადავალთ ათობითზე, გვექნება:

$$i(\ell_2-\ell_1)=h_2-h_1+h_0\lg\frac{h_2-h_0}{h_1-h_0}\,. \qquad (14.23)$$

მიღებულ გამოსახულებას ხშირად ასეთი სახით წერენ:

$$\frac{i\ell_{1-2}}{h_0}=\eta_2-\eta_1+2{,}3\lg\frac{\eta_2-1}{\eta_1-1}\,, \qquad (14.24)$$

სადაც $\eta=h/h_0$ არის ფარდობითი სიღრმე $(\eta_1=h_1/h_0\,;\ \eta_2=h_2/h_0)$.

(14.24) გამოსახულება არის ფილტრაციული ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის წირის (დეპრესიის წირის) განტოლება პირდაპირი ქანობის ($i > 0$) შემთხვევაში. მისი საშუალებით შეიძლება გადავწყვიტოთ იგივე ტიპის ამოცანები, როგორიც ღია მიწისზედა ნაკადებისათვის გვქონდა.

2. **ფსკერი ჰორიზონტალურია** ($i = 0$). ნულოვანი ქანობისას (14.19) განტოლებიდან გვექნება:

$$\frac{dh}{d\ell} = -\frac{q}{kh},$$

საიდანაც

$$d\ell = -\frac{k}{q} hdh. \tag{14.25}$$

ამ უკანასკნელის ინტეგრირებით

$$\ell_{1-2} = \ell_2 - \ell_1 - \frac{k}{q}\frac{h_2^2 - h_1^2}{2}. \tag{14.26}$$

(14.26) გამოსახულებას ხშირად **დიუპუის განტოლებას** უწოდებენ.

3. **ფსკერის ქანობი უარყოფითია** ($i < 0$). უკუქანობის ($i < 0$) აბსოლუტური მნიშვნელობა აღვნიშნოთ i'-ით, ხოლო შესაბამისი ნორმალური სიღრმე h_0'-ით[3]. მაშინ (14.20) განტოლებიდან გვექნება:

$$i'd\ell = -\frac{hdh}{h + h_0'} = -\frac{(h + h_0') - h_0'}{h + h_0'} dh = -dh + h_0' \frac{dh}{h + h_0'}. \tag{14.27}$$

ამ უკანასკნელის ინტეგრირებით

$$i'\ell_{1-2} = h_1 - h_2 + 2{,}3h_0' \lg \frac{h_2 + h_0'}{h_1 + h_0} \tag{14.28}$$

ანუ

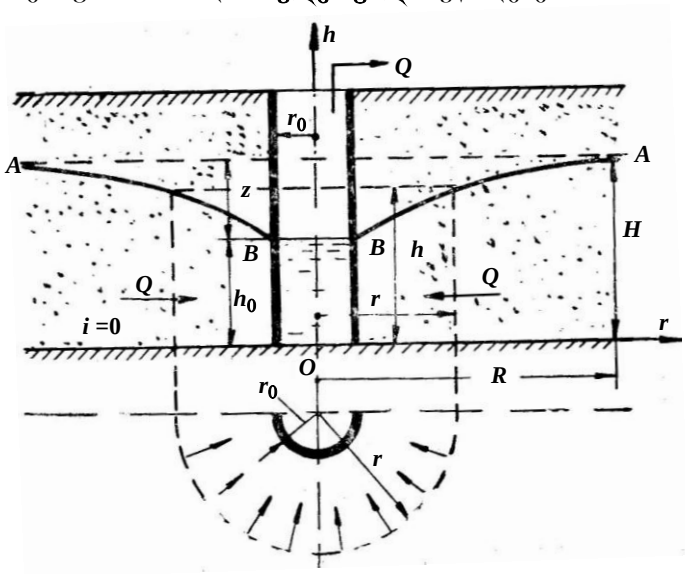
$$\frac{i'\ell_{1-2}}{h_0'} = \eta_2' - \eta_1' + 2{,}3 \lg \frac{\eta_2' + 1}{\eta_1' + 1}. \tag{14.29}$$

სადაც $\eta' = h/h_0'$ არის ფარდობითი სიღრმე ($\eta_1' = h_1/h_0'$; $\eta_2' = h_2/h_0'$).

[3] ცხადია, h_0' სიღრმე ფიქტიურია, ეს ისეთი თანაბარი მოძრაობის შესაბამისი სიღრმეა, რომელიც დამყარდებოდა უკუქანობიან კალაპოტში გრუნტის წყალს საწინააღმდეგო მიმართულებით რომ ემოძრავა.

§ 14.7. გრუნტის წყლის მოდინება სრულყოფილ სადრენაჟო ჭასთან

განვიხილოთ გრუნტის წყლის მოდინება ცილინდრულ სადრენაჟო ჭასთან, რომელიც დადის წყალშეუღწევ შრემდე (ნახ. 14.12). ასეთ ჭას ხშირად **სრულყოფილს** უწოდებენ.



ნახ. 14.12

წარმოვიდგინოთ, რომ გრუნტის წყლოვანი ფენა ქვემოდან შემოსაზღვრულია ჰორიზონტალური წყალშეუღწევი შრით. ასეთ პირობებში გრუნტის წყლის ბუნებრივი დონე დაიკავებს *A-A* **ჰორიზონტალურ** მდებარეობას. *H* მანძილი ამ დონიდან წყალშეუღწევ შრემდე განსაზღვრავს წყლით გაჯერებული გრუნტის სისქეს, რომელსაც **წყლოვანი ფენის სიმძლავრეს** უწოდებენ.

ახლა წარმოვიდგინოთ, რომ *H* სიმძლავრის წყლოვან ფენაში წყალშეუღწევ შრემდე გადის ვერტიკალური ცილინდრული ჭა, რომლის კედლები მთელ სიმაღლეზე **წყალშეღწევადია**.

თუ ასეთი ჭიდან დავიწყებთ წყლის გარკვეული $Q = const$ ხარჯის ამოტუმბვას, მაშინ დონე როგორც ჭაში, ისე მის მახლობლობაში დაიწევს, რის გამოც ჭის ირგვლივ წარმოიქმნება **დეპრესიული ძაბრი,** რომელსაც, ერთგვაროვანი გრუნტის

შემთხვევაში, სიმეტრიული ფორმა ექნება; ძაბრი დეპრესიის წირის (*AB*) ბრუნვის ზედაპირია ჭის ვერტიკალური ღერძის გარშემო.

თუ ამოტუმბვის მუდმივი *Q* ხარჯი არ აღემატება იმ ხარჯს, რომელსაც იძლევა წყლოვანი ფენა, მაშინ, დროის გარკვეული შუალედის შემდეგ, ჭასა და დეპრესიულ ძაბრში წყლის დონე დაიკავებს, დროის მიხედვით, უცვლელ მდებარეობას. შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ ამ მომენტიდან გრუნტის წყლის მოძრაობა **დამყარებულია**.

გრუნტის წყლის ნაკადის ცოცხალი კვეთები იქნება თანაღერძული ვერტიკალური ცილინდრები შესაბამისი *r* რადიუსით.

აღვნიშნოთ r_0-ით ჭის რადიუსი, ხოლო *R*-ით ე.წ. **ჭის მოქმედების რადიური,** რომლის იქითაც ჭის გავლენა პრაქტიკულად არ მუდავნდება (წყლის დონე რჩება ბუნებრივ მდგომარეობაში). *Oh* და *Or* კოორდინატთა ღერძები მივმართოთ ისე, როგორც ეს 14.12 ნახაზზეა ნაჩვენები.

ჩვენი ამოცანაა ვიპოვოთ ფილტრაციის *Q* ხარჯი (ჭის დებიტი) და დეპრესიის წირის (*AB*) განტოლება.

r-რადიუსიანი მერიდიანული კვეთისათვის ნაკადის სიღრმე *h*-ის ტოლია, ხოლო ცოცხალი კვეთის ფართობი გამოითვლება ფორმულით

$$\omega = 2\pi rh .$$

რადგანაც წყალშეუღწევი შრის ქანობი ნულის ტოლია, ამიტომ დეპრესიის წირის ქანობი (პიეზომეტრული ქანობი)

$$i_{პ} = \frac{dh}{dr} .$$

მაშინ (14.7) განტოლება, აღნიშნულის გათვალისწინებით, ასეთ სახეს მიიღებს:

$$Q = 2\pi rhk\frac{dh}{dr} . \qquad (14.30)$$

ცვლადთა დაცალკევებით გვექნება:

$$\frac{Q}{2\pi k}\frac{dr}{r} = hdh . \qquad (14.31)$$

ამ დიფერენციალური განტოლების ინტეგრირებით (*r*-ის ცვლილების საზღვრებში – $r = r_0$-დან $r = R$-მდე) ვღებულობთ

$$\frac{Q}{2\pi k}\ln\frac{R}{r_0} = \frac{H^2 - h_0^2}{2} ,$$

საიდანაც

$$Q = \pi k \frac{H^2 - h_0^2}{\ln \frac{R}{r_0}} . \qquad (14.32)$$

ნატურალური ლოგარითმიდან ათობითზე გადასვლით მივიღებთ:

$$Q = 1{,}36 \frac{H^2 - h_0^2}{\ln \frac{R}{r_0}} . \qquad (14.33)$$

ეს გამოსახულება გრუნტის წყლის ჭასთან მოდინების ხარჯის გამოსათვლელი ფორმულაა.

დეპრესიის წირის განტოლებას მივიღებთ (14.31) დიფერენციალური განტოლების ინტეგრირებით r-ის და h-ის ცვლილების საზღვრებში, შესაბამისად, r_0-დან r-ის ნებისმიერ მნიშვნელობამდე და h_0-დან h სიღრმემდე:

$$\frac{Q}{2\pi k} \ln \frac{r}{r_0} = \frac{h^2 - h_0^2}{2} , \qquad (14.34)$$

საიდანაც ნატურალური ლოგარითმის ათობითი შეცვლის შედეგად მივიღებთ:

$$h = \sqrt{h_0^2 + 0{,}73 \frac{Q}{K} \lg \frac{r}{r_0}} . \qquad (14.35)$$

თუ ამ ფორმულაში r-ს მივცემთ სხვადასხვა მნიშვნელობას, ვიპოვით შესაბამის h სიღრმეებს, რომელთა მიხედვით ავაგებთ დეპრესიის AB წირს.

Q ხარჯის გამოსათვლელად და დეპრესიის წირის ასაგებად უნდა ვიცოდეთ ჭის მოქმედების რადიუსი (R). პრაქტიკაში მას გრუნტის სახეობის მიხედვით იღებენ 250÷1000 მ-ის ტოლად ან გამოითვლიან ზიხარდის ემპირიული დამოკიდებულებით:

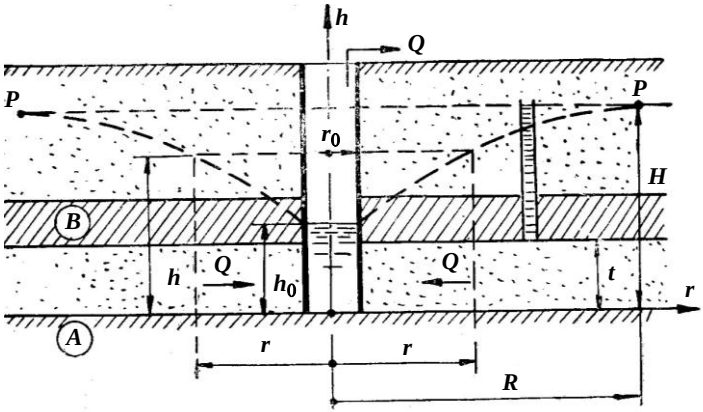
$$R = 3000 Z \sqrt{k} , \qquad (14.36)$$

სადაც $Z = H - h_0$ არის ჭაში წყლის დონის დაწევის სიდიდე (ამოტუმბვის სიღრმე), მ; K – ფილტრაციის კოეფიციენტი, მ/წმ.

უფრო ზუსტად, R-ის მნიშვნელობა შეიძლება დადგინდეს ჰიდროგეოლოგიური ძიების საფუძველზე.

§ 14.8. გრუნტის წყლის მოდინება სრულყოფილ არტეზიულ ჭასთან

არტეზიულ ჭასთან გრუნტის წყლის მოდინება ხდება წყლოვანი ფენიდან, რომელიც ზემოდან და ქვემოდან შემოსაზღვრულია გრუნტის წყალშეუღწევი *A* და *B* შრეებით (ნახ. 14.13). წყალი ასეთ ფენაში იმყოფება ატმოსფერულზე მეტი წნევის ქვეშ და ატარებს **არტეზიული წყლის** სახელწოდებას.



ნახ. 14.13

თუ *B* შრეში ჭაბურღილს გავჭრით, გრუნტის წყალი მასში აიწევს *P-P* ჰორიზონტალურ წირამდე. ეს უკანასკნელი არის გრუნტის წყლის ბუნებრივი დაწნევის წირი.

ჭიდან წყლის ამოტუმბვისას მის გარშემო წარმოიქმნება დეპრესიული ძაბრი, ამასთან დეპრესიის წირი მოცემულ შემთხვევაში იქნება დაწნევის და არა თავისუფალი ზედაპირის წირი. ამ წირის აგება შესაძლებელია მხოლოდ წყლოვან ფენამდე გაჭრილი ჭაბურღილების საშუალებით.

გრუნტის წყლის ცოცხალი კვეთების სიმაღლე განსახილველ შემთხვევაში მუდმივია და ის წყლოვანი ფენის *t* სიმძლავრის ტოლია:

$$\omega = 2\pi rh .$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ პიეზომეტრული ქანობი

$$i_3 = \frac{dh}{dr}$$

მაშინ ფილტრაციის ძირითადი კანონი (14.7) ასეთ სახეს მიიღებს:

$$Q = 2\pi rhk\frac{dh}{dr}$$

ანუ

$$\frac{Q}{2\pi k}\frac{dr}{r} = dh\,. \tag{14.37}$$

ამ უკანასკნელის ინტეგრირებისას r-ის და h-ის ცვლილების საზღვრებში, შესაბამისად, r_0-დან r-მდე და h_0-დან h-მდე (ნახ. 14.13) მივიღებთ:

$$\frac{Q}{2\pi kt}\ln\frac{r}{r_0} = h - h_0 \tag{14.38}$$

ანუ

$$0{,}37\frac{Q}{kt}\lg\frac{r}{r_0} = h - h_0\,. \tag{14.39}$$

ამ განტოლებით შეიძლება ავაგოთ დაწნევის წირი.

არტეზიული ჭის დებიტს გამოვითვლით (14.39) განტოლებიდან, თუ დავუშვებთ, რომ $h = 0$ და $r = R$

$$Q = 2{,}73kt\frac{H - h_0}{\lg\dfrac{R}{r_0}}\,, \tag{14.40}$$

სადაც R არის ჭის მოქმედების რადიუსი.

§ 14.9. გრუნტის წყლის მოდინება წყალსაკრებ გალერეასთან

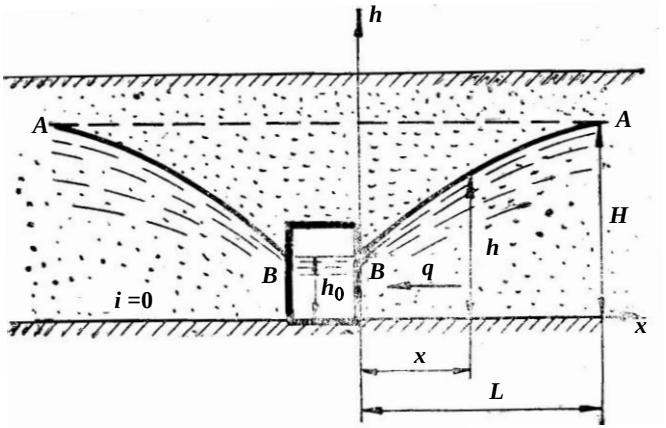
ვიგულისხმოთ, რომ წყალსაკრები გალერეის განივკვეთი სწორკუთხედის ფორმისაა და მისი ფსკერი ჰორიზონტალურ წყალშეუღწევ შრესთან არის შეთავსებული (ნახ. 14.14). გალერეის მოწყობის შემდეგ დროთა განმავლობაში გრუნტის წყლის ზედაპირი ღებულობს დეპრესიის AB წირის ფორმას. ამასთან წყალი, რომელიც გალერეაში ორი მხრიდან (მარცხნიდან და მარჯვნიდან) შემოდის, მასში უნდა გაედინებოდეს. ამიტომ, გალერეას აძლევენ გარკვეულ გრძივ ქანობს.

აღვნიშნოთ q-თი გრუნტის წყლის **ცალმხრივი** მოდინება (ვთქვათ, მარჯვენა მხრიდან) გალერეის სიგრძის ერთეულზე (განიხილება ბრტყელი ამოცანა). კოორდინატთა ღერძები მივმართოთ ისე, როგორც ეს 14.14 ნახაზზეა ნაჩვენები. მაშინ წყალსაკრებ გალერეასთან მოდინებული q კუთრი ხარჯის გამოსათვლელად

შეიძლება ვისარგებლოთ (14.26) განტოლებით, რომელსაც მოცემული შემთხვევისათვის ასეთი სახე ექნება:

$$\frac{q}{k}x = \frac{h^2 - h_0^2}{2}, \tag{14.41}$$

სადაც h_0 არის წყლის სიღრმე გალერეაში; h – სიღრმე ფილტრაციული ნაკადის ნებისმიერ კვეთში, რომელიც გალერეასთან x მანძილითაა დაცილებული.



ნახ. 14.14

(14.41) გამოსახულებიდან ადვილად მივიღებთ დეპრესიის წირის განტოლებას

$$h = \sqrt{2\frac{q}{k}x + h_0^2}\ . \tag{14.42}$$

თუ ამ განტოლებაში x-ს მივცემთ სხვადასხვა მნიშვნელობას, ვიპოვით შესაბამის h სიღრმეებს, რომელთა მიხედვითაც ავაგებთ დეპრესიის AB წირს.

q ხარჯის გამოსათვლელად ვიგულისხმოთ, რომ $h = H$-ს და $x = L$-ს, მაშინ (14.41) გამოსახულებიდან

$$q = k\frac{h^2 - h_0^2}{2L}, \tag{14.43}$$

სადაც L არის ე.წ. **გალერეის გავლენის სიგრძე,** ე.ი. მანძილი, რომელზედაც ვრცელდება გალერეის დამშრობი მოქმედება.

L სიგრძე გარკვეული მიახლოებით შეიძლება გამოვთვალოთ ფორმულით:

$$L = \frac{H - h_0}{I_{საშ}}, \qquad (14.44)$$

სადაც $I_{საშ}$ არის დეპრესიის წირის საშუალო ქანობი, რომელიც დამოკიდებულია გრუნტის სახეზე. იგი იცვლება 0,15-დან (თიხისათვის) 0,003-მდე (მსხვილი ქვიშისათვის).

§ 14.10. ფილტრაცია მიწის კაშხლებზე (ზღუდარებში)

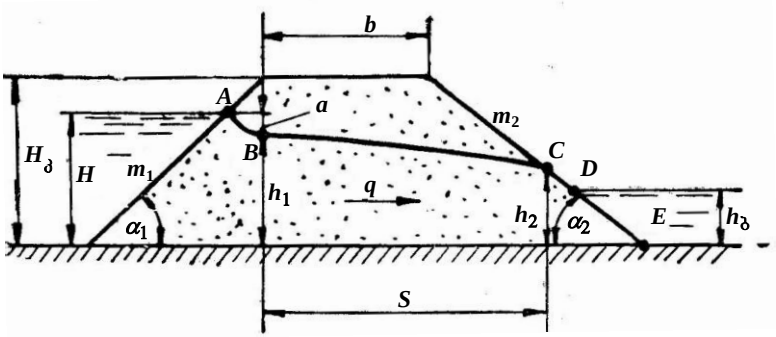
წყალდიდობის ხარჯების გატარება ხიდის ნახვრეტში საკმაოდ რთულ მოვლენათა კომპლექსით ხასიათდება. ერთ-ერთი მათგანია წყლის ფილტრაციული მოძრაობა მიწაყრილის (კაშხლის, ზღუდარის) ტანში. შევნიშნავთ, რომ საგზაო მიწაყრილი ხშირად ასრულებს მიწის კაშხლის ფუნქციას, რის გამოც მოგვყავს ამ უკანასკნელის ფილტრაციული გაანგარიშება.

1. **ფილტრაცია ერთგვაროვან მიწის კაშხალში (წყალშეუღწევი ფუძით).** კაშხალს უწოდებენ **ერთგვაროვანს,** თუ ის ერთგვაროვანი გრუნტითაა ნაგები და, მაშასადამე, ხასიათდება ფილტრაციის მუდმივი K კოეფიციენტით.

წყალსაცავში წყლის წნევა ზედა ფერდოს პერპენდიკულარულად არის მიმართული, ამიტომ ფილტრაციული ნაკადი კაშხლის ტანში ასევე მართ კუთხეს ადგენს. შემდეგ მისი დენის წირები და ზედაპირი AB უბანზე ჩაზნექილი მრუდის წირის სახეს ღებულობს (ნახ. 14.15). BC უბანზე დეპრესიის წირს წყალსაკრებ გალერეასთან მოდინებული ფილტრაციული ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის მსგავსი ამოზნექილი ფორმა აქვს და მათემატიკურად გამოისახება დიუპუის (12.26) განტოლებით. C წერტილის შემდეგ ფილტრაციული ნაკადი გამოდის გამოსოლვის CD უბანზე, ხოლო ნაწილი – ფერდოს შემოტბორილ DE უბანზე. კერძო შემთხვევაში, როცა ქვედა ბიეფში წყლის დონე ნულის ტოლია ($h_ბ = 0$), გამოსოლვის უბანი იქნება მთლიანად CE მონაკვეთი. კაშხლის ტანში გამავალი ფილტრაციული ნაკადის დენის წირებიდან ყველაზე ზემოთ მდებარე ABC წირი დეპრესიის წირია.

აღნიშნულიდან ჩანს, რომ მიწის კაშხლის სხვადასხვა უბანზე ფილტრაციული ნაკადი ხასიათდება სხვადასხვა თავისებურებით.

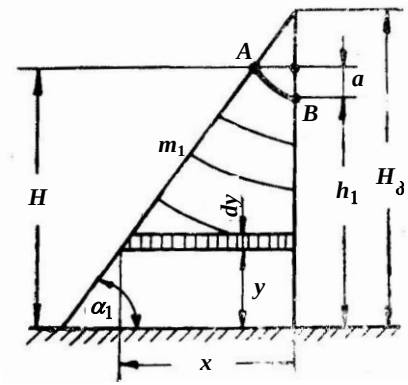
მიწის კაშხლების ფილტრაციის გაანგარიშების მრავალი მიახლოებითი მეთოდი არსებობს. ქვემოთ განვიხილავთ ნ. პავლოვსკის მეთოდს, რომელიც ეყრდნობა ფილტრაციული ნაკადის AB, BC და CE უბნების შესაბამის **სოლებად** დაყოფას.



ნახ. 14.15

გამოვარკვიოთ წყლის ფილტრაციის თავისებურებანი თითოეულ სოლში.

ზედა სოლი. იგი შემოსაზღვრულია კაშხლის ზედა ფერდოთი და იმ *B* წერტილში გამავალი ვერტიკალური სიბრტყით, რომელშიც ხდება დეპრესიის წირის ჩაზნექილი და ამოზნექილი უბნების შეუღლება. იგულისხმება, რომ *B* წერტილი ძევს კაშხლის კიდეზე გამავალ ვერტიკალზე (ნახ. 14.16).



ნახ. 14.16

ზედა ფერდოზე *A* წერტილის მდებარეობა განისაზღვრება *H* დაწნევით, ხოლო *B* წერტილის – h_1 ორდინატით. მაშინ დაწნევის დანაკარგი *AB* უბნისათვის იქნება:

$$a = H - h_1 . \qquad (14.45)$$

ჩავთვალოთ, რომ *a* სიდიდე მუდმივია ზედა სოლში გამავალი ფილტრაციული ნაკადის ყველა სხვა დენის წირისთვისაც (14.16 ნახაზზე დენის წირები ნაჩვენებია მრუდი წირების სახით). ამ უკანასკნელს აქვს სხვადასხვა სიგრძე და მით გრძელია, რაც ქვემოთ მდებარეობს. ამოცანის გამარტივების მიზნით მრუდწირულ დენის წირებს ცვლიან ჰორიზონტალური წრფეებით. ცხადია, ეს სინამდვილეს არ შეესაბამება, რადგან, როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ფილტრაციული ნაკადი კაშხლის ტანში მართი კუთხით შედის. მიუხედავად ამისა, აღმოჩნდა, რომ

ასეთი დაშვება საბოლოო შედეგზე დიდ გავლენას არ ახდენს, რადგან მიწის კაშხლები, ჩვეულებრივ, იგება ჰორიზონტალური ფენების დატკეპნით, რის გამოც ჰიდრავლიკური წინაღობების სიდიდე მრუდწირულ გზაზე უახლოვდება წინაღობების სიდიდეს უფრო გრძელ ჰორიზონტალურ გზაზე. მაშინ ასეთი ჰორიზონტალური წირის (14.16 ნახაზზე ის დაშტრიხულია) შემომფარგვლელი dy სისქის ელემენტარული ჭავლის სიგრძე შეიძლება განვსაზღვროთ ფორმულით:

$$x = m_1(H_ჯ - y)\,, \tag{14.46}$$

სადაც $m = ctg\alpha_1$ არის ზედა ფერდის კოეფიციენტი;

$H_ჯ$ – კაშხლის სიმაღლე;

y – განსახილველი ჭავლის დაცილება კაშხლის ფუძიდან.

აღნიშნულის გათვალისწინებით, პიეზომეტრული ქანობი იქნება:

$$i_ჯ = \frac{a}{x} = \frac{a}{m_1(H_ჯ - y)}\,. \tag{14.47}$$

კაშხლის ერთეული სიგანისათვის ელემენტარული ჭავლის ფართობი ტოლია:

$$d\omega = dy \cdot 1 = dy\,. \tag{14.48}$$

მაშინ (14.7) განტოლებიდან მივიღებთ:

$$dq = \frac{Ka}{m_1} \cdot \frac{dy}{H_ჯ - y}\,. \tag{14.49}$$

ამ განტოლების ინტეგრირებით y-ის ცვლილების საზღვრებში ($y = h_1$-დან $y = 0$-მდე) მივიღებთ:

$$q = \frac{Ka}{m_1}\int_{h_1}^{0} \frac{dh}{H_ჯ - y} = \frac{Ka}{m_1}\ln\frac{H_ჯ}{H_ჯ - h_1} \tag{14.50}$$

ანუ

$$q = 2{,}3K\frac{H - h_1}{m_1}\lg\frac{H_ჯ}{H_ჯ - h_1}\,. \tag{14.51}$$

შუა სოლი. ამ უბანზე (ნახ. 14.15) მყარდება არათანაბარი მდოვრედ ცვალებადი მოძრაობა, რომელიც ხასიათდება (14.26) განტოლებით

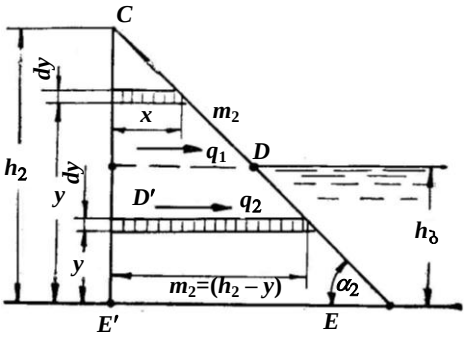
$$q = K\frac{h_1^2 - h_2^2}{S}\,, \tag{14.52}$$

სადაც S არის შუა სოლის სიგრძე, ე.ი. მანძილი B და C წერტილებზე გატარებულ ცოცხალ კვეთებს შორის. იგი განისაზღვრება ფორმულით:

$$S = b + m_2(H_ბ - h_2). \qquad (14.53)$$

აქ b არის კაშხლის თხემის სიგანე; $m_2 = ctg\alpha_2$ – ქვედა ფერდოს კოეფიციენტი; h_2 - სიღრმე C წერტილზე გამავალ კვეთში.

დეპრესიის წირის განტოლებას ასეთი სახე აქვს:



ნახ. 14.17

$$\frac{2q}{K}x = h_1^2 - y^2. \qquad (14.54)$$

ქვედა სოლი. ამ უბნისათვის ქვედა სოლს ვყოფთ ორ ზონად: ზედა CDD' სამკუთხედად, რომლიდანაც q_1 ფილტრაციული ხარჯი გამოდის ატმოსფეროში ქვედა ფერდოს CD გამოსოლვის უბნის გავლით და ქვედა $D'DEE'$ ტრაპეციად, რომლიდანაც q_2 ფილტრაციული ხარჯი DE გამოსოლვის უბნიდან გამოედინება ქვედა ბიეფის დონის ქვემოთ (ნახ. 14.17). შევნიშნავთ, რომ ფილტრაციული ჭავლების მიმართულება აქაც, როგორც ზედა სოლში, იგულისხმება ჰორიზონტალური.

ქვედა სოლის ჯამურ ფილტრაციული ხარჯი იქნება:

$$q = q_1 + q_2. \qquad (14.55)$$

განვსაზღვროთ q_1 და q_2. CCD' ზონისათვის პიეზომეტრული ქანობი გამოითვლება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$i_ჳ = \frac{h_2 - y}{x} = \frac{h_2 - y}{m_2(h_2 - y)} = \frac{1}{m_2}, \qquad (14.56)$$

სადაც y არის მანძილი საანგარიშო ჭავლიდან კაშხლის ფუძემდე. მაშინ (14.7) და (14.48) გამოსახულებების გათვალისწინებით ჭავლის ხარჯი

$$dq_1 = Kdy\frac{1}{m_2}, \qquad (14.57)$$

მთლიანად ზედა CDD' ზონის ხარჯი

$$q_1 = \frac{K}{m_2}(h_2 - h_ბ). \qquad (14.58)$$

ქვედა ტრაპეციული ზონისათვის დაწნევის დანაკარგები გამოითვლება $(h_2 - h_ბ)$ სხვაობით, ხოლო პიეზომეტრული ქანობი შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$i_ვ = \frac{h_2 - h_ბ}{m_2(h_2 - y)}\,. \qquad (14.59)$$

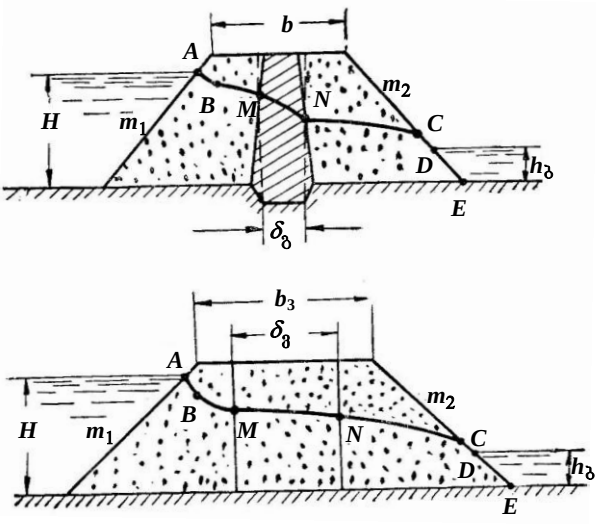
ელემენტარული ჭავლის ხარჯი $dq_2 = Kdyi_ვ$. თუ გავითვალისწინებთ (14.59) გამოსახულებას, ინტეგრირებით მივიღებთ:

$$q = \frac{(h_2 - h_ბ)}{m_2}\int_{h_0}^{0}\frac{dy}{h_2 - y} = \frac{2{,}3K(h_2 - h_ბ)}{m_1}\lg\frac{h_2}{h_2 - h_ბ}\,. \qquad (14.60)$$

ქვედა სოლისათვის ჯამური ხარჯის მნიშვნელობა

$$q = K\frac{h_2 - h_ბ}{m_2}\left(1 - 2{,}3\lg\frac{h_2}{h_2 - h_ბ}\right). \qquad (14.61)$$

შევნიშნავთ, რომ სამივე განხილულ სოლში ერთი და იგივე q ხარჯი გამოედინება, ამიტომ მიწის კაშხლებში ფილტრაციის ამოცანის გადაწყვეტისას გვექნება ოთხი უცნობი სიდიდე: q, h_1, h_2 და S, რომლებიც განისაზღვრება (14.51), (14.52), (14.53) და (14.61) განტოლებების ერთობლივი ამოხსნით.



ნახ. 14.18

2. **გულის მქონე მიწის კაშხალში ფილტრაციის გაანგარიშების თავისებურება.** მიწის კაშხალში (წყალშეუღწევი ფუძით) ფილტრაციის შესამცირებლად ხშირად აწყობენ გულს (ნახ. 14.18, ა) წყალშეღწევადი გრუნტებისაგან (მაგალითად, თიხის

გულს). გულის მასალის ფილტრაციის კოეფიციენტი ($K_გ$), ჩვეულებრივ, რამდენიმეჯერ ნაკლებია კაშხლის გრუნტის ფილტრაციის კოეფიციენტზე (K).

გულის მქონე მიწის კაშხლის ფილტრაციის ამოცანის ამოხსნა მნიშვნელოვნად მარტივდება ნ. პავლოვსკის მიერ შემოღებული „ფილტრაციის ვირტუალური სიგრძის“ ცნების გამოყენებით. ამ შემთხვევაში დეპრესიის მრუდის ასაგებად და ფილტრაციული ხარჯის გამოსათვლელად კაშხლის გულის გრუნტს პირობითად ცვლიან კაშხლის გრუნტის $\delta_з$ სიგანის სწორკუთხა მასივით, რომელშიც დაწნევის დანაკარგები ისეთივეა, როგორც გულში (ნახ. 14.18, ბ). ჰიდრავლიკური თვალსაზრისით, გულის ეკვივალენტური მასივის სისქეს ნ. პავლოვსკიმ უწოდა **გულის ვირტუალური სისქე** ($\delta_з$). ეს უკანასკნელი გამოითვლება ფორმულით:

$$\delta_з = \frac{K}{K_გ}\delta_გ, \tag{14.62}$$

სადაც K და $K_გ$ არის შესაბამისად კაშხლის ტანისა და გულის გრუნტების ფილტრაციის კოეფიციენტები; $\delta_გ$ – გულის საშუალო სისქე.

ამგვარად, გულის მქონე მიწის კაშხალში ფილტრაციის გაანგარიშების ამოცანა დაიყვანება ისეთი ერთგვაროვანი მიწის კაშხლის გაანგარიშებაზე, რომლის ფერდოების კოეფიციენტები იგივეა, მაგრამ პროფილი რამდენადმე გაფართოებულია.

კაშხლის თხემის სიგანე გამოითვლება ფორმულით:

$$b_з = b + \delta_გ\left(\frac{K}{K_გ} - 1\right), \tag{14.63}$$

სადაც b არის კაშხლის თხემის ნამდვილი სიგანე.

ავაგებთ რა დეპრესიის წირს ერთგვაროვანი კაშხლის ახალი პროფილისათვის (ნახ. 14.18, ბ), ვირტუალურ სისქეს ხელახლა ვცვლით გულის ნამდვილი სისქით, რის შედეგადაც ვღებულობთ გულის მქონე მიწის კაშხლის ნამდვილი დეპრესიის წირს. პრაქტიკულად ეს ასე სრულდება: უკუვაგდებთ დეპრესიის წირის MN უბანს და კაშხლის ზედა და ქვედა ნაწილებს მივუახლოებთ $\delta_გ$ მანძილზე. წირის ABM და NC უბნებს, აგრეთვე მიღებულ ფილტრაციულ ხარჯს უცვლელად ვტოვებთ (ნახ. 14.18, ა).

თავი XV. ჰიდრავლიკური მოდელირების საფუძვლები

§ 15.1. ზოგადი ცნობები

პრაქტიკაში ხშირად შეუძლებელი ხდება ზოგიერთი ჰიდრავლიკური ამოცანის ანალიზური (თეორიული) გადაწყვეტა. ასეთ შემთხვევაში იძულებული ვართ, მივმართოთ მოცემული მოვლენის ან ობიექტის ექსპერიმენტულ შესწავლას, მათი მოდელირების საშუალებით. ზოგჯერ მოდელირებას მიმართავენ იმ შემთხვევაშიც, როდესაც მოვლენის ამსახველი განტოლებები საკმაოდ საიმედოა, მაგრამ მათი ამოხსნა გართულებულია ან, როდესაც საჭიროა მიღებული თეორიული ამოხსნის შემოწმება (დაზუსტება) და ა.შ. ამ მიზნით სპეციალურ ჰიდრავლიკურ ლაბორატორიაში გარკვეულ მასშტაბში ქმნიან **ობიექტის (ნატურის) მოდელს,** რომლის საშუალებითაც ხდება მოვლენის ექსპერიმენტული გამოკვლევა. კერძოდ, იზომება ჩვენთვის საინტერესო სიდიდეები – სიჩქარეები, ჰიდროდინამიკური წნევები, ნაკადის სხვა ჰიდრავლიკური პარამეტრები.

ასეთ ლაბორატორიულ გამოკვლევათა ჩატარებისას პასუხი უნდა გაეცეს მრავალ კითხვას: რა ზომის უნდა იყოს მოდელი; როგორი უნდა იყოს მოდელზე წყალსადინარის კედლების ხორკლიანობა; რა სიდიდის ხარჯი გავუშვათ და როგორი სიჩქარეები შევინარჩუნოთ მოდელზე, თუ ის რამდენიმეჯერ შემცირებულია (ან გადიდებულია) ნატურასთან შედარებით; როგორ გადავიტანოთ მოდელზე მიღებული შედეგები ნატურაზე და სხვა. ამ კითხვებზე პასუხს იძლევა **ჰიდრავლიკურ მოვლენათა მოდელირების თეორია,** რომლის საფუძველს **მსგავსების თეორია** წარმოადგენს.

მოდელირება, ე.ი. მოვლენის (ან ობიექტის) გამოკვლევა მოდელზე საკმაოდ ფართო ცნებაა. თუ მოდელი და ნატურა ერთი და იგივე ფიზიკური ბუნებისაა, მაშინ მოდელირება **ფიზიკურია**. მაგალითად, ნატურული სითხის ფილტრაციული ნაკადის მოდელირება ასევე ფილტრაციული ნაკადით არის ფიზიკური.

მაგრამ მოვლენა შეიძლება გამოკვლეულ იქნეს სხვა ფიზიკური ბუნების მოდელზეც, თუ მათი მათემატიკური განტოლებები ანალოგიურია. ასეთ მოდელირებას **ანალოგურს** უწოდებენ. მაგალითად, ნატურული ფილტრაციული ნაკადის შეცვლა ელექტრული დენით ანალოგური მოდელირებაა.

იმ შემთხვევაში, როდესაც სითხის მოძრაობის ამსახველი განტოლებები საკმაოდ საიმედოა, მაგრამ მათი ამოხსნა გართულებულია, ფართოდ გამოიყენება გამოთვლითი ტექნიკა, კერძოდ,

ანალოგური გამომთვლელი მანქანები (აბმ). ამ დროს საქმე გვაქვს **მათემატიკურ მოდელირებასთან**.

ამ თავში განვიხილავთ მხოლოდ ფიზიკურ მოდელირებას, რომლის საბოლოო მიზანია მოდელზე ჩატარებული კვლევის შედეგების ნატურაზე გადატანა. ასეთი გადატანა შეიძლება მოხდეს მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ მოვლენები ნატურასა და მოდელზე ერთმანეთის **მსგავსი** იქნება.

ჰიდრავლიკურ მოვლენათა მსგავსებაში გვესმის **ორი ჰიდრავლიკური სისტემის – მოდელისა და ნატურის – ე.წ. მექანიკური მსგავსება**[1].

§ 15.2. ჰიდრავლიკურ მოვლენათა მექანიკური მსგავსება

ორი ჰიდრავლიკური სისტემა (ორი ჰიდრავლიკური მოვლენა) ითვლება მექანიკურად მსგავსად, თუ მათი **მსგავსებული (შესატყვისი) წერტილების** დროის შესაბამის მომენტებში ყველა ვექტორული სიდიდე გეომეტრიულად მსგავსია, ხოლო ყველა სკალარული სიდიდე – ურთიერთპროპორციული. შევნიშნავთ, რომ ორი მექანიკურად მსგავსი სისტემის მსგავსებულ წერტილებს ვუწოდებთ ამ სისტემების საზღვრების მიმართ ერთნაირად განლაგებულ წერტილებს. ცხადია, ასეთ მსგავსებულ წერტილებში სითხის ნაწილაკებზე უნდა მოქმედებდეს ერთი და იგივე ფიზიკური ბუნების მქონე ძალები.

მექანიკური მსგავსება ნიშნავს, რომ დაცულია ჰიდრავლიკური სისტემების (მოდელისა და ნატურის) **გეომეტრიული, კინემატიკური და დინამიკური მსგავსება.**

გეომეტრიული მსგავსება. ორი ჰიდრავლიკური სისტემა (ორი ჰიდრავლიკური მოვლენა) გეომეტრიულად მსგავსია, თუ მათ მსგავსებულ $\ell_მ$ და $\ell_ნ$ ხაზოვან ზომებს, $\omega_მ$ და $\omega_ნ$ ფართობებსა და $W_მ$ და $W_ნ$ მოცულობებს შორის არსებობს შემდეგი მუდმივი თანაფარდობები:

$$\ell_მ/\ell_ნ = \alpha_\ell\ ;\ \ \omega_მ/\omega_ნ = \alpha_\ell^2\ , \tag{15.1}$$

სადაც α_ℓ არის მოდელირების მუდმივი ხაზოვანი მასშტაბი α_ℓ ანუ სამასშტაბო კოეფიციენტი (სამასშტაბო მამრავლი). იგი გვიჩვენებს, თუ რამდენჯერ არის შემცირებული ან

[1] ზოგჯერ ტერმინ „მექანიკური მსგავსების“ ნაცვლად იხმარება „ჰიდრავლიკური“ ან „ჰიდროდინამიკური მსგავსება“.

გადიდებული მოდელის ზომები ნატურასთან შედარებით. „მ“ ინდექსით აღნიშნულია მოდელის შესაბამისი ელემენტები, ხოლო „ნ“ ინდექსით – ნატურის ელემენტები.

კინემატიკური მსგავსება. ორი სისტემა კინემატიკურად მსგავსია, თუ:

ა) ისინი გეომეტრიულად მსგავსია;

ბ) ორივე სისტემის სითხის მსგავს ნაწილაკთა ტრაექტორიები გეომეტრიულად მსგავსია და ერთნაირად არის ორიენტირებული სივრცეში;

გ) u სიჩქარეები და ω აჩქარებები მსგავსებულ წერტილებში დროის შესაბამის მომენტებში ერთმანეთთან დაკავშირებულია შემდეგი მუდმივი თანაფარდობებით:

$$u_მ/u_ნ = \alpha_u = const\ ;\ \ \omega_მ/\omega_ნ = \alpha_\omega = const\ , \qquad (15.2)$$

სადაც α_u და α_ω არის შესაბამისად სიჩქარისა და აჩქარების მასშტაბები.

კინემატიკურ მსგავსებასთან დაკავშირებით განიხილება დროის მასშტაბის (α_t) ცნება. თუ $t_მ$-ით აღვნიშნავთ დროის შუალედს, რომელშიც სითხის ნაწილაკი მოდელზე გაივლის ტრაექტორიის $\ell_მ$ მონაკვეთს, ხოლო $t_ნ$-ით – დროის შუალედს, რომელშიც სითხის მსგავსებული ნაწილაკი ნატურაში გაივლის მოდელის მსგავსი ტრაექტორიის $\ell_ნ$ ნაწილს, მაშინ კინემატიკურად მსგავსი სისტემებისათვის გვექნება:

$$t_მ/t_ნ = \alpha_t = const\ . \qquad (15.3)$$

დინამიკური მსგავსება. ორი სისტემა დინამიკურად მსგავსია, თუ:

ა) ისინი კინემატიკურად და, მაშასადამე, გეომეტრიულადაც მსგავსია;

ბ) ორ ნებისმიერ მსგავს წერტილში მოქმედებს ერთი და იმავე ფიზიკური ბუნების მქონე ძალები (ე.წ. ერთსახელიანი ძალები);

გ) ერთ ჰიდრავლიკურ სისტემაზე მოქმედი ძალები ერთმანეთის და მოცემული სისტემის საზღვრების მიმართ ორიენტირებულია ისე, როგორც მეორე სისტემაზე მოქმედი ძალები.

როგორც ჩანს, აღნიშნული პირობების დაცვისას, მოდელისა და ნატურის მსგავს წერტილების ნებისმიერი წყვილისათვის აგებული ძალთა ჩაკეტილი მრავალკუთხედები გეომეტრიულად მსგავსია. მაშასადამე, დინამიკურად მსგავსი სისტემებისათვის

$$F_მ/F_ნ = \alpha_F = const\ , \qquad (15.4)$$

სადაც α_F არის ძალთა მასშტაბი.

დინამიკურ მსგავსებასთან დაკავშირებით განიხილება სიმკვრივის მასშტაბის (α_ρ) ცნება

$$\rho_მ/\rho_ნ = \alpha_\rho = const\ . \qquad (15.5)$$

ამგვარად, როგორც ვხედავთ, ორი სისტემის (ორი მოვლენის) დინამიკური მსგავსებისას დაცულია როგორც გეომეტრიული, ისე კინემატიკური მსგავსება. ასეთ მსგავსებას **სრულ დინამიკურ მსგავსებას** უწოდებენ. მაშასადამე, მექანიკური მსგავსების განმარტებიდან გამომდინარე, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ ორი სისტემის (ორი მოვლენის) **სრული დინამიკური მსგავსება თავისთავად უკვე განაპირობებს მათ მექანიკურ მსგავსებასაც.**

§ 15.3. დინამიკური მსგავსების კრიტერიუმები

პრაქტიკაში მოდელისა და ნატურის **სრული დინამიკური მსგავსების** მიღწევა ვერ ხერხდება, რადგანაც სისტემაზე ერთდროულად მოქმედი გარე ძალები თავიანთი ფიზიკური ბუნებით შეიძლება ერთმანეთისაგან განსხვავებული იყოს (მაგალითად, მიზიდულობის, ზედაპირული წნევის, სიბლანტის და სხვა ძალები). ამიტომ, ყოველთვის მოდელირებისას რეალურად მოქმედი ძალებიდან გამოყოფენ ერთ რომელიმე ძალას, რომელიც განსაზღვრავს მოვლენის ბუნებას (ხასიათს), ხოლო დანარჩენი ძალების გავლენას უგულებელყოფენ. ასეთ შემთხვევაში გვექნება არა სრული, არამედ **ნაწილობრივი დინამიკური მსგავსება.** ქვემოთ განვიხილავთ სრული და ნაწილობრივი დინამიკური მსგავსების კრიტერიუმებს.

სრული დინამიკური მსგავსების კრიტერიუმი (ნიუტონის კრიტერიუმი). მოდელის ნაკადის $W_მ$ მოცულობის მასა აღვნიშნოთ $m_მ$-ით, ხოლო ნატურული ნაკადის $W_ნ$ მოცულობის მასა – $m_ნ$-ით. მაშინ

$$\frac{m_მ}{m_ნ} = \frac{\rho_მ W_მ}{\rho_ნ W_ნ} = \alpha_\rho \alpha^3 = \alpha_m = const\ . \qquad (15.6)$$

სიჩქარეებისათვის შეიძლება დავწეროთ

$$v_მ = \ell_მ/t_მ\ ; \quad v_ნ = \ell_ნ/t_ნ\ , \qquad (15.7)$$

ამიტომ

$$\frac{v_მ}{v_ნ} = \frac{\ell_მ}{\ell_ნ}\frac{t_მ}{t_ნ} = \frac{\alpha_მ}{\alpha_ნ} = \alpha_v = const\ . \qquad (15.8)$$

ასევე აჩქარებებისათვის მივიღებთ

$$\omega_{ა} = \ell_{ა}/t_{ა}^2 \; ; \;\; \omega_{ნ} = \ell_{ნ}/t_{ნ}^2 \; ; \tag{15.9}$$

$$\frac{\nu_{ა}}{\nu_{ნ}} = \frac{\ell_{ა} t_{ნ}^2}{\ell_{ნ} t_{ა}^2} = \frac{\alpha_{\ell}}{\alpha_t^2} = \alpha_{\omega} = const \; . \tag{15.10}$$

(15.6)-(15.10) დამოკიდებულებებით სარგებლობენ მასების, სიჩქარეებისა და აჩქარებათა მოდელირების მასშტაბების განსაზღვრისას.

ნიუტონის კანონის თანახმად,

$$F = m\omega = \rho W \omega \, .$$

ამიტომ (15.1) და (15.9) დამოკიდებულებათა გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$\frac{F_{ა}}{F_{ნ}} = \frac{\rho_{ა} W_{ა} \omega_{ა}}{\rho_{ნ} W_{ნ} \omega_{ნ}} = \frac{\rho_{ა} \ell_{ა}^3 \ell_{ა} t_{ნ}^2}{\rho_{ნ} \ell_{ნ}^3 t_{ა}^2 \ell_{ნ}} = \frac{\rho_{ა} \ell_{ა}^3 \ell_{ა} t_{ნ}^2}{\rho_{ნ} \ell_{ნ}^2 t_{ა}^2 \ell_{ნ}^2} = \alpha_F = const \; ,$$

საიდანაც (15.7) გამოსახულების მხედველობაში მიღებით გვექნება:

$$\frac{F_{ა}}{F_{ნ}} = \frac{\rho_{ა} \ell_{ა}^2 \nu_{ნ}^2}{\rho_{ნ} \ell_{ნ}^2 \nu_{ნ}^2} = Ne = const \tag{15.11}$$

ან

$$\frac{\rho_{ა} \ell_{ა}^3 \nu_{ნ}^2}{F_{ა}} = \frac{\rho_{ა} \ell_{ნ}^2 \nu_{ნ}^2}{F_{ნ}} = Ne = const \; . \tag{15.11′}$$

გამოსახულებას

$$Ne = \rho \ell \nu^2 / F \tag{15.12}$$

ნიუტონის კრიტერიუმს უწოდებენ.

(15.11′) გამოსახულებიდან გამომდინარეობს, რომ მოვლენათა სრული დინამიკური მსგავსებისას ნატურასა და მოდელზე ერთი და იგივე ბუნების შესატყვის ყველა ძალას შორის თანაფარდობა მუდმივი უნდა იყოს, ე.ი.

$$Ne_{ა} = Ne_{ნ} = const \; . \tag{15.13}$$

ზოგჯერ ნიუტონის კრიტერიუმს სხვა სახითაც წერენ. თუ (15.12) გამოსახულების მრიცხველს და მნიშვნელს გავამრავლებთ ℓ-ზე და გავითვალისწინებთ, რომ $\rho \ell^3 = m$ არის სითხის მასა განსახილველ მოცულობაში, მივიღებთ:

$$Ne = \frac{m\nu^2}{F\ell} \; Ne = m\nu^2 / F\ell \; . \tag{15.14}$$

ამგვარად, სრული დინამიკური მსგავსების კრიტერიუმი შეიძლება ასეთი სახითაც ჩავწეროთ:

$$\frac{m_მ v_მ^2}{F_მ \ell_მ} = \frac{m_ნ v_ნ^2}{F_ნ \ell_ნ} = Ne = const\ . \qquad (15.15)$$

ცხადია, სრული დინამიკური შეიძლება გამოვსახოთ მოდელირების სამასშტაბო მამრავლებითაც. (15.1), (15.4), (15.5) და (15.8) გამოსახულებათა გათვალისწინებით (15.11) დამოკიდებულებიდან მივიღებთ:

$$\alpha_F = \alpha_\rho \alpha_\ell^2 \alpha_v^2 = const\ . \qquad (15.16)$$

განმეორებით შევნიშნავთ, რომ სრული დინამიკური მსგავსების განხორციელება არ ხერხდება, რადგანაც ჰიდრავლიკურ სისტემაზე მოქმედი გარე ძალების ფიზიკურ თავისებურებათა გამო ნიუტონის კრიტერიუმის დაცვა შეუძლებელია. **ამიტომ, პრაქტიკაში მოდელირებას საფუძვლად უდებენ ჰიდრავლიკური სისტემების ნაწილობრივ დინამიკურ მსგავსებას.**

ნაწილობრივი დინამიკური მსგავსების კრიტერიუმები

1) **ფრუდის კრიტერიუმი**. ხშირ შემთხვევაში, ჰიდრავლიკურ სისტემაზე მოქმედი **სიმძიმის ძალები მნიშვნელოვნად სჭარბობს სხვა ფიზიკური ბუნების მქონე ძალებს** და უპირატესად განაპირობებს განსახილველ ჰიდრავლიკურ მოვლენას. ამ დროს $\omega = g$, ხოლო $F = mg$, მაშინ თუ (15.14) გამოსახულებაში F-ის ნაცვლად ჩავსვამთ მის კერძო მნიშვნელობას (mg), მივიღებთ

$$\frac{mv^2}{F\ell} = \frac{mv^2}{mg\ell} = \frac{v^2}{g\ell}\ .$$

$$Fr = v^2 / g\ell \qquad (15.17)$$

გამოსახულებას **ფრუდის რიცხვს ან ფრუდის კრიტერიუმს** უწოდებენ.

აღნიშნულის გათვალისწინებით, (15.15) ტოლობა ასე ჩაიწერება:

$$\frac{v_მ^2}{g_მ \ell_მ} = \frac{v_ნ^2}{g_ნ \ell_ნ} = Fr = const \qquad (15.18)$$

ანუ

$$Fr_მ = Fr_ნ = const\ . \qquad (15.18')$$

ამგვარად, თუ სისტემაზე მოქმედი სიმძიმის ძალები მნიშვნელოვნად სჭარბობს სხვა ფიზიკური ბუნების მქონე ძალებს, მაშინ მოვლენათა ნაწილობრივ დინამიკური მსგავსებისათვის დაცული უნდა იყოს (15.18) ანუ (15.18′) ტოლობა.

ხშირად ფრუდის კრიტერიუმს **გრავიტაციული მსგავსების კრიტერიუმსაც** უწოდებენ.

2) **რეინოლდსის კრიტერიუმი.** განვიხილოთ შემთხვევა, როდესაც ჰიდრავლიკურ სისტემაზე მოქმედი ძალებიდან **სჭარბობს**

სითხის შიგა ხახუნის ძალები (სიბლანტის ძალები). როგორც ვიცით, ნიუტონის ჰიპოთეზის თანახმად, ეს ძალები განისაზღვრება ფორმულით:

$$F = \mu S \frac{du}{dn} = \rho \nu S \frac{du}{dn}.$$

F-ის ეს მნიშვნელობა ჩავსვათ (15.14) გამოსახულებაში

$$\frac{mv^2}{F\ell} = \frac{\rho W v^2}{\left(\rho \nu S \frac{du}{dn}\right)_\ell} = \frac{Wv^2}{\nu S \ell} \frac{dn}{du}.$$

შევნიშნავთ, რომ $\frac{dn}{du} \approx \frac{\Delta n}{\Delta u} = K \frac{\ell}{v}$, ხოლო $S\ell = W$, ამიტომ

$$\frac{mv^2}{F\ell} = K \frac{Wv^2 \ell}{\nu W v} = \frac{v\ell}{\nu} K,$$

ანუ, თუ გავითვალისწინებთ, რომ $K = const$.

$$mv^2 / F\ell = v\ell / \nu.$$

$$\mathrm{Re} = v\ell / \nu \qquad (15.19)$$

გამოსახულებას **რეინოლდსის რიცხვს** ანუ **რეინოლდსის კრიტერიუმს** უწოდებენ.

ამგვარად, თუ ჰიდრავლიკურ სისტემაზე მოქმედი წინაღობის (სიბლანტის) ძალები მნიშვნელოვნად სჭარბობს სხვა ფიზიკური ბუნების ძალებს, მოვლენათა ნაწილობრივი დინამიკური მსგავსებისათვის დაცული უნდა იყოს პირობა:

$$\frac{v_ა \ell_ა}{\nu_ა} = \frac{v_ბ \ell_ბ}{\nu_ბ} = \mathrm{Re} = const \qquad (15.20)$$

ანუ

$$\mathrm{Re}_ა = \mathrm{Re}_ბ = const. \qquad (15.20')$$

ანალოგიურ მსჯელობათა განუმეორებლად მოგვყავს ზოგიერთი სხვა კრიტერიუმი:

ეილერის კრიტერიუმი. ამ შემთხვევაში ჰიდრავლიკურ მოვლენას უპირატესად განაპირობებს წნევის ძალები

$$Eu = \rho v^2 / \Delta p = const, \qquad (15.21)$$

სადაც Δp არის ორ საანგარიშო კვეთს შორის ჰიდროდინამიკურ წნევათა სხვაობა.

ვებერის კრიტერიუმი – ზედაპირული დაჭიმულობის ძალებისათვის

$$We = \rho v^2 \ell / \sigma = const, \qquad (15.22)$$

სადაც σ არის ზედაპირული დაჭიმულობა სიგანის ერთეულზე.

სტრუხალის კრიტერიუმი – პერიოდული მოქმედების ძალებისათვის

$$St = \ln/v\,,$$

სადაც n არის მოვლენის გამეორების სიხშირე.

არსებობს სხვა კრიტერიუმებიც, რომლებსაც აქ არ შევეხებით.

§ 15.4. მითითებები ჰიდრავლიკურ მოვლენათა მოდელირების შესახებ

შევარჩიოთ სიგრძის რაიმე $\alpha_\ell = \ell_მ/\ell_ნ$ მასშტაბი და განვიხილოთ შემთხვევა, როდესაც ექსპერიმენტების ჩატარებისას აუცილებელია გავითვალისწინოთ როგორც სიმძიმის, ისე ხახუნის ძალები. მაშინ მოდელსა და ნატურას შორის დინამიკური მსგავსებისათვის საჭიროა ერთდროულად დაცულ იქნეს შემდეგი ორი პირობა:

$$Fr_მ = Fr_ნ\,; \tag{15.23}$$

$$\mathrm{Re}_მ = \mathrm{Re}_ნ\,. \tag{15.24}$$

გამოვარკვიოთ დამოკიდებულება სამასშტაბო მამრავლებს შორის აღნიშნულ პირობათა შესრულებისას:

1) (15.23) გამოსახულება (15.18)-ის და იმის გათვალისწინებით, რომ $g_მ = g_ნ = g$, ასეთ სახეს მიიღებს:

$$v_მ^2/g\ell_მ = v_ნ^2/g\ell_ნ\,,$$

საიდანაც

$$v_მ/v_ნ = \sqrt{\ell_მ/\ell_ბ} = \sqrt{\alpha_\ell} = \alpha_\ell^{\frac{1}{2}}. \tag{15.25}$$

ხარჯების ფარდობისათვის გვექნება:

$$\frac{Q_მ}{Q_ნ} = \frac{v_მ\omega_მ}{v_ნ\omega_ნ} = \alpha_\ell^2\sqrt{\alpha_\ell} = \alpha_\ell^{5/2}. \tag{15.26}$$

თუ გავითვალისწინებთ (15.25) გამოსახულებას, მაშინ (15.8) ტოლობიდან დროის მასშტაბისათვის მივიღებთ:

$$\alpha_\ell^{1/2} = \alpha_\ell/\alpha_t\,,$$

საიდანაც

$$\alpha_t = \alpha_\ell/\alpha_\ell^{1/2} = \alpha_\ell^{1/2}. \tag{15.27}$$

2) ახლა ვნახოთ, როგორი იქნება სამასშტაბო კოეფიციენტებს შორის თანაფარდობები (15.24) პირობის შესრულებისას.

ვიგულისხმოთ, რომ მოდელსა და ნატურაზე გამოიყენება ერთი და იგივე სითხე (პრაქტიკაში უმეტეს შემთხვევაში სწორედ ასეა), ე.ი. $\nu_{მ} = \nu_{ნ} = \nu$. მაშინ (15.20) გამოსახულებიდან გვექნება:

$$\nu_{მ}\ell_{მ}/\nu = \nu_{ნ}\ell_{ნ}/\nu,$$

საიდანაც

$$\nu_{მ}/\nu_{ნ} = \ell_{ნ}/\ell_{მ} = 1/\alpha_{\ell} = \alpha_{\ell}^{-1}. \qquad (15.28)$$

რაც შეეხება ხარჯებს შორის თანაფარდობას, ასეთი სახე ექნება:

$$\frac{Q_{მ}}{Q_{ნ}} = \frac{\nu_{მ}\omega_{მ}}{\nu_{ნ}\omega_{ნ}} = \alpha_{\ell}^{-1}\alpha_{\ell}^{2} = \alpha_{\ell}. \qquad (15.29)$$

დროის მასშტაბისათვის (15.8) გამოსახულებიდან მივიღებთ:

$$\alpha_{\ell}^{-1} = \alpha_{\ell}/\alpha_{t},$$

საიდანაც

$$\alpha_{t} = \alpha_{\ell}/\alpha_{\ell}^{-1} = \alpha_{\ell}^{2}. \qquad (15.30)$$

აღნიშნულის საფუძველზე შეგვიძლია შევადგინოთ ასეთი ცხრილი:

სიდიდეთა დასახელება	მოდელისა და ნატურის ელემენტების შეფარდების დინამიკური მსგავსების მისაღწევად	
	(15.23) პირობიდან (ფრუდის კრიტერიუმიდან) გამომდინარე $Fr_{მ} = Fr_{ნ}$	(15.23) პირობიდან (რეინილდსის კრიტერიუმიდან) გამომდინარე $\mathrm{Re}_{მ} = \mathrm{Re}_{ნ}$
სიჩქარე	$\alpha_{\ell}^{0,5}$	α_{ℓ}^{-1}
ხარჯი	$\alpha_{\ell}^{2,5}$	α_{ℓ}
დრო	$\alpha_{\ell}^{0,5}$	α_{ℓ}^{2}

ცხრილიდან ჩანს, რომ (15.23) და (15.24) პირობების ერთდროულად შესრულება, როცა $\nu_{მ} = \nu_{ნ}$, შეუძლებელია, რადგანაც მსგავსების ერთი კრიტერიუმი (ფრუდის) ნატურიდან მოდელზე გადასვლისას მოითხოვს, მაგალითად, სიჩქარის $\alpha_{\ell}^{0,5}$-ჯერ შეცვლას, ხოლო მეორე (რეინოლდსის) – α_{ℓ}^{-1}-ჯერ შეცვლას და ა.შ. $\nu_{მ} = \nu_{ნ} = \nu$.

ორივე პირობა ერთდროულად შეიძლება შესრულდეს მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ მოდელზე გამოყენებული იქნება

სხვა სითხე (ν კოეფიციენტის განსხვავებული მნიშვნელობით), მაგრამ პრაქტიკაში ეს თითქმის შეუძლებელია, რადგან ექსპერიმენტის ჩასატარებლად სხვა სითხეების საჭირო მოცულობა არ გაგვაჩნია და თუ ასეთი შესაძლებლობა მაინც გვაქვს, $\nu_მ/\nu_ნ$ ფარდობა მცირედით იქნება განსხვავებული ერთისაგან.

აღნიშნულის გამო, კიდევ ერთხელ შევნიშნავთ, რომ ზოგად შემთხვევაში მოდელირებას მიახლოებით ვახორციელებთ. კერძოდ, რეალურად მოქმედი ძალებიდან გამოვყოფთ ხასიათს, ხოლო დანარჩენი ძალების გავლენას უგულებელვყოფთ. როგორც ზემოთ ვთქვით, ასეთ შემთხვევაში გვექნება მოვლენათა არა სრული, არამედ ნაწილობრივი დინამიკური მსგავსება.

მოდელის მასშტაბის შერჩევისას აუცილებელია დავიცვათ მსგავსების ზოგადი კრიტერიუმებიდან გამომდინარე პირობები. კერძოდ, თუ ნაკადი ნატურაში ტურბულენტურია, ის ასეთივე უნდა იყოს მოდელზეც. ასევე ერთ უნდა იყოს ნაკადის მდგომარეობაც (წყნარი ან მძაფრი) მოდელსა და ნატურაზე. მოდელირებისას უნდა შევეცადოთ განხორციელდეს ხორკლიანობის გეომეტრიული მსგავსება, თუმცა, უმეტეს შემთხვევაში, ეს შეუძლებელია. ამიტომ, აუცილებელია წინაღობათა მსგავსების უზრუნველყოფა, რათა შესრულდეს პირობა:

$$\lambda_მ = \lambda_ნ \quad \text{ან} \quad C_მ = C_ნ . \tag{15.31}$$

ზოგ შემთხვევაში მოდელირებისას იძულებული ვართ დავამახინჯოთ მოდელის მასშტაბი – მივიღოთ ჰორიზონტალური და ვერტიკალური მასშტაბების სხვადასხვა მნიშვნელობა. ეს მაშინ ხდება, როცა შეუძლებელია ხორკლიანობის გეომეტრიული მსგავსების განხორციელება. ამ დროს ჰიდრავლიკურ წინაღობათა მსგავსება მიიღწევა ჰიდრავლიკური რადიუსის სიდიდის ცვლილების ხარჯზე, ე.ი. ვერტიკალური მასშტაბის დამახინჯების ხარჯზე. ნაკადის მოდელირების საკითხები ამ დროს მნიშვნელოვნად რთულდება.

უდაწნეო ტურბულენტური ნაკადების მოდელირებისას (წინაღობის კვადრატულ ზონაში) განმსაზღვრელს წარმოადგენს ფრუდის კრიტერიუმი, ე.ი. თვლიან, რომ მოძრაობა ამ დროს განპირობებულია ძირითადად სიმძიმის ძალებით. მაშინ ნაკადის პარამეტრებს, რომლებიც შეესაბამება მოძრაობის განსახილველ შემთხვევას, უწოდებენ **ავტომოდელურს** რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობათა მიმართ აღნიშნულ ზონაში. ეს ნიშნავს, რომ წინაღობის კვადრატულ ზონაში რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობათა ცვლა გავლენას არ ახდენს მოვლენაზე; ავტომოდე-

ლური ზონის ფარგლებში მოდელის ზომების შემცირება ნატურის ზომებთან შედარებით არ იწვევს მოვლენის ხარისხობრივ ცვლილებას, მიუხედავად იმისა, რომ რეონოლდსის რიცხვის მნიშვნელობები მცირდება. თუ ნაკადი ნატურაში ავტომოდელურ ზონაშია, მაშინ რეინოლდსის რიცხვის ის მინიმალური დასაშვები მნიშვნელობა, რომლისთვისაც უზრუნველყოფილი იქნება ავტომოდელობა მოდელზე, შეიძლება გამოვთვალოთ ფორმულით:

$$\mathrm{Re}_{R,\text{მ}} = \frac{14R_{\text{ბ}}}{\Delta_{\text{ბ}}\sqrt{\lambda_{\text{ბ}}}}, \qquad (15.32)$$

სადაც $R_{\text{ბ}}$ არის ჰიდრავლიკური რადიუსი; $\Delta_{\text{ბ}}$ – ხორკლების საშუალო სიმაღლე; $\lambda_{\text{ბ}}$ – სიგრძეზე წინაღობის კოეფიციენტი.

მოდელისა და ნატურისათვის რეინოლდსის რიცხვის შესაბამის მნიშვნელობათა ფარდობა ერთი და იგივე სითხის შემთხვევაში $(\nu_{\text{ბ}}/\nu_{\text{მ}} = \alpha_\nu = 1)$ იქნება:

$$\frac{\mathrm{Re}_{R,\text{მ}}}{\mathrm{Re}_{R,\text{ნ}}} = \frac{\nu_{\text{მ}}R_{\text{მ}}\nu_{\text{ნ}}}{\nu_{\text{ნ}}R_{\text{ნ}}\nu_{\text{მ}}} = \alpha_\nu\alpha_\ell = \alpha_\ell^{1/2}\cdot\alpha_\ell = \alpha_\ell^{3/2}.$$

აქედან დავადგენთ ხაზოვანი მასშტაბის მაქსიმალურ მნიშვნელობას

$$\alpha_\ell = \left(\frac{\mathrm{Re}_{R,\text{მ}}}{\mathrm{Re}_{R,\text{ნ}}}\right)^{2/3} = \left(\frac{\nu\cdot 14R_{\text{მ}}}{\nu_{\text{ნ}}R_{\text{ნ}}\Delta_{\text{მ}}\sqrt{\lambda_{\text{მ}}}}\right)^{2/3} = \alpha_\ell^{2/3}\left(\frac{14\nu}{\nu_{\text{ნ}}\Delta_{\text{მ}}\sqrt{\lambda_{\text{მ}}}}\right)^{2/3}$$

ანუ

$$\alpha_\ell = \alpha_\ell^{2/3}\left(\frac{14\nu}{\nu_{\text{ნ}}\Delta_{\text{მ}}\sqrt{\lambda_{\text{მ}}}}\right)^{2}. \qquad (15.33)$$

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, იმ შემთხვევაში, როცა ვერ ხერხდება ხორკლიანობის გეომეტრიული მსგავსების განხორციელება, მიმართავენ მოდელის ვერტიკალური და ჰორიზონტალური მასშტაბების დამახინჯებას. საკითხის განხილვის გარეშე მივუთითებთ, რომ ამ დროს ხარჯის მასშტაბს გამოვთვლით შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$\alpha_Q = \alpha_\ell\alpha_h\alpha_\nu = \alpha_\ell\alpha_h^{3/2}, \qquad (15.34)$$

სადაც α_h არის სიღრმის მასშტაბი.

კალაპოტის ფსკერის ქანობის მასშტაბი

$$\alpha_i = \alpha_h/\alpha_\ell. \qquad (15.35)$$

ა. საბანეევის გამოკვლევების თანახმად, შეიძლება დავუშვათ მოდელის ვერტიკალური და ჰორიზონტალური მასშტაბების ისეთი დამახინჯება, რომლის დროსაც ნაკადის სიგანისა და სიღრმის ფარდობა 7-ზე ნაკლები არ იქნება.

დასასრულს შევნიშნავთ, რომ **დაწნევითი მოძრაობის მოდელირება** (კვადრატული წინაღობის ზონაში) დიდად არ განსხვავდება უდაწნეო ტურბულენტური ნაკადების მოდელირებისაგან.

სადაწნეო მილსადენების, ღია კალაპოტებისა და ჰიდროტექნიკურ ნაგებობათა მოდელირების საკითხები მოცემულია სპეციალურ ლიტერატურაში.

თავი XVI. სითხის დაუმყარებელი მოძრაობა სადაწნეო მილსადენებსა და ღია კალაპოტებში

§ 16.1. ზოგადი ცნობები. სითხის დაუმყარებელი მოძრაობის უმარტივესი შემთხვევა

როგორც ადრე აღვნიშნეთ (§ 5.7), **დაუმყარებელი მოძრაობისას** სითხის მიერ დაკავებული სივრცის ყოველი უძრავი წერტილი ხასიათდება ადგილობრივი სიჩქარით, რომელიც დროის მიხედვით იცვლება. უკუმშველი სითხის დაუმყარებელი მდოვრედ ცვალებადი მოძრაობის ზოგად შემთხვევაში განსახილველი ნაკადის ყველა ბრტყელ კვეთში v საშუალო სიჩქარისა და Q ხარჯის კერძო წარმოებულები დროით ნულისაგან განსხვავდება: $\partial v/\partial t \neq 0$; $\partial Q/\partial t \neq 0$.

ამ თავში განვიხილავთ სითხის დაუმყარებელ მდოვრედ ცვალებად ტურბულენტურ მოძრაობას. წყლის ასეთ მოძრაობას ხშირად ვხვდებით ტურბინებთან მიმყვანი მილსადენების, ჰიდროსადგურებთან მიმყვანი და გამყვანი არხების და სხვათა ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას.

სითხის დაუმყარებელი მოძრაობის შედარებით მარტივ შემთხვევას მიეკუთვნება დაწნევითი დაუმყარებელი მოძრაობა იმ დაშვებით, რომ სადაწნეო მილსადენის კედლები **აბსოლუტურად ხისტია** (აბსოლუტურად არ დეფორმირდება მილსადენში წნევის ცვლილებისას), ხოლო სითხე – **აბსოლუტურად უკუმშველი.** ამ დროს ცოცხალი კვეთის ფართობი არ არის დამოკიდებული დროზე და განისაზღვრება მილის ღერძის გასწვრივ ათვლილი ℓ კოორდინატით, $\omega = f_1(\ell)$. რაც შეეხება ხარჯს, ის დროის გარკვეული მომენტში არ არის ℓ-ზე დამოკიდებული და მხოლოდ

ერთი ცვლადის ფუნქციას წარმოადგენს $Q = f_2(t)$. აღნიშნულის გამო, დროის მოცემული მომენტში. საშუალო სიჩქარეც მხოლოდ ერთი ცვლადის ფუნქცია იქნება: $v = f_3(\ell)$; ზოგადად $v = f(\ell, h)$.

სითხის დაწნევითი დაუმყარებელი მოძრაობის ასეთი უმარტივესი მოდელი პრაქტიკაში ხშირად მისაღებია. თუმცა არის ისეთი შემთხვევებიც, როცა სითხის კუმშვადობისა და მილსადენის კედლების დეფორმირების უგულებელყოფა არ შეიძლება. კერძოდ, ასეთ შემთხვევათა რიცხვს მიეკუთვნება ჰიდრავლიკური დარტყმის მოვლენა.

ღია კალაპოტებში ხარჯის ცვლილება იწვევს ნაკადის ცოცხალი კვეთის ზომების ცვლილებას დროის მიხედვით, ე.ი. $\omega = f_1(\ell, t)$. ამიტომ $\partial\omega/\partial t \neq 0$. ასევე ℓ-ის და t-ს ფუნქციებია ხარჯი და სიჩქარე: $Q = f_2(\ell, t)$; $v = f_3(\ell, t)$.

ქვემოთ განიხილება შემდეგი სამი საკითხი:

ა) სითხის დაუმყარებელი მდოვრედ ცვალებადი დაწნევითი მოძრაობა, როცა სითხის კუმშვადობასა და მილსადენის კედლების დეფორმირებას უგულებელვყოფთ;

ბ) სითხის დაუმყარებელი დაწნევითი მოძრაობა, როცა აუცილებელია სითხის კუმშვადობისა და მილსადენის კედლების დეფორმირების გათვალისწინება;

გ) სითხის დაუმყარებელი უდაწნეო მოძრაობა.

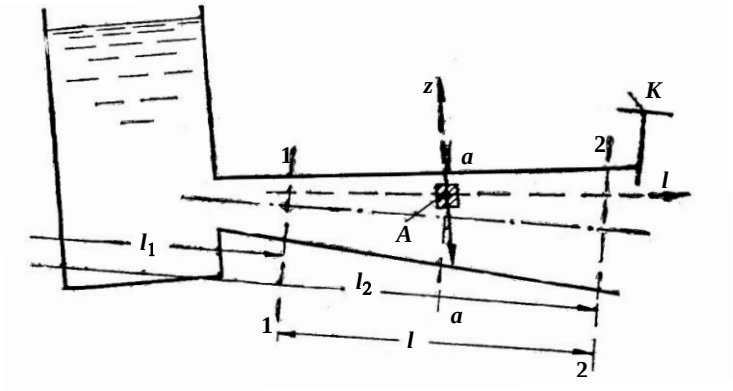
§ 16.2. სითხის დაუმყარებელი მდოვრედ ცვალებადი დაწნევითი მოძრაობა, როცა სითხის კუმშვადობასა და მილსადენის კედლების დეფორმირებას უგულებელვყოფთ

1. **ბერნულის განტოლება ელემენტარული ჭავლისათვის დაუმყარებელი მოძრაობისას (ბერნულის განტოლება, რომელიც ითვალისწინებს ინერციის ლოკალურ ძალებს).** განვიხილოთ სითხის მოძრაობა გაფართოებად მილსადენში (ნახ. 16.1). ჩავთვალოთ, რომ 1-1 და 2-2 კვეთებს შორის ადგილობრივი წინაღობა არ არსებობს. მილსადენში Q ხარჯის ცვლილება დროის მიხედვით შეიძლება განვახორციელოთ მილსადენის ბოლოში მოთავსებული K ონკანით. გავატაროთ ბრტყელი a-a კვეთი და ავიღოთ მასზე A წერტილი. კოორდინატთა z ღერძი მივმართოთ ვერტიკალურად, ხოლო მეორე ℓ ღერძი შევუთავსოთ დენის წირს.

თავდაპირველად ვიგულისხმოთ, რომ სითხე იდეალურია და A წერტილში გამოვყოთ ერთეული მასა. განვსაზღვროთ მასზე

მოქმედი ყველა ძალა და მათი გეგმილების ჯამი ℓ ღერძზე გავუტოლოთ ნულს. მივიღებთ განსახილველი ერთეული მასის დინამიკური წონასწორობის ცნობილ განტოლებას პროექციაში, ე.ი. ეილერის განტოლებას

$$F_\ell - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial \ell} = \frac{du}{dt}, \tag{16.1}$$



ნახ. 16.1

სადაც F_ℓ არის ერთეულ მასაზე მოქმედი მოცულობითი ძალის გეგმილი ℓ ღერძზე. იმის გამო, რომ განსახილველ შემთხვევაში მოცულობითი ძალებიდან სითხეზე მოქმედებს მხოლოდ სიმძიმის ძალა, რომლის პოტენციური ფუნქცია $U = -gz$, ამიტომ

$$F_\ell = \frac{\partial U}{\partial \ell} = -\frac{\partial}{\partial \ell}(gz). \tag{16.2}$$

(16.1) გამოსახულებაში $\frac{du}{dt}$ არის ერთეული მასის ინერციის ძალა მოპირდაპირე ნიშნით.

თუ გავითვალისწინებთ, რომ $u = f(\ell, t)$, გვექნება:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial \ell}\frac{d\ell}{dt} + \frac{du}{dt} = u\frac{du}{d\ell} + \frac{du}{dt} = \frac{\partial}{\partial \ell}\left(\frac{u^2}{2}\right) + \frac{du}{dt}. \tag{16.3}$$

F_ℓ-ის და $\frac{du}{dt}$-ს ეს მნიშვნელობები ჩავსვათ (16.1) განტოლებაში

$$-\frac{\partial}{\partial \ell}(gz) - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial \ell} - \frac{\partial}{\partial \ell}\left(\frac{u^2}{2}\right) - \frac{\partial u}{\partial t} = 0.$$

თუ ამ გამოსახულების თითოეულ წევრს გავყოფთ ერთეული მასის წონაზე (ე.ი. g სიდიდეზე), მივიღებთ განტოლებას ერთეული წონის მქონე სითხისათვის:

$$-\frac{\partial}{\partial \ell}\left(z+\frac{\partial p}{\rho g}+\frac{u^2}{2g}\right)+\frac{1}{g}\frac{\partial u}{\partial t}=0\,. \tag{16.4}$$

ამ უკანასკნელის ინტეგრირება შევასრულოთ დროის მოცემული მომენტში ℓ კოორდინატით. მისი $d\ell$-ზე გამრავლებით და 1-1-დან 2-2 კვეთამდე ინტეგრირებით მივიღებთ ბერნულის ჩვენთვის ცნობილ განტოლებას იდეალური სითხის ელემენტარული ჭავლისათვის ერთი დამატებითი წევრით:

$$z_1+\frac{p_1}{\gamma}+\frac{u_1^2}{2g}=z_2+\frac{p_2}{\gamma}+\frac{u_2^2}{2g}+\frac{1}{g}\int_{\ell_1}^{\ell_2}\frac{\partial u}{\partial t}d\ell\,. \tag{16.5}$$

რეალური სითხის ელემენტარული ჭავლისათვის (16.5) განტოლება ასე ჩაიწერება:

$$z_1+\frac{p_1}{\gamma}+\frac{u_1^2}{2g}=z_2+\frac{p_2}{\gamma}+\frac{u_2^2}{2g}+h'_{\text{ხახ}}+h'_i\,, \tag{16.6}$$

სადაც $h'_{\text{ხახ}}$ არის დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგი განსახილველ კვეთებს შორის; h'_i – ე.წ. **ინერციული დაწნევა**[4]:

$$h'_i=\frac{1}{g}\int_{\ell_1}^{\ell_2}\frac{\partial u}{\partial t}d\ell\,. \tag{16.7}$$

h'_i გამოვსახოთ ელემენტარული ჭავლის dQ ხარჯით. ამისათვის გავიხსენოთ, რომ

$$u=\frac{dQ}{\delta\omega}\,, \tag{16.8}$$

სადაც $\delta\omega$ არის ელემენტარული ჭავლის განივკვეთის ფართობი, რომელიც არ არის დროზე დამოკიდებული, რადგანაც განსახილველი მილის კედლები არადეფორმირებადია.

მაშინ

$$\frac{\partial u}{\partial t}=\frac{1}{\delta\omega}\frac{\partial(dQ)}{\partial t}\,. \tag{16.9}$$

(16.9)-ის გათვალისწინებით (16.7) ასეთ სახეს მიიღებს:

---

[4] ნიშანი „პრიმი“ $h'_{\text{ხახ}}$ და h'_i-თან მიუთითებს, რომ ეს სიდიდეები მიეკუთვნება ელემენტარულ ჭავლს და არა მთელ ნაკადს.

$$h_i' = \frac{1}{g}\int_{\ell_1}^{\ell_2}\frac{\partial u}{\partial t}d\ell = \frac{1}{g}\int_{\ell_1}^{\ell_2}\frac{1}{\delta\omega}\frac{\partial (dQ)}{\partial t}d\ell \qquad (16.10)$$

ანუ

$$h_i' = \frac{1}{g}\frac{\partial (dQ)}{\partial t}\int_{\ell_1}^{\ell_2}\frac{d\ell}{\delta\omega}, \qquad (16.11)$$

რადგან $\frac{\partial (dQ)}{\partial t}$ სიდიდე არ არის ℓ-ზე დამოკიდებული.

h_i' სიდიდეს აქვს სიგრძის განზომილება და, როგორც აღვნიშნეთ, ინერციულ დაწნევას უწოდებენ. ასეთი სახელწოდება აიხსნება შემდეგით.

მოძრავი სითხის **ერთეულ წონაზე** მოქმედი ინერციის ძალა ტოლია[5]:

$$I' = -\frac{1}{g}\frac{du}{dt}, \qquad (16.12)$$

სადაც $\frac{1}{d}$ არის ერთეული წონის მქონე სითხის მასა (მართლაც, $mg = 1$, საიდანაც $m = \frac{1}{g}$).

(16.12) განტოლება (15.3)-ის გათვალისწინებით ასე ჩაიწერება:

$$I' = -\frac{1}{g}\left[\frac{\partial}{\partial \ell}\left(\frac{u^2}{2}\right) + \frac{\partial u}{\partial t}\right] \qquad (16.13)$$

ანუ

$$I' = -\frac{\partial}{\partial \ell}\left(\frac{u^2}{2g}\right) - \frac{1}{g}\frac{\partial u}{\partial t} = I_ა' + I_ლ', \qquad (16.14)$$

სადაც

$$I_ა' = -\frac{\partial}{\partial \ell}\left(\frac{u^2}{2}\right) = f_1\left(\frac{\partial u}{\partial \ell}\right); \qquad (16.15)$$

$$I_ლ' = -\frac{1}{g}\frac{\partial u}{\partial t} = f_2\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right). \qquad (16.16)$$

---

[5] ნიშანი „პრიმი“ $I_ა'$ და $I_ლ'$ სიდიდეებთან მიუთითებს, რომ ისინი მიეკუთვნება ერთეულ წონას და არა ერთეულ მასას.

როგორც ვხედავთ, ინერციის კუთრი ძალა (I') შედგება ორი ნაწილისაგან – ე.წ. **კონვექციური** ($I'_{კ}$) და **ლოკალური** (I'_{c}) ნაწილებისაგან. კონვექციური ნაწილი განპირობებულია ჭავლის ℓ სიგრძეზე u სიჩქარის ცვლილებით. თუ (16.15) გამოსახულებას გავამრავლებთ $d\ell$-ზე, მაშინ მისი ინტეგრირებით 1-1-დან 2-2 კვეთამდე მივიღებთ:

$$\partial h_u = -\left(\frac{u_2^2}{2g} - \frac{u_1^2}{2g}\right). \qquad (16.17)$$

აქედან ჩანს, რომ სიჩქარითი დაწნევების სხვაობა (კუთრი კინეტიკური ენერგიის ნამატი განსახილველ კვეთებს შორის) სითხის როგორც დამყარებული, ისე დაუმყარებელი მოძრაობისას ითვალისწინებს ინერციის კუთრი ძალის კონვექციურ ნაწილს და განისაზღვრება $\frac{\partial u}{\partial \ell}$ კერძო წარმოებულით.

ლოკალური ნაწილი განპირობებულია სივრცის მოცემულ წერტილში დროის მიხედვით u სიჩქარის ცვლილებით. ის თავს იჩენს სითხის მხოლოდ დაუმყარებელი მოძრაობისას და განისაზღვრება $\frac{\partial u}{\partial t}$ კერძო წარმოებულით. (16.16) გამოსახულების $d\ell$-ზე გამრავლებითა და 1-1-დან 2-2 კვეთამდე ინტეგრირებით მივიღებთ h'_i-ს. მაშასადამე, h'_i არის დაწნევა, რომელიც ითვალისწინებს **ინერციის ძალის მხოლოდ ლოკალურ ნაწილს.** აღნიშნულის გამო h'_i სიდიდეს ხშირად ინერციულ დაწნევას უწოდებენ.

(16.6) განტოლება, რომელიც მიეკუთვნება დროის რაიმე გარკვეულ მომენტს, ითვალისწინებს ინერციის ლოკალურ ძალებს.

2. **ბერნულის განტოლება რეალური სითხის მთელი ნაკადისათვის, რომელიც ითვალისწინებს ინერციის ლოკალურ ძალებს. ბერნულის განტოლებას რეალური სითხის მთელი ნაკადისათვის დაუმყარებელი მდოვრედ ცვალებადი მოძრაობისას** ასეთი სახე ექნება:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_{\text{ხარ}} + h_i, \qquad (16.18)$$

სადაც h_i არის დაწნევა, რომელიც იკარგება დროის მოცემულ მომენტში 1-1 და 2-2 კვეთებს შორის მოთავსებული ერთეული წონის მქონე სითხის ინერციის ლოკალური ძალის დაძლევაზე. თუ მას გამოვსახავთ v საშუალო

სიჩქარით, მაშინ მივიღებთ (16.7)-ის ანალოგიურ გამოსახულებას:

$$h_i = \frac{\alpha'}{g}\int_{\ell_1}^{\ell_2}\frac{\partial v}{\partial t}d\ell\,. \tag{16.19}$$

აქ α' არის მოძრაობის რაოდენობის კოეფიციენტი. დანარჩენი წევრები (16.18) გამოსახულებაში ჩვენთვის ცნობილია.

გავითვალისწინოთ, რომ

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial(\omega v)}{\partial t} = \omega\frac{\partial v}{\partial t}\,. \tag{16.20}$$

აქედან

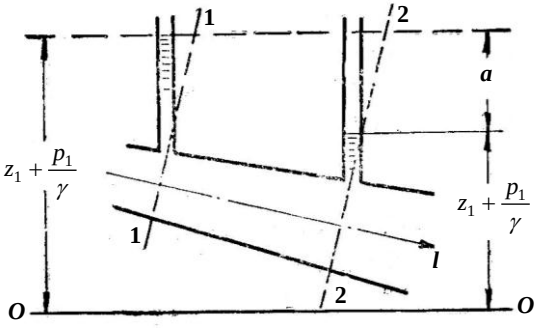
$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{\omega}\frac{\partial Q}{\partial t}\,. \tag{16.21}$$

ამიტომ (16.19) ფორმულას შეიძლება ასეთი სახე მივცეთ:

$$h_i' = \frac{\alpha'}{g}\frac{\partial Q}{\partial t}\int_{\ell_1}^{\ell_2}\frac{d\ell}{\omega}\,. \tag{16.22}$$

(16.18) განტოლებათა შეიძლება სხვა ფორმითაც ჩავწეროთ. აღვნიშნოთ a-თი (ნახ. 16.2) მილსადენის ორ კვეთთან მიერთებულ პიეზომეტრებში სითხის დონეთა ნიშნულებს შორის სხვაობა დროის მოცემული მომენტში:

$$a = \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma_1}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma_1}\right).$$



ნახ. 16.2

მაშინ (16.18) გამოსახულება ასეთ სახეს მიიღებს:

$$a = \frac{\alpha}{2g}(v_2^2 - v_1^2) + h_{\text{სიგ}} + h_i \tag{16.23}$$

დასასრულს, შევნიშნავთ შემდეგს:

1) დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგს ($h_{სიგ}$) დაუმყარებელი მოძრაობისას მიახლოებით გამოვთვლით დამყარებული თანაბარი მოძრაობის ფორმულებით. კერძოდ,

$$h_{სიგ} = \lambda \frac{\ell}{d} \frac{v^2}{2g}, \tag{16.24}$$

სადაც $\ell = \ell_2 - \ell_1$.

ცხადია, საკითხისადმი ასეთი მიდგომა არასწორია, მაგრამ ეს გამოწვეულია იმით, რომ არ გაგვაჩნია საკმარისი მონაცემები დაუმყარებელი მოძრაობისას დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგის გამოსათვლელად.

2) თუ სიბრტყის მოძრაობა დროის მიხედვით საკმაოდ მცირედ იცვლება, მაშინ ბერნულის განტოლების h_i წევრი, მისი სიმცირის გამო, შეიძლება უგულებელვყოთ. მივიღებთ ბერნულის ჩვეულებრივ განტოლებას (5.60) სითხის დამყარებული მდოვრედ ცვალებადი მოძრაობისათვის.

3) დამყარებული რეჟიმისას იმ ორ კვეთში, რომლისთვისაც ბერნულის განტოლებას ვადგენთ, სითხის მოძრაობა უნდა იყოს აუცილებლად მდოვრედ ცვალებადი, ხოლო ამ კვეთებს შორის მოძრაობა შეიძლება მდოვრედ ცვალებადისაგან განსხვავდებოდეს.

დაუმყარებელი მოძრაობისას ბერნულის განტოლებით (რომელიც დამატებით h_i წევრს შეიცავს) შეიძლება ვისარგებლოთ მხოლოდ მაშინ, თუ მოძრაობა მდოვრედ ცვალებადია არა მარტო განსახილველ კვეთებში, არამედ მათ შორისაც.

4) (16.18) და (16.23) განტოლებებში შედის მხოლოდ დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგი ($h_{სიგ}$), რადგან ეს გამოსახულებები მივიღეთ იმ დაშვებით, რომ განსახილველ კვეთებს შორის ადგილობრივ წინაღობები არ გვქონდა. მიუხედავად ამისა, აღნიშნული განტოლებებით შეიძლება ვისარგებლოთ მაშინაც, თუ მილსადენის სიგრძეზე შეზღუდული რაოდენობით გვხვდება ადგილობრივი წინაღობებიც. ასეთ შემთხვევაში $h_{სიგ}$ (16.18) და (16.23) განტოლებები აღნიშნავს დაწნევის სრულ დანაკარგს (როგორც სიგრძეზე, ისე ადგილობრივს), ხოლო h_i წევრის გამოთვლისას, ინერციის ლოკალურ ძალებს, რომლებიც თავს იჩენს ადგილობრივ წინაღობებთან, უგულებელყოფენ.

5) h_i სიდიდე, რომელიც (16.19) ან (16.22) ფორმულით გამოისახება, შეიძლება ასეც წარმოვადგინოთ:

$$h_1 = \frac{dE_0}{\gamma Q dt}, \tag{16.25}$$

სადაც dE_0 არის 1-1 და 2-2 კვეთებს შორის (ნახ. 16.1) მოთავსებული სითხის კინეტიკური ენერგიის ცვლილება dt დროს განმავლობაში.

3. **ცილინდრულ მილში სითხის დაუმყარებელი მოძრაობის ზოგადი საანგარიშო დამოკიდებულება.** ცილინდრული მილისათვის დროის მოცემულ მომენტში $v_1 = v_2$. ამიტომ (16.23) გამოსახულებიდან გვექნება:

$$a = h_{\text{სიგ}} + h_i . \tag{16.26}$$

ამ გამოსახულებაში $h_{\text{სიგ}}$ გამოითვლება (16.24) ფორმულით. h_i წევრისათვის, იმის გათვალისწინებით, რომ ნაკადის გასწვრივ $\omega = const$, (16.22) დამოკიდებულებიდან მივიღებთ:

$$h_1 = \frac{\alpha'}{g}\frac{\partial Q}{\partial t}\int_{\ell_1}^{\ell_2}\frac{d\ell}{\omega} = \frac{\alpha'}{g}\frac{\partial\left(\frac{Q}{\omega}\right)}{\partial t}\int_{\ell_1}^{\ell_2} d\ell = \frac{\alpha'\ell}{g}\frac{\partial v}{\partial t} . \tag{16.27}$$

მაგრამ

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial \ell}\frac{\partial \ell}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} ,$$

რადგან ცილინდრული მილსადენისათვის $\frac{\partial v}{\partial \ell} = 0$-ს. ამიტომ (15.27) გამოსახულება ასე ჩაიწერება:

$$h_i = \frac{\alpha'\ell}{g}\frac{\partial v}{\partial t} . \tag{16.28}$$

(16.24) და (16.28) გამოსახულებათა გათვალისწინებით **ცილინდრულ მილში სითხის დაუმყარებელი მოძრაობის საანგარიშო ფორმულა** ასეთ სახეს მიიღებს:

$$a = \lambda\frac{\ell}{d}\frac{v^2}{2g} + \frac{\alpha'\ell}{g}\frac{\partial v}{\partial t} . \tag{16.29}$$

4. **ბერნულის განტოლების გეომეტრიული ინტერპრეტაცია სითხის დაუმყარებელი მოძრაობისათვის.** განვიხილოთ დროის მიხედვით სითხის **აჩქარებული** და **შენელებული** მოძრაობა.

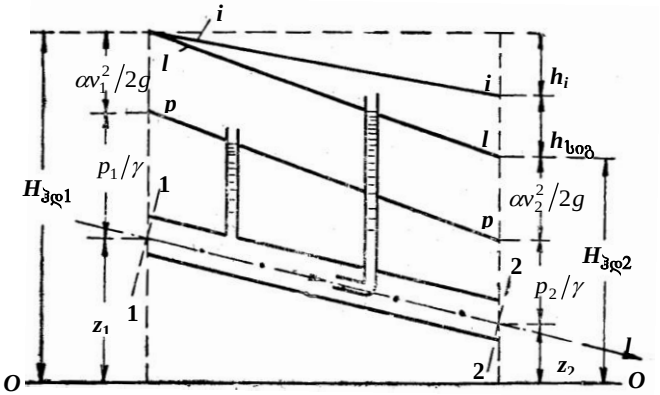
ა) დროის მიხედვით სითხის აჩქარებული მოძრაობისას სრული დაწნევა რომელიმე 1-1 კვეთში,

$$H_{\text{ჰდ.1}} = z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} ,$$

იხარჯება 2-2 კვეთში $H_{\text{ჰდ.2}}$ სრული ჰიდროდინამიკური დაწნევის შექმნაზე, სიგრძეზე წინაღობისა და განსახილველ კვეთებს შორის სითხის ინერციის ლოკალური ძალების დაძლევაზე (ნახ. 16.3). ე.ი.

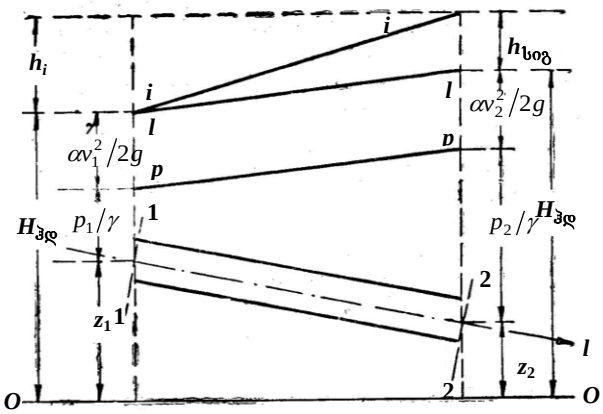
$$H_{ჰდ1} = H_{ჰდ2} + h_{სიგ} + |h_i| . \qquad (16.30)$$

შევნიშნავთ, რომ h_i **სიდიდე, რომელიც აჩქარებული მოძრაობისას დადებითია, არ უნდა განვიხილოთ, როგორც დაკარგული ენერგიის ნაწილი.**



ნახ. 16.3

ბ) დროის მიხედვით სითხის შენელებული მოძრაობისას h_i სიდიდე უარყოფითია, ე.ი. ერთი კვეთიდან მეორემდე გამოთავისუფლდება h_i კინეტიკური ენერგია, და თუ ამ მანძილზე დაწნევის დანაკარგი მცირეა ($h_{სიგ} < h_i$), სრული დაწნევა დროის მოცემული მომენტში განსახილველ კვეთებს შორის გაიზრდება (ნახ. 16.4). ამ დროს



ნახ. 16.4

$$H_{ჰდ1} = H_{ჰდ2} + h_{სიგ} - |h_i|. \qquad (16.31)$$

ხაზგასმით აღვნიშნავთ, რომ (16.3) და (16.4) ნახაზებზე ნაჩვენები სქემები პასუხობს დროის ერთ გარკვეულ მომენტს. დროის სხვა მომენტისათვის *e-e* და *p-p* და *i-i* წირები მდებარეობას შეიცვლის.

§ 16.3. სითხის დაუმყარებელი დაწნევითი მოძრაობა, როცა აუცილებელია სითხის კუმშვადობისა და მილსადენის კედლების დეფორმირების გათვალისწინება. ჰიდრავლიკური დარტყმა

ჰიდრავლიკური დარტყმა ეწოდება მოვლენას, რომლის დროსაც სითხის მოძრაობის საშუალო სიჩქარის მკვეთრი ცვლილება სადაწნეო მილსადენში იწვევს ჰიდრომექანიკური წნევის ასევე მკვეთრ ცვლილებას. ჰიდრავლიკური დარტყმა განპირობებულია მილსადენში მოთავსებული სითხის იმ მასის ინერციით, რომლის სიჩქარის ცვლილებაც ხდება. ეს მოვლენა ჰიდრავლიკაში განსაკუთრებული შემთხვევაა, როდესაც აუცილებელია სითხის კუმშვადობისა და მილსადენის კედლების დეფორმირების გათვალისწინება. ჰიდრავლიკური დარტყმა იწვევს მილსადენში წნევის დამატებით გაზრდას ან შემცირებას რამდენიმე ათეულჯერ, ხოლო ზოგჯერ ასეულჯერაც კი.

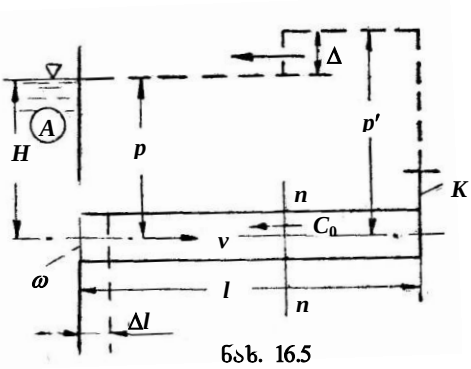
ჰიდრავლიკური დარტყმის თეორია პირველად დაამუშავა გამოჩენილმა რუსმა მეცნიერმა ნ. ჟუკოვსკიმ. ამ მოვლენის ფიზიკური პროცესის ძირითადი სქემა, ნ. ჟუკოვსკის თეორიის მიხედვით, შემდეგში მდგომარეობს:

ვთქვათ, გვაქვს ℓ სიგრძისა და D დიამეტრის ჰორიზონტალური მილსადენი, რომელიც მიერთებულია A რეზერვუარიდან (ნახ. 16.5). დაწნევა მილის შესასვლელი კვეთის ცენტრზე $H = const$. მილსადენის ბოლოზე მოთავსებულია K საკეტი, რომლის საშუალებით ხდება ნაკადის v საშუალო სიჩქარის ცვლილება. ჩავთვალოთ, რომ **სითხე არაბლანტი, მაგრამ კუმშვადია და ემორჩილება ჰუკის კანონს, ხოლო მილსადენის კედლები – აბსოლუტურად ხისტი.**

განვიხილოთ მილსადენის **მყისი ჩაკეტვის** შემთხვევა.

პირველი ფაზა. ვთქვათ, K საკეტი ნაწილობრივ ღიაა და მილსადენში სითხე მოძრაობს რაიმე v საშუალო სიჩქარითა და p საწყისი წნევით. მილსადენის უეცრად და სრულად ჩაკეტვისას ასევე უეცრად უნდა გაჩერდეს სითხის მთელი მოძრავი მასა.

მაგრამ რეალური სითხე, რომელიც ხასიათდება დრეკადობით, გაჩერდება არა მყის, არამედ თანდათანობით. ამასთან, ჯერ გაჩერდება K საკეტთან მდებარე უახლოესი შრე, შემდეგ მისი მომდევნო შრე და ა.შ. ამ შრეების სიჩქარის ნულამდე შემცირების გამო ხდება მათი კინეტიკური ენერგიის გადასვლა პოტენციურში, რაც იწვევს წნევის გარკვეული Δp სიდიდით გაზრდას. რაც მეტია მილსადენის სიგრძე, მით მეტია მასში სითხის მასა და მისი კინეტიკური ენერგია და მით მეტი იქნება Δp სიდიდე.



ნახ. 16.5

სითხის კუმშვის დრეკადი დეფორმაცია და წნევის ზრდა ტალღის სახით ვრცელდება ზემოთ, დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით (A რეზერვუარისაკენ) და Δt დროში მიაღწევს მილის ბოლოს. იმის გამო, რომ მოხდა სითხის შეკუმშვა, მილის რეზერვუართან მიერთების ადგილას გამოთავისუფლდება სივრცე $\Delta \ell$ მანძილზე, რომელსაც შეავსებს რეზერვუარიდან შემოსული სითხე. ამით მთავრდება ჰიდრავლიკური დარტყმის პირველი ფაზა, როცა სითხე მილსადენში იმყოფება უძრავ მდგომარეობაში ($v = 0$) გაზრდილი $p' = p + \Delta p$ წნევის ქვეშ. ამ დროს სითხის სიმკვრივე $\rho' = \rho + \Delta\rho$ სიდიდის ტოლია.

დრეკადი დეფორმაციისა და წნევის ზრდის (ჰიდრავლიკური დარტყმის) გავრცელების სიჩქარე, **დარტყმის ტალღის გავრცელების სიჩქარე** გამოისახება ფორმულით:

$$c_0 = \ell / \Delta t \,, \tag{16.32}$$

სადაც ℓ და Δt არის, შესაბამისად, მილის სიგრძე და პირველი ფაზის ხანგრძლივობა.

მეორე ფაზა (გაფართოების ფაზა). როგორც აღვნიშნეთ, პირველი ფაზის ბოლო მომენტში სითხის მთელი მასა მილსადენში შეკუმშულია და p' წნევის ქვეშ იმყოფება უძრაობის მდგომარეობაში. მაგრამ ასეთი მდგომარეობა არამდგრადია, რადგან წნევა მილსადენში (p') გაცილებით მეტია რეზერვუარში (მილის შესასვლელ კვეთთან) წნევაზე (p). ეს იწვევს შეკუმშული სითხის

გაფართოებას მილში, რის შედეგადაც სითხის მასა მიდის რეზერვუარისაკენ; შეკუმშული სითხის დრეკადი ენერგია კვლავ გადადის კინეტიკურში, სითხის ნაწილაკები თანდათანობით იძენს v სიჩქარეს. ამასთან, წნევა შრიდან შრემდე საკეტისაკენ მცირდება დიდი სიჩქარით. მეორე ფაზის ბოლოს მთელი სითხე მილსადენში იმოძრავებს A რეზერვუარისაკენ v საშუალო სიჩქარით.

ერთი სრული ციკლის ხანგრძლივობას (t), რომელიც მოიცავს წნევის გაზრდას და შემცირებას, **დარტყმის ფაზას** ან **ფაზის ხანგრძლივობას** უწოდებენ. თუ ჩავთვლით, რომ დარტყმის ტალღის გავრცელების სიჩქარე წნევის როგორც გაზრდის, ისე შემცირებისას ერთნაირია, მაშინ დარტყმის ფაზა გამოითვლება ფორმულით:

$$t = 2\ell / c_0 \ . \qquad (16.33)$$

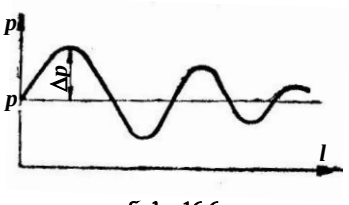
მესამე ფაზა (სითხის გაჭიმვისა და უძრაობის ფაზა). ამ ფაზის საწყის მომენტში მთელი სითხე მოძრაობს საწინააღმდეგო მიმართულებით (რეზერვუარისაკენ) და ცდილობს მოწყდეს საკეტს. შედეგად იწყება სითხის გაჭიმვა წნევის შემდგომი შემცირებით $p'' = p - \Delta p$ სიდიდემდე. მესამე ფაზის ბოლოს მილსადენში სითხის მოძრაობა მთლიანად ჩერდება; სითხე იმყოფება შემცირებული p'' წნევის ქვეშ. მაგრამ ასეთი მდგომარეობა კვლავ არამდგრადია, რადგანაც რეზერვუარში წნევა (p) მეტია მილსადენში წნევაზე (p'').

მეოთხე ფაზა (მოძრაობის იმ მდგომარეობამდე აღდგენის ფაზა, რომელსაც ადგილი ჰქონდა მილსადენის ჩაკეტვამდე). $\Delta p = p - p''$ წნევათა სხვაობის გავლენით დაიწყება სითხის მოძრაობა საკეტისაკენ. ასევე გაიზრდება წნევაც საწყის p მნიშვნელობამდე. მეოთხე ფაზის ბოლოს სითხე მილსადენში იმოძრავებს v საშუალო სიჩქარით და, საერთოდ, იქნება ისეთ მდგომარეობაში, როგორშიც იმყოფებოდა მოლსადენის K საკეტით ჩაკეტვამდე. $4\ell / v_0$ დროს ჰიდრავლიკური დარტყმის პერიოდს უწოდებენ.

აღნიშნულიდან ჩანს, რომ სითხის მოძრაობის მახასიათებლები ჰიდრავლიკური დარტყმისას იცვლება დროის მიხედვით. მაშასადამე, ჰიდრავლიკური დარტყმა დაუმყარებელი მოძრაობის მაგალითია.

იმის გამო, რომ მილსადენი ჩაკეტილია, ხოლო მოძრაობა შეესაბამება ჩაკეტვამდე არსებულ პირობებს, ამიტომ მეოთხე ფაზის ბოლოს კვლავ მოხდება ჰიდრავლიკური დარტყმა და

პროცესი უსასრულოდ გაგრძელდება. მაგრამ ეს ასე არ ხდება რეალურ პირობებში, სითხის სიბლანტისა და მილსადენის კედლების დეფორმირების (დრეკადი დეფორმაციის) გამო, ჰიდრავლიკური დარტყმის მოვლენა **მილსადენის პროცესია** (ნახ. 16.6).



ნახ. 16.6

შევადგინოთ იმპულსების განტოლება პირველი ფაზის ბოლო მომენტისათვის, როდესაც სითხის მასა ℓ სიგრძის მილსადენში იმყოფება უძრავ მდგომარეობაში გაზრდილი $p+\Delta p$ წნევის ქვეშ

$$m(v_{საბ} - v_{საწ}) = P\Delta t\,,$$

სადაც $m = \rho\omega\ell$ არის სითხის მასა; ω – ცოცხალი კვეთის ფართობი (მილის განივკვეთის ფართობი); $v_{საბ} = 0$ – საბოლოო სიჩქარე; $v_{საწ} = v$ – საწყისი სიჩქარე; P – ჯამური წნევის ძალა; $P = p\omega - (p+\Delta p)\omega = -\omega\Delta p$; $\Delta t = \ell/c_0$ – პირველი ფაზის ხანგრძლივობა.

მაშასადამე, გვექნება:

$$-\rho\omega\ell v = -\omega\Delta p\frac{\ell}{c_0}\,,$$

საიდანაც

$$\Delta p = \rho v c_0\,. \qquad (16.34)$$

მიღებული გამოსახულება ცნობილია ნ. ჟუკოვსკის ფორმულის სახელწოდებით და ჰიდრავლიკური დარტყმით გამოწვეული წნევის გადამეტების გამოსათვლელი დამოკიდებულება.

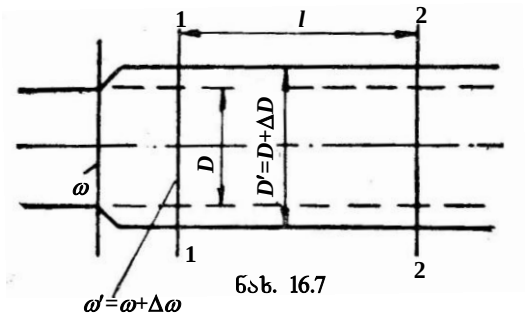
იმისათვის, რომ (16.34) ფორმულით პრაქტიკულად ვისარგებლოთ, საჭიროა ვიცოდეთ დარტყმის ტალღის გავრცელების C_0 სიჩქარე. თუ ჩავთვლით, რომ მილსადენის კედლები აბსოლუტურად ხისტია, მაშინ C_0 შეიძლება გამოვთვალოთ ფორმულით:

$$c_0 = \sqrt{K/\rho}\,, \qquad (16.35)$$

სადაც K არის განსახილველი სითხის დრეკადობის მოდული.

შევნიშნავთ, რომ ასეთივე ფორმულით გამოითვლება მდგარ სითხეში ბგერის გავრცელების სიჩქარეც.

თუ გავითვალისწინებთ, რომ მილსადენის კედლები დრეკადია (დეფორმირებადია), მაშინ დარტყმის ტალღის გავრცელების სიჩქარე ნაკლები აღმოჩნდება (16.35) ფორმულით გამოთვლილ მნიშვნელობაზე. ეს იმით აიხსნება, რომ ჰიდრავლიკური დარტყმის შედეგად, მილსადენში წნევის გაზრდის გამო, მილის კედლები



ნახ. 16.7

ფართოვდება და განივი კვეთი (ω) იზრდება $\Delta\omega$ სიდიდით. ამიტომ, ℓ სიგრძის უბან-ზე (ნახ. 16.7) მილის შიგა მოცულობა გაიზრ-დება $\Delta W = \Delta\rho\ell$ სიდიდით. ეს სივრცე ივსება სით-ხით, კუმშვის მოჩვენები-თი მნიშვნელობა იზრდე-ბა, ხოლო დრეკადობის მოდული მცირდება. სწო-რედ ეს იწვევს დარტყ-მის ტაღლის გავრცელე-ბის სიჩქარის შემცირებას

$$c = \sqrt{K_0/\rho}\,. \tag{16.36}$$

სადაც $K_0 < K$ არის ე.წ. **დაყვანილი** (მოჩვენებითი) **დრეკადობის მოდული**. მის გამოსათვლელად სარგებლობენ **კორტევეგის** ფორმულით:

$$K_0 = \frac{K}{1+\dfrac{K}{E}\dfrac{D}{\delta}}\,. \tag{16.37}$$

აქ K არის მოცემული სითხის დრეკადობის მოდული; E – მილის კედლის მასალის დრეკადობის მოდული; D და δ – შესაბამისად მილის დიამეტრი და კედლის სისქე. (16.35) და (16.37) გამოსახუ-ლებების გათვალისწინებით (16.36) ფორმულა ასეთ სახეს მიიღებს:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho\left(1+\dfrac{K}{E}\dfrac{D}{\delta}\right)}} = \frac{\sqrt{K/\rho}}{\sqrt{1+\dfrac{K}{E}\dfrac{D}{\delta}}} \tag{16.38}$$

ანუ

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{1+\dfrac{K}{E}\dfrac{D}{\delta}}}\,. \tag{16.39}$$

წყლისათვის დრეკადობის მოდული $K \approx 20{,}2\cdot 10^8$ პა, ხოლო სიმკვრივე – $\rho = 1000$ კგ/მ^3, ამიტომ $c_0 = \sqrt{K/\rho} = \sqrt{20.2\cdot 10^8/1000} \approx$ ≈ 1425 მ/წმ. მაშინ c-ს გამოსათვლელად გვექნება შემდეგი ფორ-მულა:

$$c = \frac{1425}{\sqrt{1+\frac{K}{E}\frac{D}{\delta}}}. \qquad (16.40)$$

ამგვარად, ჰიდრავლიკური დარტყმით გამოწვეული წნევის გადამეტების საანგარიშო ფორმულა, სითხის კუმშვადობისა და მილსადენის კედლების დეფორმირების გათვალისწინებით, ასე ჩაიწერება:

$$\Delta p = \rho v c = \frac{1425\rho v}{\sqrt{1+\frac{K}{E}\frac{D}{\delta}}}. \qquad (16.41)$$

ფოლადის მილებისათვის ფარდობა $K/E = 0{,}01$, ხოლო თუჯის მილებისათვის – 0,02-ს.

თუ მილსადენში სითხის მოძრაობის სწრაფად შეჩერებისათვის საჭირო დრო დარტყმის ფაზაზე $(t = 2\ell/c)$ ნაკლებია $t_{ჩაკ} < t$ (სადაც $t_{ჩაკ}$ არის საკეტით ან საკვალთით მილსადენის ჩაკეტვის დრო), მაშინ **ჰიდრავლიკურ დარტყმას პირდაპირს** უწოდებენ. მილსადენში სითხის მოძრაობის არა მყისად, არამედ თანდათან შეჩერების შემთხვევაში ჰიდრავლიკური დარტყმის მოვლენა რამდენადმე სხვაგვარ პირობებში წარიმართება. მილსადენის ჩაკეტვის დროის გავლენა დარტყმის ტალღის სიდიდეზე განსაკუთრებით საგრძნობია, თუ ჩაკეტვის $t_{ჩაკ}$ დრო დარტყმის ფაზაზე მეტია $(t_{ჩაკ} > t)$. ასეთი **დარტყმას არაპირდაპირს** უწოდებენ. ცხადია, არაპირდაპირი ჰიდრავლიკური დარტყმისას წნევის გადამეტების სიდიდე ნაკლებია, ვიდრე პირდაპირი ჰიდრავლიკური დარტყმისას, რაც იმით აიხსნება, რომ ამ შემთხვევაში (არაპირდაპირი დარტყმისას) სითხის მოძრაობა მილსადენში t დროში მთლიანად არ ჩერდება და, მაშასადამე, არ ხდება სითხის მთელი კინეტიკური ენერგიის პოტენციურში გადასვლა.

არაპირდაპირი დარტყმისას წნევის გადამეტების სიდიდე მიახლოებით შეიძლება გამოვთვალოთ შემდეგი ფორმულით:

$$\Delta p = \rho v c \cdot \frac{t}{t_{ჩაკ}}. \qquad (16.42)$$

ჰიდრავლიკური დარტყმის მოვლენას ხშირად ვხვდებით ჰიდროსადგურების სადაწნეო ტრაქტში, როდესაც სადგურის დატვირთვის მკვეთრ ცვლილებასთან დაკავშირებით სრულდება სატურბინო საკეტების ან ტურბინის მიმმართველი აპარატის

სწრაფი მანევრირება (დახურვა ან გაღება). ჰიდრავლიკური დარტყმა წარმოიქმნება აგრეთვე სადაწნეო მილსადენში მომუშავე ტუმბოს ამორთვის შედეგად, წყალსადენის მაგისტრალებში საკვალთების მკვეთრი რეგულირებისას და სხვა. ჰიდრავლიკური მოვლენა, როგორც ვნახეთ, იწვევს წნევის მკვეთრ ცვლილებას, რაც ხშირად მილსადენის ავარიით მთავრდება. ჰიდრავლიკური დარტყმის მოვლენის თავიდან აცილების ან შესუსტების მიზნით, საინჟინრო პრაქტიკაში ატარებენ მრავალ სპეციალურ ღონისძიებას.

შევნიშნავთ, რომ ჰიდრავლიკური დარტყმის არასასურველი მოვლენა გამოყენებულია სასარგებლო მიზნითაც. კერძოდ, წყლის ამწის – ჰიდრავლიკური ტარანის მოქმედების პრინციპი ემყარება ჰიდრავლიკური დარტყმის მოვლენას.

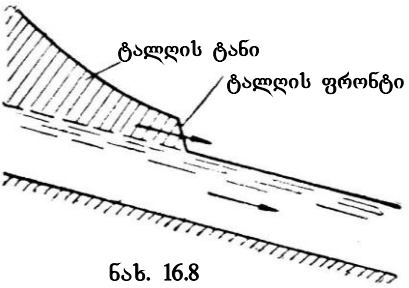
§ 16.4. სითხის დაუმყარებელი მდოვრედ ცვალებადი მოძრაობა ღია კალაპოტებში

1. **ზოგადი ცნობები. გადაადგილების ტალღის სახეები.** დაუმყარებელი მოძრაობა ჰიდროტექნიკურ პრაქტიკაში ძალზე ხშირად გვხვდება. კაშხლის საკეტების მანევრირება, ჰიდროსადგურების სადღეღამისო გრაფიკით მუშაობა, სადგურის ავარიული განტვირთვა და სხვა. ყოველივე ეს არღვევს ნაკადის პირვანდელ, ჩვეულებრივ, დამყარებულ რეჟიმს და იწვევს დაუმყარებელი მოძრაობის წარმოქმნას, რაც განაპირობებს სადინარის კვეთში ან წყლის დონის ნიშნულის, ან ნაკადის ხარჯის ცვლილებას დროის მიხედვით. კვეთი, რომელშიც ეს ცვლილებები შეიმჩნევა, არის **ტალღის ან ტალღების** წარმოქმნის წყარო, რაც ასე დამახასიათებელია დაუმყარებელი მოძრაობისათვის. ამიტომ, ამ უკანასკნელს ხშირად **ტალღურ მოძრაობას** უწოდებენ.

ზღვის ტალღებისაგან განსხვავებით, დაუმყარებელი მოძრაობისას წარმოქმნილი ტალღებისათვის დამახასიათებელია მნიშვნელოვანი სიდიდის ხარჯის გადატანის უნარი, რის გამოც მათ **გადაადგილების ტალღებს** უწოდებენ. გადაადგილების ტალღის მყისი პროფილი ხასიათდება ძალზე მცირე სიმრუდით; ნაკადის ელემენტები ამ შემთხვევაში იცვლება მდოვრედ როგორც დროში, ისე ნაკადის სიგრძეზე ისე, რომ მსგავსი დაუმყარებელი მოძრაობა შეიძლება მდოვრედ ცვალებად მოძრაობად ჩავთვალოთ. თუმცა, ზოგ შემთხვევაში, საინჟინრო პრაქტიკაში ვხვდებით ე.წ. **წყვეტილ ტალღას,** რომელიც ხასიათდება ციცაბო, ზოგჯერ თითქმის ვერტიკალური ფრონტით და რომელსაც მოცემულ

კვეთში შეუძლია გამოიწვიოს წყლის დონის ნიშნულის მკვეთრი ცვლილება.

დაუმყარებელი მოძრაობისას ტალღა შეიძლება გავრცელდეს როგორც ქვემოთ, დინების მიმართულებით, ისე საწინააღმდეგოდ. პირველ შემთხვევაში ტალღას **პირდაპირი (დამავალი),** ხოლო მეორე შემთხვევაში **შექცეული (აღმავალი)** ეწოდება. თუ ტალღა ხასიათდება დონის აწევით, მას **დადებითს,** ხოლო პირიქით შემთხვევაში **უარყოფითს** უწოდებენ.



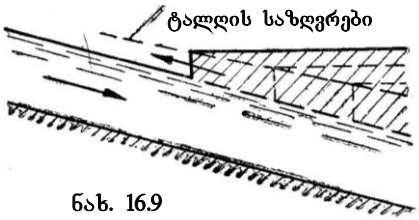
ნახ. 16.8

დამავალი დადებითი ტალღა (**შევსების ტალღა**) წარმოიქმნება მაშინ, როდესაც კალაპოტის საწყის კვეთში მკვეთრად იზრდება წყლის დონის ნიშნული ან ხარჯი (ნახ. 16.8). შევსების ტალღას გადააქვს ხარჯის ცვლილება (მატება) ქვემოთ – დინების მიმართულებით და იწვევს წყლის დონის აწევას.

აღმავალი დადებითი ტალღა (**შეტბორვის ტალღა**) წარმოიქმნება ღია კალაპოტის ბოლო კვეთში ხარჯის შემცირებისას (ნახ. 16.9). შეტბორვის ტალღას გადააქვს ხარჯის ცვლილება (კლება) ზემოთ დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით და იწვევს წყლის დონის აწევას.

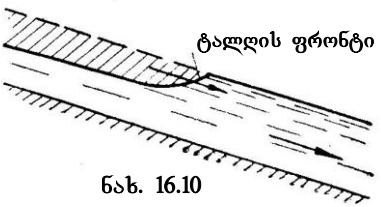
უმეტეს შემთხვევაში, დადებითი ტალღა ხასიათდება საკმაოდ ციცაბო ფრონტით.

დამავალ უარყოფით ტალღას **მიქცევის**, ხოლო აღმავალ უარყოფით ტალღას – **ამოღვრის** ტალღას უწოდებენ. მათგან პირველი (ნახ. 16.10) შეიმჩნევა ღია კალაპოტის საწყის კვეთში ხარჯის შემცირებისას, ხოლო მეორე (ნახ. 16.11) – ბოლო კვეთში ხარჯის გაზრდისას. მიქცევის ტალღას გადააქვს ხარჯის ცვლილება (კლება) ქვემოთ – დინების მიმართულებით და იწვევს დონის დაწევას. ასევე, ხდება დონის დაწევა ამოღვრის ტალღის შემთხვევაშიც, მხოლოდ იმ განსხვავებით, რომ ამ დროს ხდება ხარჯის ცვლილების გადატანა ზემოთ – დინების საწინააღმდეგო მიმართულებით.



ნახ. 16.9

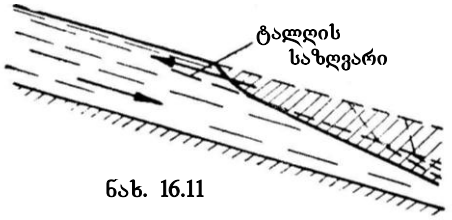
უარყოფითი ტალღა ხასიათდება დამრეცი ფრონტით.



ნახ. 16.10

ტალღა შედგება **ფრონტისა** და **ტანისაგან.** ტალღის ფრონტის ნაკადის გასწვრივ გადაადგილების რაიონში ადგილი აქვს მკვეთრად ცვალებად მოძრაობას, მაშინ, როდესაც ტალღის ტანის ფარგლებში მოძრაობა მდოვრედ ცვალებადია.

ტალღური მოძრაობის ერთ-ერთი მახასიათებელია ე.წ. **ტალღის საზღვარი** ანუ ტალღის ფრონტისა და ტანის მოხაზულობათა გადაკვეთის წერტილთა გეომეტრიული ადგილი (ნახ. 16.9; 16.11).

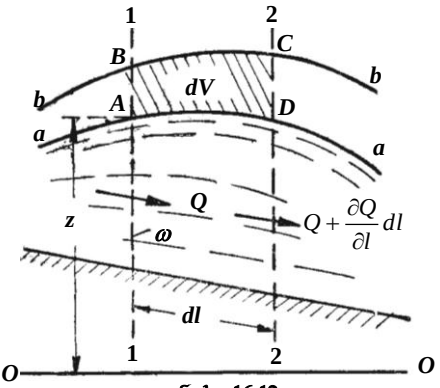


ნახ. 16.11

ქვემოთ განვიხილავთ ღია კალაპოტებში სითხის ერთგანზომილებიანი დაუმყარებელი მოძრაობის მხოლოდ **ძირითად ცნებებს.**

2. **დაუმყარებელი მდოვრედ ცვალებადი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებები.** ისეთი მოძრაობა, რომელიც ხდება ტალღის ტანის ფარგლებში, შეიძლება დავახასიათოთ ორი დიფერენციალური განტოლებით: უწყვეტობის განტოლებით და დინამიკური წონასწორობის განტოლებით.

ა) **უწყვეტობის განტოლება (ხარჯის ბალანსის განტოლება).** სითხის დამყარებული მოძრაობისაგან განსხვავებით, დაუმყარებელი მოძრაობისას ხარჯის ნებისმიერი ცვლილება ნაკადის რომელიმე კვეთში იწვევს სიღრმის ცვლილებას და ტალღური პროცესის წარმოქმნას. ხარჯის ეს ცვლილება ნაკადის გასწვრივ ვრცელდება არა მყის, არამედ რაიმე სიჩქარით. ამის გამო, დროის მიხედვით იცვლება როგორც სიღრმეები, ისე ხარჯი.



ნახ. 16.12

ვთქვათ, სითხის თავისუ-

ფალ ზედაპირს დროის რაიმე t მომენში უკავია a-a მდებარეობა, ხოლო $t+dt$ მომენტში – b-b მდებარეობა (ნახ. 16.12). ერთმანეთისაგან უსასრულოდ მცირე $d\ell$ მანძილით დაცილებული ორი კვეთით (1-1 და 2-2 კვეთებით) ნაკადში გამოვყოთ ნაკვეთური და გამოვთვალოთ მასში მოთავსებული სითხის მოცულობის ცვლილება dt დროს განმავლობაში.

dt დროში 1-1 კვეთიდან ნაკვეთურში შედის წყლის Qdt მოცულობა, ხოლო 2-2 კვეთიდან გამოედინება – $\left(Q+\frac{\partial Q}{\partial \ell}d\ell\right)dt$ მოცულობა. ამგვარად, სითხის მოცულობის ცვლილება დროის dt შუალედში იქნება:

$$dV = Qdt - \left(Q+\frac{\partial Q}{\partial \ell}d\ell\right)dt = -\frac{\partial Q}{\partial \ell}d\ell dt\ . \qquad (16.43)$$

სითხის ეს ელემენტარული dV მოცულობა (ნახაზზე ის დაშტრიხულია), სითხის უკუმშველობის გამო, გამოიწვევს ნაკადის სიღრმისა და ცოცხალი კვეთის ფართობის გაზრდას განსახილველ $d\ell$ უბანზე შესაბამისად dh-ით და $d\omega$-ით (dt დროში):

$$d\omega = \frac{\partial \omega}{\partial t}dt\ .$$

ამიტომ, მოცულობის ცვლილება დროის dt შუალედში შეიძლება ასეც განვსაზღვროთ:

$$dV = d\omega d\ell = \frac{\partial \omega}{\partial t}dtd\ell\ . \qquad (16.44)$$

(16.42) და (16.43) გამოსახულებათა გატოლებით მივიღებთ:

$$-\frac{\partial Q}{\partial \ell}d\ell dt = \frac{\partial \omega}{\partial t}dtd\ell$$

ანუ

$$\frac{\partial Q}{\partial \ell}+\frac{\partial \omega}{\partial t}=0\ . \qquad (16.45)$$

(16.45) განტოლება არის **უწყვეტობის განტოლება** ღია კალაპოტში სითხის დაუმყარებელი მოძრაობის პირობებში.

სწორკუთხა პრიზმული კალაპოტისათვის $\omega = Bh$, სადაც $B = const$, ამიტომ

$$\frac{\partial Q}{\partial \ell} = \frac{\partial(\omega v)}{\partial \ell} = \frac{\partial(Bhv)}{\partial \ell} = B\frac{\partial(hv)}{\partial \ell} = B\frac{\partial q}{\partial \ell};$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}(Bh) = B\frac{\partial h}{\partial t},$$

სადაც $q = hv$ არის კუთრი ხარჯი.

აღნიშნულის გათვალისწინებით, (16.45) განტოლება ასეთ სახეს მიიღებს:

$$\frac{\partial(hv)}{\partial \ell} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \qquad (16.46)$$

ან

$$\frac{\partial q}{\partial \ell} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 . \qquad (16.47)$$

ბ) **დინამიკური წონასწორობის განტოლება**. აქაც, ისევე როგორც ზემოთ, განვიხილოთ 1-1 და 1-2 კვეთებით გამოყოფილი ელემენტარული ნაკვეთური *a–a* თავისუფალი ზედაპირით. თუ ამ ნაკვეთურზე მოქმედი ყველა ძალის (მათ შორის ინერციის ძალის) მოძრაობის მიმართულებაზე გეგმილების ჯამს, დალამბერის პრინციპის თანახმად, გავუტოლებთ ნულს და ჩავთვლით, რომ $\alpha = \alpha' = 1$, მივიღებთ დინამიკური წონასწორობის დიფერენციალურ განტოლებას:

$$i_э = \frac{\partial}{\partial \ell}\left(\frac{v^2}{2g}\right) + \frac{v^2}{c^2 R} + \frac{1}{g}\frac{\partial v}{\partial t} . \qquad (16.48)$$

ეს განტოლება არათანაბარი მდოვრედ ცვალებადი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებისაგან (7.59) განსხვავებით შეიცავს ერთ დამატებით წევრს $\left(\frac{1}{g}\frac{\partial v}{\partial t}\right)$, რომელიც ითვალისწინებს ინერციის ძალის ლოკალურ ნაწილს: $\frac{1}{g}$ არის ერთეული წონის მქონე სითხის მასა; $\frac{\partial v}{\partial t}$ – აჩქარების ლოკალური ნაწილი.

თუ გავითვალისწინებთ, რომ პიეზომეტრული ქანობი –

$$i_э = i - \frac{\partial h}{\partial \ell},$$

ხოლო ჰიდრავლიკური ქანობი –

$$I = \frac{v^2}{c^2 R} = \frac{\omega^2 v^2}{\omega^2 c^2 R} = \frac{Q^2}{K^2}$$

მაშინ (16.48) გამოსახულებას შეიძლება ასეთი სახე მივცეთ:

$$i - \frac{\partial h}{\partial \ell} = \frac{v}{g}\frac{\partial v}{\partial \ell} + \frac{Q^2}{K^2} + \frac{1}{g}\frac{\partial v}{\partial t} .$$

(16.45) და (16.49) დიფერენციალური განტოლებები არის ორი დიფერენციალური განტოლების სისტემას, რომელსაც **სენ-**

ვენანის განტოლებებს უწოდებენ. ამ სისტემის ამოხსნით მიიღება ორი ფუნქცია – $Q = f_1(\ell, t)$ და $\omega = f_2(\ell, t)$, რომელთა საშუალებით დროის მოცემული მომენტისათვის შეიძლება აგებულ იქნეს ტალღის ტანის თავისუფალი ზედაპირი, განისაზღვროს ტალღის სიმაღლე (ξ), გავრცელების სიჩქარე (c) და სხვა.

აღნიშნული სისტემა არაწრფივ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემაა ჰიპერბოლური ტიპის კერძო წარმოებულებით და მისი ამოხსნა დიდ სიძნელეებთან არის დაკავშირებული. არსებობს ამოხსნის მხოლოდ მიახლოებითი მეთოდები, რომლებიც შეიძლება შემდეგ ორ ძირითად ჯგუფად დაიყოს:

1) მეთოდები, რომლებიც ეყრდნობა ЭВМ-ის გამოყენებას რაიმე დამატებითი დაშვების შემოტანის გარეშე. ასეთს მიეკუთვნება **პირდაპირი** და **სხვაობითი** მეთოდები.

2) მეთოდები, რომლებიც ეყრდნობა სხვადასხვა დამატებითი დაშვების გამოყენებას. ასეთს მიეკუთვნება **მახასიათებლების** მეთოდი, **მყისი რეჟიმების** მეთოდი და სხვა.

§ 16.5. ჰორიზონტალურ სწორკუთხა კალაპოტში სითხის დაუმყარებელი მოძრაობის უმარტივესი შემთხვევა

განვიხილოთ პრიზმულ სწორკუთხა ჰორიზონტალურ კალაპოტში სითხის დაუმყარებელი მოძრაობის უმარტივესი შემთხვევა. ამასთან ჩავთვალოთ, რომ დაწნევის დანაკარგები ნულის ტოლია. მაშინ გვექნება:

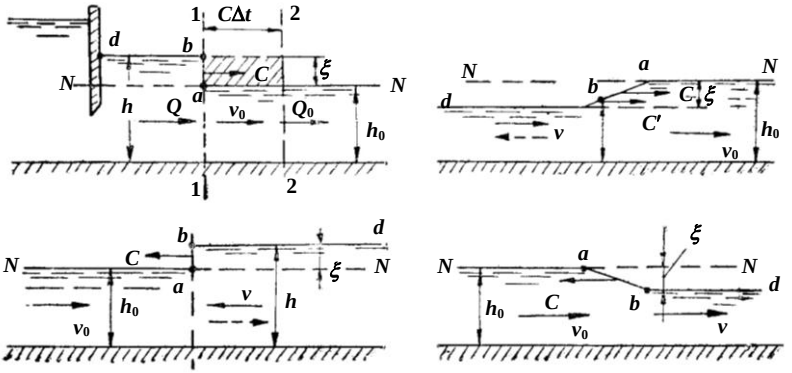
$$i = 0\,; \quad I = \frac{Q^2}{K^2} = 0\,. \tag{16.50}$$

მაშასადამე, განსახილველ შემთხვევაში სენ-ვენანის განტოლებათა სისტემა ასეთ სახეს მიიღებს:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial (hv)}{\partial \ell} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0; \\ &\frac{\partial v}{\partial t} + v\frac{\partial v}{\partial \ell} = -g\frac{\partial h}{\partial \ell}. \end{aligned}\right\} \tag{16.51}$$

ეს სისტემა, მათემატიკის ჩვეულებრივი მეთოდების გამოყენებით, ადვილად იხსნება. ამიტომ შემოვიფარგლებით მხოლოდ საბოლოო შედეგის განმარტებით.

წარმოვიდგინოთ განსახილველი კალაპოტის გრძივი ჭრილი (ნახ. 16.13). ნახაზზე $N - N$ წირით ვუჩვენოთ დამყარებული მოძრაობის შესაბამისი თავისუფალი ზედაპირი, ხოლო „0“ ინდექსით აღვნიშნოთ ასევე დამყარებული მოძრაობის შესაბამისი ჰიდრავლიკური ელემენტები. ნახაზის ა, ბ, გ, დ სქემებზე მოცემულია გადაადგილების ტალღის ჩვენთვის ცნობილი ოთხი შემთხვევა.



ნახ. 16.13

მიღებულ განტოლებათა ანალიზი გვიჩვენებს, რომ დადებითი ტალღის შემთხვევაში (ნახ. 16.13, ა, ბ) ab ფრონტი პრაქტიკულად ვერტიკალურია, ხოლო უარყოფითი ტალღის შემთხვევაში (ნახ. 15.15, გ, დ) – საკმაოდ დამრეცი, რომლის სხვადასხვა წერტილი სხვადასხვა c' სიჩქარით ხასიათდება. უარყოფითი ტალღებისათვის ფრონტის მოძრაობის c სიჩქარეში ვგულისხმობთ ab წირის სხვადასხვა წერტილში c' სიჩქარეთა საშუალო მნიშვნელობას.

(16.51) სისტემის ამოხსნით ვღებულობთ

$$c = v_0 \pm \sqrt{gh_0}\left(1+\frac{3}{4}\frac{\xi}{h_0}\right); \tag{16.52}$$

$$c' = v_0 \pm \left(3\sqrt{gh} - 2\sqrt{gh_0}\right), \tag{16.53}$$

სადაც ξ არის ტალღის სიმაღლე; h – ნაკადის სიღრმე დაუმყარებელი მოძრაობისას ab წირის იმ წერტილში, სადაც სიჩქარე c'-ის ტოლია.

თუ ტალღის სიმაღლე შედარებით მცირეა ($\xi < 0{,}1h$), მაშინ ξ/h_0 ფარდობას უგულებელყოფენ და ტალღის გავრცელების სიჩქარის გამოსათვლელი (16.52) ფორმულა ასეთ სახეს ღებულობს:

$$c = v_0 \pm \sqrt{gh_0} \ . \qquad (16.54)$$

ბოლოს, თუ დავუშვებთ, რომ მცირე სიმაღლის ტალღა უძრავ სითხეში ($v_0 = 0$) ვრცელდება, მივიღებთ:

$$c = \pm\sqrt{gh_0} \ . \qquad (16.55)$$

(16.52)–(16.55) გამოსახულებებში ნიშანი „პლუსი“ შეესაბამება დაღმავალ ტალღას, ხოლო ნიშანი „მინუსი“ – აღმავალს. უარყოფითი ტალღის შემთხვევაში ξ სიდიდეს (16.52) ფორმულაში ვთვლით უარყოფითად.

ახლა განვსაზღვროთ ე.წ. **ტალღური ხარჯი.** ამ მიზნით ნაკადის იმ ადგილას, სადაც დროის მოცემულ მომენტში იმყოფება ტალღის ფრონტი, გავატაროთ 1-1 კვეთი (ნახ, 16.13, ა). ტალღის გავრცელების განსახილველი სქემის შემთხვევაში 1-1 კვეთის მარჯვნივ ნაკადის მოძრაობის რეჟიმი დამყარებულია, მაშინ, როდესაც ამ კვეთის მარცხნივ ნაკადი დაუმყარებელია. თუ ტალღი გავრცელების სიჩქარეს აღვნიშნავთ c-თი, მაშინ დროის Δt შუალედში ტალღის ფრონტი გადაადგილდება $c\Delta t$ მანძილზე და დაიკავებს 2-2 მდებარეობას.

სითხის მოცულობა, რომელიც 1-1 კვეთში შედის Δt დროში, $Q\Delta t$ სიდიდის ტოლია (Q არის დაუმყარებელი მოძრაობის შესაბამისი ხარჯი, ე.ი. ხარჯი 1-1 კვეთის მარცხნივ). დროის იგივე მონაკვეთში 2-2 კვეთიდან გამოედინება სითხის $Q_0\Delta t$ მოცულობა (Q_0 არის დამყარებული მოძრაობის შესაბამისი ხარჯი ე.ი. ხარჯი 1-1 კვეთის მარჯვნივ). ცხადია, აღნიშნულ მოცულობათა სხვაობა და 2-2 კვეთებს შორის მოთავსებული ტალღის მოცულობა ტოლი უნდა იყოს, ე.ი.

$$\Delta Q\Delta t = Q\Delta t - Q_0\Delta t = c\xi B\Delta t$$

ანუ

$$\Delta Q = Q - Q_0 = c\xi B \ . \qquad (16.56)$$

სადაც B არის სწორკუთხა კალაპოტის სიგანე.

ΔQ სიდიდეს, რომელიც ახასიათებს ხარჯის ცვლილებას დაუმყარებელი მოძრაობისას და ტალღას გადააქვს, ტალღურ ხარჯს უწოდებენ.

თავი XVII. ჰიდროტექნიკური ნაგებობები საავტომობილო გზებზე

§ 17.1. მცირე ზომის ხიდის ნახვრეტის ჰიდრავლიკური გაანგარიშება

მცირე ზომის წყალდენების გადაკვეთა დაკავშირებულია მცირე ზომის ხიდების და მილსადენების მოწყობასთან, რომელთა რაოდენობა 10–15-ს აღწევს გზის ყოველ 10კმ-ზე. მათგან 90–95%-ს შეიცავს მილსადენები და მხოლოდ 5–10%-ს ხიდები.

მცირე ზომის ხიდები ეწოდება ისეთ ხიდებს, რომელთა სიგრძე 30მ-ს არ აღემატება. ამ პირობებში უფრო ხელსაყრელია მილსადენების მოწყობა, მაგრამ, ზოგ შემთხვევაში, მცირე ზომის ხიდების მოწყობა მაინც აუცილებელია. ასეთ შემთხვევებს განეკუთვნება მოქმედი წყალსადენების გადაკვეთა, თუ მათზე ხდება ყინულების მოძრაობა. ხშირად მცირე ზომის ხიდებს იყენებენ სხვადასხვა არხის გადაკვეთებზე, რომელთა შევიწროება დაუშვებელია და სწრაფდენის გადაკვეთისას. მცირე ზომის ხიდების ანგარიშს ღებულობენ წყლის ხარჯებისათვის, რომელთა ალბათობა I და III კატეგორიების ნაგებობისათვის 1% შეადგენს, ხოლო IV-V კატეგორიებისათვის – 2%-ს, მცირე ზომის ხის ხიდებისათვის – 3%-ს.

ფსკერის ქანობს ხიდქვეშა კალაპოტებისათვის ზოგადად განსაზღვრავენ გზების მართობული მიმართულებით გარემოს ქანობის მიხედვით.

მცირე ხიდები შეიძლება იყოს ერთმალიანი და მრავალმალიანი. მოქმედი სტანდარტების და ნორმების მიხედვით, მცირე ზომის ხიდებისათვის ბურჯებს შორის მანძილს იღებენ: 1; 2; 3; 4; 5; 57,5; 10; 12,5; 15; 20 მ-ს. თანამედროვე პირობებში ხიდის სანაპირო საყრდენ კედლებს ახორციელებენ დაქანებული ფრთებით.

მცირე ხიდები ზოგადად ავიწროებს ნაკადებს გეგმაში. ეს იწვევს წყლის დონის მომატებას ზედა ბიეფში ანუ ხიდის წინ.

მცირე ხიდის უმცირესი სიმაღლე

$$H_{min} = H + \Delta, \qquad (17.1)$$

სადაც H წყლის სიღრმეა ხიდის წინ; Δ – ტექნიკური მარაგი, რომელიც მალის გადახურვის სამშენებლო სიმაღლესა და წყლის დონეს შორის ვერტიკალური მანძილია. ზოგადად 0.5-ის ტოლი აიღება.

ქვედა ბიეფში წყლის დონის მდებარეობის მიხედვით, ხიდქვეშა კალაპოტები იყოფა შეტბორილად და შეუტბორავად. თუ ეს დონე

ისეთია, რომ ამცირებს ხიდის გამტარუნარიანობას, მას უწოდებენ შეტბორილს. წინააღმდეგ შემთხვევაში – შეუტბორავს. ასეთ შემთხვევაში ხიდი შესაბამისად იმუშავებს, როგორც შეტბორილი ან შეუტბორავი ფართოზღურბლიანი წყალსაშვები.

გადინების რეჟიმი შეიძლება განისაზღვროს უტოლობით:

$$h_{ბუნ} \le NH \,, \tag{17.2}$$

სადაც N შეტბორვის კრიტერიუმია ანუ შეტბორვის ისეთი ხარისხი, რომლის დროსაც ქვედა ბიეფის წყლის დონე მოქმედებს მალის გამტარუნარიანობაზე;

$h_{ბუნ}$ – წყლის ბუნებრივი ნორმალური სიღრმე კალაპოტში.

შეტბორვის კრიტერიუმი დამოკიდებულია წყალსაშვების ხარჯის m კოეფიციენტზე და გამოითვლება ფორმულით:

$$N = \frac{1-1.267\sqrt[3]{m^2}}{1-1.183\sqrt[3]{m^2}} \,. \tag{17.3}$$

ხარჯის კოეფიციენტი m დამოკიდებულია სანაპირო საყრდენი კედლის ფორმაზე და იცვლება 0.32÷0.36 ფარგლებში.

მცირე ხიდების ნახვრეტის ზომის ჰიდრავლიკური გაანგარიშებისას განასხვავებენ ნაკადის გადინების სამ შემთხვევას. პირველი ორი შემთხვევა შეესაბამება წყლის თავისუფალ გადინებას (შეუტბორავი ნაკადი შემთხვევა), მესამე კი – ნახვრეტის მუშაობას შეტბორილი ნაკადის რეჟიმში.

პირველ შემთხვევაში სიღრმე h_1 შესასვლელი უბნის ბოლოს ნაკლებია $h_{კრ.}$ კრიტიკულზე და $h_{ბუნ}$ ნორმალურზე (ბუნებრივზე). შემდეგ სიღრმე ადგილობრივად იზრდება გამოსასვლელ კვეთებში, ხოლო ხიდიდან გამოსვლისას მიისწრაფვის $h_{ბუნ}$ ბუნებრივისაკენ. ასეთი დინება აღიძვრება, როდესაც ხიდის ქვეშ ფსკერის ქანობი i ნაკლებია $i_{ბუნ}$ ბუნებრივ ქანობზე ($i < i_1$).

ასეთ შემთხვევაში ხიდის ნახვრეტის სიმაღლე გამოითვლება ფორმულით:

$$h_{საან.} = h_1 = KH \,. \tag{17.4}$$

სადაც K იცვლება 0.45÷0.55 ფარგლებში და შეესაბამება ხარჯის კოეფიციენტის m ცვლილებას 0.32÷0.36 საზღვრებში.

მეორე შემთხვევისას ხიდქვეშა ფსკერის ქანობი i მეტია ბუნებრივ ქანობზე ($i > i_1$). შესასვლელი უბნის ბოლოს მყარდება სიღრმე კრიტიკულსა და ნორმალურზე მეტი, $h_{კრ} > h_1 < h_{ბუნ}$. ორივე შემთხვევა შესაძლებელია, როდესაც ხიდის სიგანის L ფარდობა შეტბორვის H სიღრმესთან აკმაყოფილებს პირობას:

$$\frac{L}{H} < (30 \div 35). \qquad (17.5)$$

ზოგადად ეს პირობა მცირე ხიდებისათვის ყოველთვის სრულდება. მესამე შემთხვევაში შესასვლელი უბნის ბოლოს მყარდება სიღრმე h_1 კრიტიკულზე მეტი და $h_{ქბ}$ ქვედა ბიეფში დამყარებულ სიღრმეზე ნაკლები.

ამ სამივე სქემისათვის ხიდის გამტარუნარიანობა გამოითვლება წყალსაშვების ზოგადი ფორმულით:

$$Q_{სან} = \sigma_s mb\sqrt{2g}H_0^{3/2}. \qquad (17.6)$$

$\sigma_ჟ$ შეტბორვის კოეფიციენტია. მას გადინების პირველი და მეორე შემთხვევისათვის იღებენ 1-ის ტოლად ($\sigma_ჟ$=1.0) და 1-ზე ნაკლებს მესამე შემთხვევისათვის. ძირითადად დამოკიდებულია n ნაკადის შევიწროების ხარისხზე და m წყალსაშვების ხარჯის კოეფიციენტზე. (17.6) ფორმულიდან იანგარიშება ხიდის ნახვრეტის სიგანე b, თუ წინასწარ ცნობილია გასატარებელი წყლის ხარჯი ($Q_{სან}$)

$$b = \frac{Q_{სან}}{\sigma_s mb\sqrt{2g}H_0^{3/2}}. \qquad (17.7)$$

თუ ორივე სიდიდე (b და $Q_{სან}$) წინასწარ მოცემულია, მაშინ საჭიროა აუცილებელი დაწნევის H_0 სიდიდის განსაზღვრა

$$H_0 = \left(\frac{Q_{სან}}{\sigma_s mb\sqrt{2g}}\right)^{2/3}. \qquad (17.8)$$

სიჩქარე ხიდის ქვეშ გამოითვლება უწყვეტობის განტოლებით:

$$v_1 = \left(\frac{Q_{სან}}{bh_{სან,}}\right). \qquad (17.9)$$

ხიდის ნახვრეტის გამოთვლისას აუცილებელი საწყისი ფიზიკური სიდიდეა v_1 სიჩქარე; ის უნდა აკმაყოფილებდეს $v_1 \le v_{დას}$ პირობას, სადაც $v_{დას}$ არის ფსკერის ამგები გრუნტის დასაშვები სიჩქარე

$$V_{დას.} = \psi v_{1.0}\sqrt[3]{\frac{v_{1.0}^2}{g}}, \qquad (17.10)$$

$v_{1.0}$ დასაშვები სიჩქარეა 1მ-იანი სიღრმის შემთხვევაში, ხოლო $\psi = \frac{h_{სან.}}{h_{კრ}}$ და იცვლება 0.76÷0.84-ის ფარგლებში, ხარჯის კოეფიციენტის m ცვლილებისას 0.32÷0.36-ს საზღვრებში.

ხშირად ხიდის წინა არეალი საშუალებას იძლევა ვაწარმოოთ სანიაღვრე ხარჯის ნაწილის აკუმულაცია. ის დამოკიდებულია როგორც არეალის მოცულობაზე, ასევე სანიაღვრე ხარჯის სიდიდესა და ხანგრძლივობაზე. ეს ხიდის ნახვრეტის ზომების შემცირების შესაძლებლობას იძლევა.

ასეთ შემთხვევაში გასატარებელი ხარჯის სიდიდე

$$Q_{\text{სან}} = \alpha_{\text{აკ}} Q_{\text{ნიაღ}} \tag{17.11}$$

სადაც $Q_{\text{ნიაღ}}$ ნიაღვრის მაქსიმალური ხარჯია; $\alpha_{\text{აკ}}$ –აკუმულაციის კოეფიციენტი, რომელიც გამოითვლება დამოკიდებულებით:

$$\alpha_{\text{აკ}} = 1 - \frac{W}{W_{\text{აკ}}}. \tag{17.12}$$

აქ W ნიაღვრის მოცულობაა; $W_{\text{აკ}}$ – ნაგებობის წინ დროებით აკუმულირებული სითხის მოცულობა.

ხიდის წინ აკუმულაციის არეალის მოცულობა შეიძლება გამოვიანგარიშოთ მიახლოებითი ფორმულით:

$$W_{\text{აკ}} = 220 \frac{BH_p^2}{i_{\text{არ}}},$$

$i_{\text{არ}}$ არეალის ქანობია გზის მართობული მიმართულებით; B – არეალის სიგანე; H_p – არეალის საშუალო სიღრმე.

B და $_4$ ერთმანეთზე დამოკიდებული სიდიდეებია და არეალის დროებითი დატბორვის დასაშვებ საზღვრებშია.

§17.2. საგზაო მილსადენების ჰიდრავლიკური ანგარიში

საგზაო მილი არის ხელოვნური ნაგებობა, რომლის დანიშნულებაა სითხის გატარება გზის ერთი მხრიდან მეორე მხარეს და ჩადებულია გზის ნაყარის ძირში.

საგზაო წყალგამტარი მილები საავტომობილო გზების ხელოვნური ნაგებობის ძირითადი სახეა. მცირე სიდიდის წყალსადენების ხარჯის გატარება ბევრად ხელსაყრელია განხორციელდეს მილსადენების საშუალებით, ვიდრე მცირე ზომის ხიდებით. მცირე ზომის ნაგებობის 90–95% სწორედ საგზაო მილებია.

მილები, როგორც წესი, ლაგდება გზის გრძივი პროფილის ქვედა დაბალ წერტილში. ზოგადად მილის ღერძი ცდილობენ მოათავსონ გზის მართობულად, რადგან ამ შემთხვევაში მისი სიგრძე მინიმალურია. საანგარიშო ხარჯის ოპტიმალური გატარების პირობის შესაქმნელად საჭიროა, რომ მილის ღერძი

ემთხვეოდეს წყალდენის ნაკადის მიმართულებას, რათა ავიცილოთ გრიგალური უბნების გაჩენა წყლის მიმყვან კალაპოტში.

წყალგამტარი მილები შეიძლება იყოს ხის, ბეტონის, რკინაბეტონის, ქვის წყობის, რკინის და კერამიკის. უფრო ხშირად იყენებენ რკინაბეტონის მილებს. კვეთის ფორმის მიხედვით მილები არის წრიული, კონოიდური, თაღოვანი, მართკუთხა, ტრაპეციული და სამკუთხა. ყველაზე ხშირად გამოიყენება წრიული და მართკუთხა კვეთის მილები.

რამდენიმე მილსადენის ერთობლივი მუშაობისას ეწყობა ორძაფიანი, სამძაფიანი და მრავალძაფიანი მილსადენები. მათი რაოდენობა დამოკიდებულია გასატარებელი წყლის ხარჯზე. მილსადენი მუშაობის რეჟიმის მიხედვით შეიძლება იყოს უდაწნეო, ნახევრად დაწნევითი და დაწნევითი.

ნახევრად დაწნევითი და დაწნევითი მილსადენები დასაშვებია მათ ძირში ფუნდამენტის აუცილებლად მოწყობის შემთხვევაში. მილსადენზე გზის ნაყარის სისქე ($h_{ნაყ}$) არ უნდა იყოს 0.5მ-ზე ნაკლები (ნახ. 17.1, ა) და გამოითვლება ფორმულით:

$$H_{min} = h_{მილ} + h_{მკ} + h_{ნყ} . \qquad (7.13)$$

თუ მილსადენის წინ გასატარებელი სითხეა, მაშინ მხედველობაში მიიღება წყლის დაწნევა (ნახ. 17.1, ბ)

$$H_{min} = H + \Delta . \qquad (7.14)$$

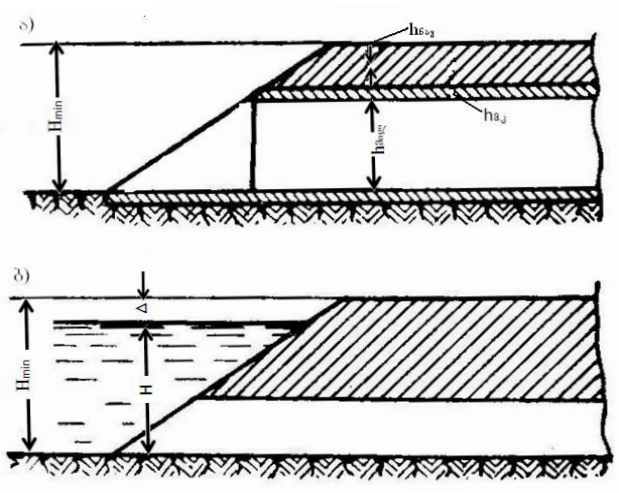
თუ გზა მოპირკეთებულია მას ემეტება გზის $h_{მკ}$ მოპირკეთების სისქე.

$h_{მილ}$ მილსადენის სიმაღლეა; $h_{მკ}$ – მილსადენის კედლის სისქე; $h_{ნყ}$ – ნაყარის სიმაღლე, H – წყლის დაწნევა მილსადენის წინ; Δ – შეტბორვის დონის ზევით მარაგი და აიღება მცირე დიამეტრის მილებისათვის არაუმცირეს 0.5მ; ხოლო ორმეტრიან დიამეტრზე მეტი მილებისათვის არანაკლებ 1.0 მ.

თუ ტალვეგი სუსტად არის გამოსახული (ბრტყელი) ანუ მისი კალთები მცირე ქანობისაა, მაშინ (7.13-7.14) ფორმულებით გამოთვლილი H_{min} სიდიდე შეიძლება აღმოჩდეს საკმაოდ დიდი, ამიტომ, ზოგ შემთხვევაში, უფრო მიზანშეწონილია მილსადენი ჩაღრმავდეს ტალვეგის ძირზე დაბლა. ჩაღრმავების სიღრმე უნდა იყოს გრძივი პროფილის დაპროექტების პირობებიდან, მაგრამ არ უნდა აღემატებოდეს მილის სიმაღლის ნახევარს. ეს ჩაღრმავება უნდა დაიწყოს მილსადენის ზევით 10–20მ მანძილზე და უნდა მთავრდებოდეს მილსადენის შემდეგ

$$l = \frac{h}{i_0 - i}, \qquad (17.15)$$

სადაც i_0 ტალვეგის ბუნებრივი ქანობია; i – გამყვანი კალაპოტის ქანობი, რომელიც არის არანაკლები 0.003-დან 0.005.



ნახ. 17.1.

ნაყარის უმცირესი სიმაღლის განსაზღვრის სქემა

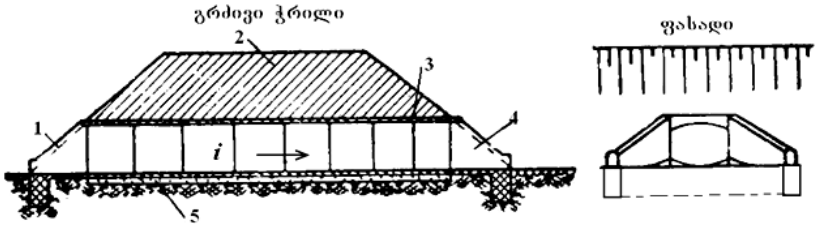
საგზაო მილების ნახვრეტის ზომებს იღებენ სტანდარტულს. მრგვალი მილებისათვის მიღებულია შიგა დიამეტრები – 0.75; 1.0; 1.25; 1,50 და 2.00მ. ხოლო მართკუთხა კვეთის ერთძაფიანი მილებისათვის განივი ნახვრეტები აიღება: 2.0; 2.5 და 3.00მ. ორძაფიანი მილებისათვის – 2X2.2; 2X2.7 და 2X2.3მ. მართკუთხა მილის სიმაღლეებს იღებენ არაუმცირეს 1.0მ, ხოლო მილებისათვის, რომელთა სიგრძე 20.0მ აღემატება არანაკლებ 1.25მ.

II–V კატეგორიის საავტომობილო გზების ყრილის ქვეშ დასაშვებია 1.0მ დიამეტრის მრგვალი მილების ჩაწყობა, თუ მათი სიგრძე 30.0მ არ აღემატება. თუ სიგრძე 15.0მ-ზე მცირეა, მაშინ დიამეტრს 0.75მ იღებენ.

მილსადენის ზომები ინიშნება ჰიდრავლიკური გაანგარიშებით. თუ ტალვეგიდან გასატარებელი ხარჯი მცირეა, ხშირად, კონსტრუქციული მოსაზრებებით, გამოიყენება 0.75მ დიამეტრის მილი ჰიდრავლიკური გაანგარიშის გარეშე.

მილსადენის ძირითადი ელემენტებია ფუნდამენტი ან ბალიშები, შესასვლელი სათავისი, მილსადენის სიგრძის სექციები და გამოსასვლელი სათავისი (ნახ. 17.2).

მილსადენის სექციები თავის თავზე იღებს მიწის ნაყარის ჰორიზონტალურ და ვერტიკალურ წნევის ძალებს და აწარმოებს ნაყარის ქვეშ სითხის გატარებას გზის ერთი მხარიდან მეორე მხარეს. შესასვლელი და გამოსასვლელი სათავისები უზრუნველყოფს მილსადენის სექციების შეუღლებას მიწის ყრილის ფერდობთან და ხელს უწყობს წყლის ნორმალურ გადინებას მილსადენში. მიზანშეწონილია სათავისები მოეწყოს გარსმდენი ფორმის, ამით მიიღწევა სითხის განუწყვეტელი შედინება მილსადენში, რაც გამორიცხავს გრიგალური უბნების გაჩენას. მილსადენის სექციები და სათავისები მოთავსებულია ფუნდამენტებზე, რომლებიც აწარმოებს წნევის გადაცემას გრუნტზე და უზრუნველყოფენ მათ მდგრადობას.



ნახ. 17.2. საგზაო მილის ძირითადი ნაწილები
1. შესასვლელი სათავისი; 2. მიწის საფარი; 3. სექციები; 4. გამოსასვლელი სათავისი; 5. ფუნდამენტი

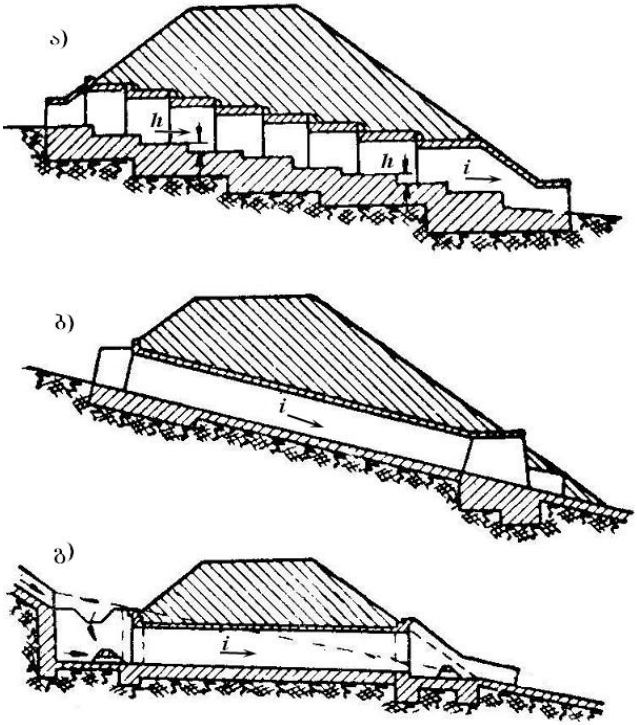
ფუნდამენტის კონსტრუქციას ირჩევენ გრუნტის ფიზიკურ-მექანიკური ხარისხის და ჰიდროგეოლოგიური პირობების შესატყვისად. ხშირად ის კეთდება ღორღნარევი თიხისაგან, რომლის სისქე უნდა აღემატებოდეს 0.5მ-ს, ღორღის რაოდენობა კი უნდა იყოს არანაკლებ 30%.

მილსადენის თავსა და ბოლოში ფუნდამენტის სისქე დაახლოებით 1მ სიღრმეშია. თუ მილსადენი ეწყობა დაჭაობებულ ან ტორფიან ადგილებში, მაშინ ფუნდამენტი ინდივიდუალური პროექტებით ისხმება.

ნაყარის ფერდოების სიმაგრისათვის, თუ ამას მოითხოვს ბუნებრივი პირობები, გარკვეული უბნები უნდა მოიკირწყლოს ქვებით, რათ გამოირიცხოს მათი წყლის ნაკადისაგან წარეცხვა. მოკირწყვლას ახორციელებენ შეტბორვის ჰორიზონტიდან ზემოთ 0.25მ-ზე.

სათავისის საზღვრის გარეთ მოკირწყვლას აწარმოებენ ორივე მხარეს არანაკლებ 2.0მ-ზე. განსაკუთრებით უნდა გამაგრდეს კალაპოტი მილსადენის გამოსასვლელ უბანში, რადგან მისგან გამოდინებულ ნაკადს აქვს დიდი სიჩქარე და შეიძლება მოახდინოს ამ უბნის წარეცხვა საკმაოდ დიდ სიღრმეზე და გამოიწვიოს გამოსასვლელი სათავისის დანგრევა.

თუ მილსადენი ხორციელდება მთიან პირობებში, მაშინ განსაკუთრებული ყურადღება უნდა მიექცეს წყალგამტარი ღარის მოწყობას, ვინაიდან ასეთ ღარებში, მათი დიდი ქანობის გამო, სითხის სიჩქარეები განსაკუთრებულად დიდია. თუ წყალგამტარი მილი მოწყობილია დიდი ქანობის მთის კალთებზე, მათი ფსკერი კეთდება სამი სახის (ნახ.17.3):



ნახ 17.3. საგზაო მილები სამთო პირობებში
ა) მილსადენი-წყალგარდნილი; ბ) მილსადენი-წყალმდენი;
გ) მილის მცირე დახრით და ენერგიის ჩამქრობით

1) მილი, რომლის ფსკერი კეთდება მრავალსაფეხურიანი ვარდნილების სახით (ნახ. 17.3 ა). ასეთ შემთხვევაში სექციებს შორის ეწყობა ვერტიკალური შოვები. საფეხურების სიმაღლე მერყეობს დიდ ფარგლებში და ხშირად 80–100სმ-ს აღწევს.

2) თუ გზა გადის ძალზე დამრეცი მთის კალთაზე, მილი შეიძლება მთის ფერდის ქანობის ტოლი იყოს (ნახ 17.3, ბ), რადგან ამ დროს მუშაობს, როგორც სწრაფდენი. ასეთ შემთხვევაში ეწყობა ენერგიის ჩამქრობი როგორც შესასვლელ, ასევე გამოსასვლელ კვეთებში;

3) თუ გეოლოგიური პირობები ვერ უზრუნველყოფს დიდი ქანობით მდგრადი მილსადენის განხორციელების საშუალებას, მაშინ მას აწყობენ მცირე ქანობით (ნახ 17.3, გ), მაგრამ აუცილებლად ენერგიის ჩამქრობი ნაგებობების მოწყობით შესასვლელ და გამოსასვლელ კვეთებში. ხშირად მთიან პირობებში ხორციელდება წყალგამტარი მილსადენები ქვის მშრალი წყობით. ასეთი ღარები ძალზე ამცირებს მათ ღირებულებას.

საგზაო მილების ნახვრეტები, სტანდარტების მიხედვით, უნდა უზრუნველყოფდეს წყლის ხარჯის გატარებას და დამოკიდებულია გზის კატეგორიაზე.

I კატეგორიის გზისთვის საანგარიშო ალბათობა 1%;

II–III კატეგორიის გზებისთვის ეს ალბათობაა 2%-ია;

IV–V კატეგორიის გზებისათვის კი – 3%.

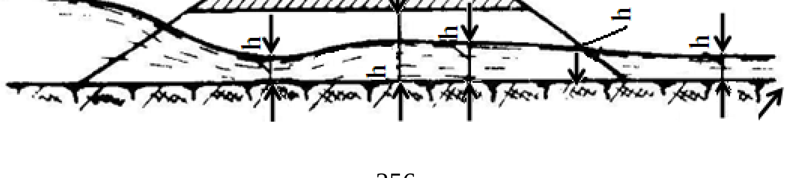
სითხის გადინების რეჟიმი საგზაო მილებში სხვადასხვაა და დამოკიდებულია წყლის ხარჯზე, რომელიც იცვლება დროის განმავლობაში და ასევე მილსადენის სიმაღლესა და შესასვლელ კვეთში დაწნევის სიდიდის ფარდობაზე.

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, ასხვავებენ მილსადენში სითხის გადინების სამ რეჟიმს: უდაწნეოს, ნახევრად დაწნევით და დაწნევითს. უდაწნეო რეჟიმი მყარდება, როცა

$$H \le 1.2 h_{\text{მ}}. \qquad (17.16)$$

ამ დროს ნაკადს აქვს თავისუფალი ზედაპირი მილსადენის მთელ სიგრძეზე (ნახ. 17.4), ნახევრად დაწნევითი რეჟიმი შეიძლება დამყარდეს, როცა

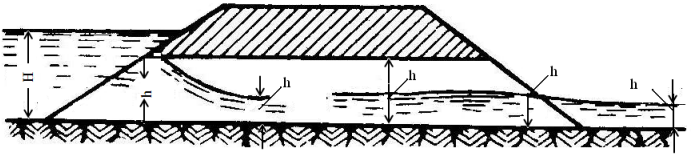
$$H < 1.2 h_{\text{მ}}. \qquad (17.17)$$



ნახ. 17.4 მილსადენის უდაწნეო მუშაობის რეჟიმი

ამ დროს მილსადენის შესასვლელი იტბორება, მაგრამ დანარჩენ სიგრძეზე ნაკადს აქვს თავისუფალი ზედაპირი (ნახ. 17.5). ამ რეჟიმისთვის დამახასიათებელია ნაკადის ვერტიკალური კუმშვა შესასვლელი კვეთის სიახლოვეს, რომლის სიღრმე კრიტიკულ სიღრმეზე ნაკლებია.

დაწნევითი რეჟიმის შემთხვევაში მილსადენის განივკვეთი მთლიანად ივსება წყლით და მას არ გააჩნია თავისუფალი ზედაპირი (ნახ. 17.6).



ნახ. 17.5. მილსადენის ნახევრად დაწნევითი მუშაობის რეჟიმი

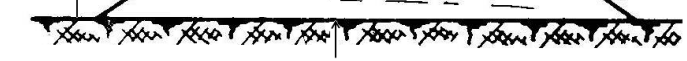
დაწნევითი რეჟიმით მოძრაობა ხდება გარსმდენის შესასვლელის არსებობისას

$$H \succ 1.h_{\text{მილ}} \tag{17.18}$$

და

$$i \le i_{\text{კიდ}} = \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}, \tag{17.19}$$

i მილსადენის ქანობია; $i_{\text{კ}}$ – ჰიდრავლიკური ქანობი, რომელსაც ხახუნის ქანობსაც უწოდებენ.



ნახ. 17.6. მილსადენის დაწნევითი მუშაობის რეჟიმი

დაწნევითი მილსადენები გამოიყენება გზის ნაყარის დიდი სიმაღლის შემთხვევაში, სადაც პრაქტიკულად შეუძლებელია გარსმდენი სათავისების მოწყობა.

თუ ნაყარის სიმაღლის შემცირების მიზნით გადასაკვეთია ბრტყელი და განიერი არეალები, მაშინ აპროექტებენ უდაწნეო მილებს.

საგზაო მილებს, რომლებსაც აწყობენ ბუნებრივი ქანობით, უმეტეს შემთხვევაში, საანგარიშო ხარჯების გასატარებლად, აქვს კრიტიკული ან მასზე ნაკლები ქანობი.

ასეთ შემთხვევაში ქვედა ბიეფი გავლენას არ ახდენს სითხის გამოდინებაზე ანუ წარმოებს თავისუფალი გამოდინება. მილის ჰიდრავლიკური ანგარიში წარმოებს ცალ-ცალკე, შესასვლელი და გამოსასვლელი უბნებისათვის.

შესასვლელი უბნის ანგარიში შესაძლებლობას იძლევა დავადგინოთ მილის ნახვრეტის ზომები, ნაგებობებში წყლის შესვლის პირობების გათვალისწინებით.

გამოსასვლელი უბნის ანგარიში ითვალისწინებს ამ უბანში სითხის გადინების სიჩქარის განსაზღვრას, რაც აუცილებელია ქვედა ბიეფის გარეცხვის საწინააღმდეგო ღონისძიების ჩასატარებლად.

თუ გამოსავლელ უბანში $i > i_{კრ}$, მაშინ $h_{გამ.}$ იღებენ ნორმალური h_0 სიღრმის ტოლს; თუ $i > i_{კრ}$, $h_{გამ.}=(0.75\div0.85)\,h_{კრ.}$.

უდაწნეო მილსადენის (ნახ. 17.4) გამტარუნარიანობას ანგარიშობენ ფორმულით:

$$Q = mb_{კრ}\sqrt{2g}H_0^{3/2}, \qquad (17.20)$$

სადაც m ხარჯის კოეფიციენტია და შესასვლელი სათავისის ფორმის მიხედვით იცვლება (0.310÷0.360) ფარგლებში; $b_{კრ}$ – ნაკადის საშუალო სიგანე იმ კვეთში, სადაც აღინიშნება კრიტიკული სიღრმე, $b_{კრ}=\frac{\omega_{კრ}}{h_{კრ}}$ უდაწნეო მილსადენის გაანგარიშებისას აუცილებელია გავითვალისწინოთ შევსების ზღვრული სიდიდე, $S_0=\frac{H}{h_{მილ}}$, რომელიც დგინდება გზის გრძივი პროფილის დაპროექტირებისას.

თუ გასატარებელი ხარჯი დიდია, შეიძლება მოეწყოს ორძაფიანი და მრავალძაფიანი მილსადენები.

მილების ნახევრად დაწნევით რეჟიმში მუშაობის შემთხვევაში გამტარუნარიანობა

$$Q = \mu_0\omega\sqrt{2g(H_o - \eta h_{მილ.})}\,. \qquad (17.21)$$

μ_0 ხარჯის კოეფიციენტია პარალელური ტიპის სათავისათვის, აიღება μ_0=0.59÷0.62, ხოლო გარსმდენი სათავისის შემთხვევაში μ_0=0.65÷0.67; η – უკუმშველი კვეთის სიღრმის ფარდობა მილსადენის სიმაღლესთან და იცვლება η=0.72÷0.74 ფარგლებში.

დაწნევით რეჟიმში მომუშავე მილების გამტარუნარიანობა

$$Q = \mu\omega\sqrt{2g(H_o + il - \eta h_d)}\ , \qquad (17.22)$$

სადაც η=0.85; l მილის სიგრძეა.

ხარჯის კოეფიციენტი

$$\mu = \frac{1}{1 + \xi_{შს} + \lambda\frac{l}{d}}\ .$$

$\xi_{შს} \approx 0.1$; $\lambda = 0.02 \div 0.25$. ეს უკანასკნელი დამტკიცებულია მილის სახეობის მიხედვით.

მეორე განყოფილება

მდინარეებისა და წყალსაცავების ჰიდროლოგიური მახასიათებლები

თავი I. ზოგადი ჰიდროლოგია

§ 1.1. წყალბრუნვა ბუნებაში. წყლის ბალანსის განტოლება

მზის ენერგიის გავლენით დედამიწის ზედაპირზე არსებული წყალი უწვეტ წყალბრუნვას განიცდის. ასხვავებენ წყალბრუნვის რამდენიმე სახეს.

მსოფლიო წყალბრუნვა – ოკეანეების ზედაპირიდან აორთქლებული ტენი, ქარის მიერ გადაიტანება ხმელეთზე, მოდის ხმელეთზე ნალექების სახით, ზედაპირული და მიწისქვეშა ჩამონადენების სახით კვლავ ბრუნდება ოკეანეებში.

ოკეანური წყალბრუნვა – ოკეანეების ზედაპირიდან აორთქლებული ტენი უშუალოდ ოკეანეებში ბრუნდება ნალექების სახით.

შიგა კონტინენტური წყალბრუნვა – ხმელეთის ზედაპირიდან აორთქლებული წყალი კვლავ მის ზედაპირზე ბრუნდება ატმოსფერული ნალექების სახით.

წყალბრუნვა დედამიწაზე გრანდიოზული პროცესია. დედამიწაზე მოსული მზის ენერგიის 23% ხმარდება ოკეანეებიდან და ხმელეთიდან წყლის აორთქლებას.

წყლის შემოსავლისა და გასავლის შეფარდებას გარკვეული ობიექტებისათვის, არჩეული დროის ინტერვალში მარაგების ცვლილებების გათვალისწინებით, წყლის ბალანსი ეწოდება. წყლის ბალანსის მათემატიკურ გამოსახვას კი ბალანსის განტოლება ეწოდება. მისი შედგენა შეიძლება წყლის გარკვეული ობიექტისათვის (ტბა, წყალსაცავი და სხვა), მდინარის

აუზისათვის, ტერიტორიის ნაწილისათვის, ჰიდროლოგიური რაიონისათვის, ქვეყნისათვის, მატერიკისა და დედამიწისათვის.

მრავალწლიანი დაკვირვების შედეგად შეიძლება დავასკვნათ, რომ ოკეანეების, ზღვებისა და ხმელეთის ზედაპირიდან საშუალო წლიური აორთქლების რაოდენობა მათ ზედაპირზე მოსული ატმოსფერული ნალექების ჯამის ტოლია, ე.ი. წყლის ბალანსის განტოლებას დედამიწისათვის აქვს შემდეგი სახე:

$$Z_0 + Z_c = X_0 + X_c ,$$

სადაც Z_0 და Z_C, შესაბამისად, ზღვების, ოკეანეებისა და ხმელეთის ზედაპირებიდან საშუალო წლიური აორთქლებაა; X_0 და X_C – შესაბამისად ზღვების, ოკეანეებისა და ხმელეთის ზედაპირებზე მოსული ნალექები. ცალკეული მდინარის აუზის წყლის ბალანსის განტოლებას ხანგრძლივი პერიოდისათვის აქვს შემდეგი სახე:

$$X = Z+Y$$

სადაც X ნალექებია; Z – აორთქლება; Y – მდინარის ჩამონადენი.

ხოლო შეზღუდული პერიოდისათვის (თვე, წელიწადი) მდინარის აუზის წყლის ბალანსის შედგენისას აუცილებლად უნდა გავითვალისწინოთ აუზში ტენის მარაგის ცვლილება, ე.ი.

$$X =Z+Y\pm U,$$

სადაც U არის ტენის მარაგის ცვლილება.

ამრიგად, შეიძლება დავასკვნათ, რომ მდინარის ჩამონადენის ჩამოყალიბებაზე ძირითად გავლენას ახდენს კლიმატური ფაქტორები (ნალექები, აორთქლება, ტენიაობა, ტემპერატურა).

§ 1.2. ჰაერის ტენიანობა

ჰაერის ტენიანობას განსაზღვრავს ჰაერში არსებული წყლის ორთქლის რაოდენობა. ასხვავებენ აბსოლუტურ ტენიანობას, ფარდობით ტენიანობას და ტენიანობის დეფიციტს.

აბსოლუტური ტენიანობა ეწოდება წყლის ორთქლის რაოდენობას 1მ ჰაერში აღებულ ტემპერატურაზე; იზომება გ/მ^3-ობით და აღინიშნება ***e*** ასოთი. რაც მეტია ჰაერის ტემპერატურა, მით მეტი ორთქლის დაკავება შეუძლია 1 მ^3 ჰაერს. ასე, მაგალითად, –30°C ტემპერატურაზე ჰაერში შეიძლება იყოს 0,45გ ორთქლი, ხოლო +30°C ტემპერატურაზე 30.4 გრამი. ჰაერში არსებული ორთქლი ზრდის მის წნევას, რომელსაც წლის ორთქლის დრეკადობას უწოდებენ და იზომება მილიბარობით. მილიბარი შეესაბამება 0.75მმ ვერცხლის წყლის სვეტის სიმაღლეს.

ჰაერში რეალურად არსებული ***e*** ორთქლის რაოდენობის შეფარდებას ორთქლის იმ რაოდენობასთან, რომელიც მაქსი-

მალურად შეიძლება არსებობდეს ჰაერში აღებულ ტემპერატურაზე, E ფარდობითი ტენიანობა ეწოდება და აღინიშნება r ასოთი. იგი გამოისახება %-ებით.

$$r = \frac{e}{E}100\% . \qquad (1.1)$$

თუ ფარდობითი ტენიანობა მიაღწევს 100%-ს, ჰაერი გაჯერდება ორთქლით, მოხდება მისი კონდენსაცია და წარმოიქმნება ნალექი.

აღებულ ტემპერატურაზე ჰაერის გაჯერებისათვის საჭირო ორთქლის რაოდენობისა და ჰაერში რეალურად არსებული ორთქლის რაოდენობის სხვაობას ტენიანობის დეფიციტი ეწოდება

$$D = E - e . \qquad (1.2)$$

§ 1.3. ნალექები, აორთქლება

აორთქლების პროცესი იმაში მდგომარეობს, რომ თხევადი და მყარი მდგომარეობიდან წყალი გადადის აირად მდგომარეობაში. წყლის მოლეკულები განუწყვეტლივ მოძრაობს. რაც მეტია წყლის ტემპერატურა, მით მეტია მოლეკულების მოძრაობის სიჩქარე. როდესაც მოლეკულების მოძრაობის სიჩქარე გადააჭარბებს მოლეკულების მიზიდულობის ძალებს, ისინი მოწყდება წყლის თავისუფალ ზედაპირს და გადადის ჰაერში. ამიტომ, აორთქლების ინტენსიურობა, პირველ ყოვლისა, დამოკიდებულია წყლის ტემპერატურაზე. გარდა ამისა, აორთქლებაზე დიდ გავლენას ახდენს ჰაერის ნაკადები (ქარი), კერძოდ, ჰაერის ტურბულენტურობა. ქარი ზრდის ჰაერის ტურბულენტურობას და, შესაბამისად, იზრდება აორთქლება. აღსანიშნავია, რომ წყალსაცავების ზედაპირზე ქარის სიჩქარე 1,5–2,5 მეტია ხმელეთის ზედაპირზე, ქარის სიჩქარესთან შედარებით. გარდა ამისა, აორქლებაზე დიდ გავლენას ახდენს ტენიანობის დეფიციტი. თუ ჰაერი გაჯერებლია ორთქლით, მაშინ აორთქლება პრაქტიკულად წყდება.

აორთქლება ყინულსა და თოვლის ზედაპირიდან რამდენიმე ათეულით ნაკლებია წყლის ზედაპირიდან აორთქლებასთან შედარებით. ზომიერ განედებში იგი 20–30 მმ არ აღემატება ზამთრის მთელ პერიოდში. გაზაფხულზე ჰაერის ტემპერატურის ზრდის გამო, თოვლის ზედაპირიდან აორთქლება მნიშვნელოვნად იზრდება. ყინულისა და თოვლის ზედაპირიდან აორთქლების განსხვავებული თავისებურება ისაა, რომ წყლის გადასვლა მყარი მდგომარეობიდან აირადში ისე ხდება, რომ არ გადადის

თხევად ფაზაში. ხმელეთიდან (გრუნტიდან) აორთქლება იყოფა ორ ნაწილად: აორთქლება ხმელეთიდან, რომელიც არ არის დაფარული მცენარეული საფარით და აორთქლება ხმელეთიდან, რომელიც დაფარულია მცენარეული საფარით. პირველ შემთხვევაში, აორთქლება იმაში მდგომარეობს, რომ ორთქლდება უშუალოდ მიწის ზედაპირზე მოსული ნალექები და კაპილარული აწევის გავლენით მიწის ზედაპირზე ამოსული მიწისქვეშა წყალი. მცენარეული საფარით დაფარული ხმელეთიდან აორთქლება მდგომარეობს იმ ნალექების აორთქლებაში, რომელთაც შეიკავებს მცენარის ფოთლები და ტანი და აორთქლება, რომელიც დაკავშირებულია მცენარის სასიცოცხლო პროცესებთან. ცნობილია, რომ მცენარის მიერ შეწოვილი წყლის დიდი ნაწილი მიდის აორთქლებაზე, ხოლო მცირე ნაწილი ხმარდება სასიცოცხლო პროცესებს (1 ლიტრი შეწოვილი წყლიდან მხოლოდ 2–3 გრამი ხმარდება სასიცოცხლო პროცესებს). აორთქლების ამ რთულ პროცესს, ტრანსპირაცია ეწოდება. აორთქლების გათვალისწინება აუცილებელია მარეგულირებელი წყალსაცავებით ჩამონადენის რეგულირების გაანგარიშებისას.

წყლის ობიექტებიდან და ხმელეთიდან აორთქლებული წყლის ტენი ჰაერის დინებით გადაიტანება როგორც ვერტიკალური, ისე ჰორიზონტალური მიმართულებით. წყლის ორთქლის ატმოსფეროს ზედა ფენებში მოხვედრისას, სადაც ტემპერატურა ნაკლებია, იქმნება პირობა, რომ ფარდობითმა ტენიანობამ მიაღწიოს გაჯერების ზღვარს და მოხდეს კონდენსაცია ანუ ორთქლის გადასვლა წყლის წვეთებში; თუ ტემპერატურა დაბალია, წარმოიქმნება ყინულის კრისტალები. ამრიგად, წამოვა ნალექი წვიმის, თოვლისა და სეტყვის სახით. ნალექები არათანაბრადაა განაწილებული დროსა და სივრცეში. ნალექების რაოდენობაზე გავლენას ახდენს რელიეფი, სიმაღლე ზღვის დონიდან, ტყის საფარი, ზღვის სიახლოვე, ქარები ზღვიდან და სხვა.

დედამიწაზე ნალექების განაწილებაზე დეტალურ წარმოდგენას გვაძლევს იზოჰიეტებიანი რუკა. იზოჰიეტი ერთნაირი ნალექების მქონე წერტილების შემაერთებელი ხაზია. ნალექების მოსვლის პროცესი დისკრეტული ხასიათისაა, ამიტომ გასაშუალოების აუცილებელი პერიოდია 20–30 წელი. თანამედროვე წვიმასაზომი და თოვლსაზომი ხელსაწყოები გვაძლევს იმის საშუალებას, რომ იზოჰიზები ავაგოთ, არა მარტო საშუალო წლიური ნალექებისათვის, არამედ თვიური ნალექებისათვისაც. ნალექები იზომება მმ-ობით. დროის ერთეულში მოსულ ნალექებს ინტენსიურს უწოდებენ. პრაქტიკული ამოცანების გადასაწყვეტად

დიდი მნიშვნელობა აქვს არა მარტო საშუალო წლიური ნალექების რაოდენობას, არამედ მისი მოსვლის ინტენსიურობასაც. წვიმას, რომლის ინტენსიურობა 0,5 მმ აღემატება წუთში, კოკისპირულ წვიმას უწოდებენ. მსოფლიოში ყველაზე მეტი ნალექი მოდის ინდოეთში (ბენგალის შტატში), სადაც 1861 წელს მოვიდა 22900 მმ; დღე-ღამის განმავლობაში ყველაზე მეტი ნალექი დაფიქსირდა ფილიპინების კუნძულზე – 1168 მმ; საქართველოში ყველაზე მეტი ნალექი მოდის ბათუმში – 2700 მმ წელიწადში. ნალექები იზომება ნალექსაზომით, რომელიც 500 სმ ფართობის მქონე კასრია, რომელსაც ვერტიკალურ დგარზე ათავსებენ 2მ სიმაღლეზე მიწის ზედაპირიდან. მასში მოხვედრილ ნალექს გადაასხამენ სპეციალურად დაგრადუირებულ მენზურაში, რომელიც პირდაპირ გვაძლევს ნალექების სიდიდეს მმ-ობით. არსებობს ავტომატური თვითჩამწერი ხელსაწყო – პლუვიოგრაფი.

თავი II. მდინარეები

§ 2.1. მდინარის ქსელი. წყალშემკრები აუზი

მიწის ზედაპირზე ნალექების სახით მოსული წყალი, მოხვდება რა დადაბლებულ ადგილებში, ბუნებრივი ქანობის გაყოლებით იწყებს დინებას ჯერ პატარ-პატარა ნაკადულებად, რომლებიც გარკვეული მანძილის გავლის შემდეგ წარმოქმნის მდინარეებს. ეს პატარა მდინარეები შემდგომ თავს იყრის ერთ მთავარ მდინარეში, რომელიც ზღვაში ჩაედინება. ასე შეიქმნება მდინარის ქსელი, რომელსაც გეგმაში აქვს დატოტვილი ხის ფორმა და შედგება მთავარი მდინარისა და მისი მარჯვენა და მარცხენა შენაკადებისაგან. იმ ადგილს, სადაც მდინარე იწყება სათავე ეწოდება, ხოლო შესართავი ჰქვია იმ ადგილს, სადაც მდინარე უერთდება ზღვას, ტბას ან მეორე მდინარეს.

მდინარის კლაკნილობას ახასიათებენ ე.წ. კლაკნილობის კოეფიცენტით, რომელიც მდინარის კლაკლინი სიგრძის და სათავის და შესართავი უბნების შემაერთებელი სწორი ხაზის სიგრძის ფარდობას:

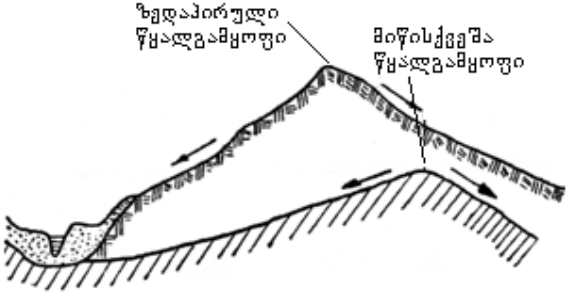
$$K = \frac{\ell}{L}. \qquad (2.1)$$

მდინარის ქსელი ხასიათდება აგრეთვე სიხშირით. იგი მთავარი მდინარისა და მისი შენაკადების სიგრძეების ჯამისა და წყალშემკრები აუზის ფართობის ფარდობაა:

$$a = \frac{\sum \ell}{F}. \qquad (2.2)$$

სადაც l ცალკეული მდინარის სიგრძეა; F – წყალშემკრები აუზის ფართობი.

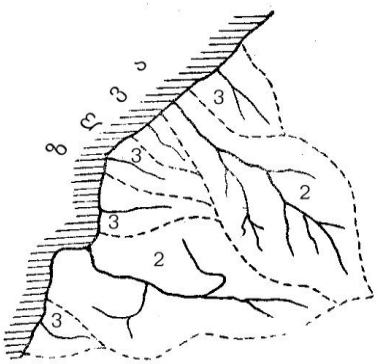
ხმელეთის ის ნაწილი, რომლიდანაც წყალი ჩაედინება ცალკეულ მდინარეებში (ტბაში) ან მდინარეთა სისტემაში, ამ მდინარის (ტბების) ზედაპირული წყალშემკრები აუზია. მიწისქვეშა წყალშემკრები იმ გრუნტების ერთობლიობაა, საიდანაც მიწისქვეშა წყალი შეედინება მდინარეებში, ტბაში, წყალსაცავში (ნახ. 2.1). ზედაპირული წყალშემკრები შემოსაზღვრულია წყალგამყოფი ხაზით, მისი დადგენა შეიძლება ტოპოგრაფიული რუკებიდან. იგი გადის ხმელეთის უმაღლეს წერტილებში, შეკრული კონტურია, რომელიც ერთმანეთისგან გამოყოფს მეზობელ წყალშემკრებ აუზებს (ნახ. 2.2), რომლის დადგენა შესაძლებელია საკმარისი სიზუსტით. პრაქტიკაში მდინარის წყალშემკრებ აუზად მიიღება ზედაპირული წყალშემკრები აუზის ფართობი F.



ნახ. 2.1. ზედაპირული და მიწისქვეშა წყალგამყოფები

მდინარის აუზს ახასიათებენ L სიგრძით, $B = \frac{L}{F}$ საშუალო სიგანით და ასიმეტრიულობის კოეფიციენტით

$$a = \frac{F_{\text{მარცხნა}}}{F_{\text{მარჯვნა}}}.$$

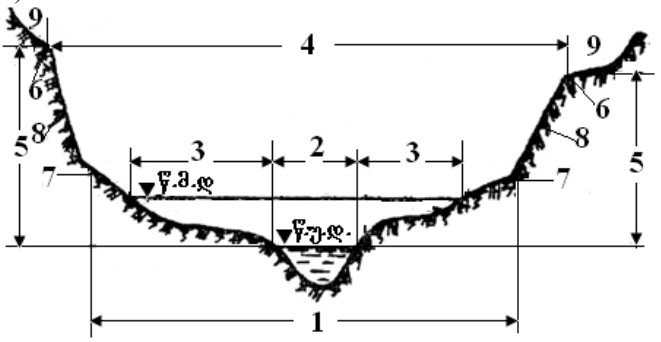


ნახ. 2.2

1 – წყალგამყოფი ხაზები, 2 – მდინარის სისტემები, 3 – ცალკეული მდინარეები, რომელიც უშუალოდ ზღვებს ერთვის

§ 2.2. მდინარის ხეობა. მდინარის გრძივი პროფილი

მდინარის ხეობის ძირითადი დამახასიათებელი ელემენტებია: ხეობის ფსკერი, მდინარის კალაპოტი, ჭალა ანუ ნოღა კალაპოტი, სიგანე, წარბი, ფერდობის ძირი, სიმაღლე და ტერასები (ნახ. 2.3).



ნახ.2.3. ხეობის განივკვეთი (ტერასების გარეშე):
1–ხეობის ფსკერი; 2–მდინარის კალაპოტი; 3–ნოღა კალაპოტი; 4-ხეობის განი; 5-სიმაღლე; 6–ხეობის წარბი; 7-ფერდობის ძირი; 8–ხეობის ფერდობი; 9–მომიჯნავე ადგილმდებარეობა; წმდ – წყლის მაქსიმალური დონე; წუდ – წყლის უდაბლესი დონე

ხეობის დადაბლებულ ნაწილს ხეობის ფსკერს უწოდებენ. ფსკერი ხშირად დაფარულია მდინარის მიერ ტრანსპორტირებული მყარი ნატანით–ალუვიონით. ალუვიონში გაჭრილია მდინარის კალაპოტი ანუ ხეობის ის ნაწილი, რომელშიც წყალი გაედინება ჩვეულებრივ პირობებში. კალაპოტის უდაბლესი წერტილების შემაერთებელ ხაზს ტალვეგი ჰქვია.

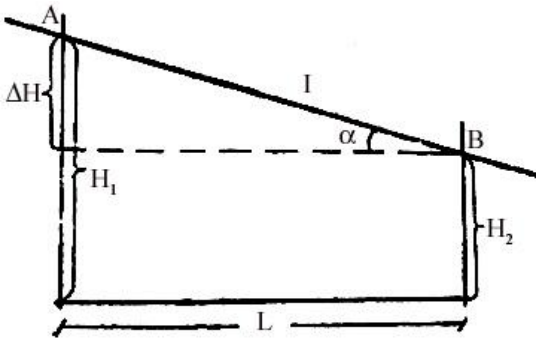
ჭალა ანუ ნოღა კალაპოტი აგებულია მყარი ნატანით, მოვაკებული ადგილია, რომელიც წყლით იფარება მხოლოდ წყალმეტობის დროს. მას აქვს ქანობი მდინარისაკენ. ხეობის წარბი არის ხეობის ფერდობებისა და მიწის ზედაპირის ურთიერთშეუღლების წერტილებში გამავალი ხაზი.

ხეობის წარბის ნიშნულისა და წყლის უდაბლესი დონის ნიშნულს შორის სხვაობა არის ხეობის სიმაღლე.

ხეობის ფერდობზე საფეხურისებრ განლაგებულ მოვაკებულ ადგილებს, რომელზედაც მდინარე მიედინებოდა ისტორიულ წარსულში, ტერასა ეწოდება. ვიწრო და ღრმა ხეობას კანიონი ეწოდება.

მდინარის სათავესა და შესართავში არსებულ ნიშნულთა სხვაობას მდინარის ვარდნას უწოდებენ, $\Delta H=H_1-H_2$ ვარდნის შეფარდებას მდინარის სიგრძესთან ქანობი ეწოდება (ნახ. 2.4)

$$I = \frac{\Delta H}{\ell} = tg\alpha \,. \qquad (2.3)$$

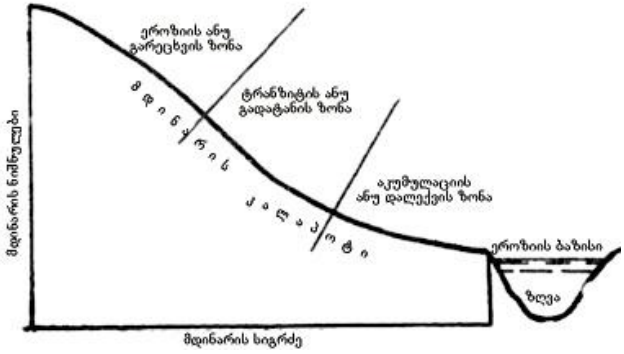


ნახ. 2.4. მდინარის ვარდნა და ქანობი

მდინარის სიგრძეზე გამოიყოფა სამი დამახასიათებელი უბანი (ნახ. 2.5).

მდინარის ზემოთ მაღალმთიან და მთიან ნაწილში დიდია მდინარის ქანობი და, შესაბამისად, დიდია ნაკადის მოძრაობის

სიჩქარე. ამიტომ, ამ უბანზე ხდება მდინარის კალაპოტის ინტენსიური გამორეცხვა და მას ეროზიის ზონას უწოდებენ.



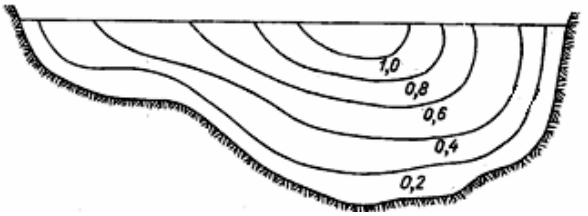
ნახ. 2.5. მდინარის გრძივი პროფილის დამახასიათებელი პროფილი

მდინარის შუა ნაწილში–მთისწინა უბნებში რეცხვითი და დალექვითი პროცესები ერთმანეთს ენაცვლება და, ძირითადად, დაცულია წონასწორობის პროფილი. ამიტომ, ამ უბანს ტრანზიტის ანუ გადატანის ზონას უწოდებენ. მდინარის ქვემო ნაწილში ქანობი და, შესაბამისად, ნაკადის სიჩქარე მცირდება, ამიტომ ამ უბანზე ხდება მყარი ნატანის დალექვა. აქედან გამომდინარე, ამ უბანს აკუმულაციის ანუ დალექვის ზონას უწოდებენ.

2.3. მდინარის ნაკადის კინემატიკური თავისებურება

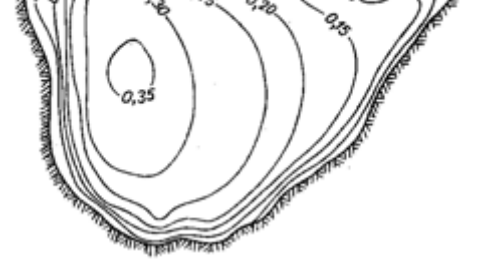
მდინარის ნაკადში სიჩქარის განაწილება გამოირჩევა დიდი სირთულით. ამიტომ, ჰიდროლოგიაში ფართოდ გამოიყენება სიჩქარის ველის განსაზღვრის ექსპერიმენტული მეთოდი. მდინარეში სიჩქარეთა განაწილებაზე თვალსაჩინო წარმოდგენას გვაძლევს ერთნაირი ადგილობრივი სიჩქარეების შემაერთებელი ხაზები – იზოტაქები. იზოტაქების მოხაზულობა მჭიდროდაა დაკავშირებული კალაპოტის ფორმასა და ხორკლიანობასთან. განსაკუთრებით არსებითი განსხვავებაა უდაწნეო ნაკადში სიჩქარის განაწილების პროფილსა და ყინულით დაფარულ ნაკადში სიჩქარის განაწილების პროფილებს შორის (ნახ. 2.6 და 2.7). თუ პირველ შემთხვევაში მაქსიმალური სიჩქარე მდებარეობს სითხის თავისუფალ ზედაპირზე, მეორე შემთხვევაში მაქსიმალური სიჩქარე მოთავსებულია სიღრმეში და მისი მდებარეობა დამოკიდებულია კალაპოტის ფსკერისა და ყინულის ქვედა ზედაპირის

ხორკლიანობათა შეფარდებაზე. ჰიდრომეტრიულ კვეთებს მონიშნავენ მდინარის სწორხაზოვან უბანზე, სადაც მოძრაობა თანაბარი ან მასთან მიახლოებულია. ამიტომ, ჰიდროლოგიის სხვადასხვა ამოცანის გადაწყვეტისას გამოიყენება ჰიდრავლიკაში თანაბარი მოძრაობისათვის მიღებული საანგარიშო ფორმულები.



ნახ. 2.6. იზოტაქების განლაგების ტიპური სქემა მდინარის ღია კალაპოტში

განსაკუთრებით რთული კინემატიკური სურათი გვაქვს მდინარის მოხვეულ უბნებში. როგორც აღვნიშნეთ, ადგილობრივი სიჩქარე მცირდება სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან ფსკერი-



ნახ 2.7. იზოტაქების განლაგების ტიპური სქემა ყინულით დაფარულ მდინარის კალაპოტში

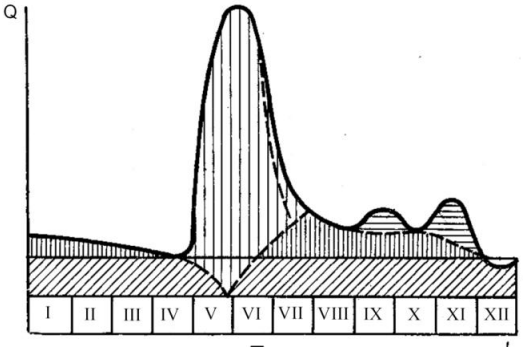
საკენ. ამიტომ ცენტრიდანული ძალები ზედაპირთან გაცილებით მეტია, ვიდრე ფსკერთან. ეს გარემოება იწვევს განივ ცირკულაციას, რის გამოც ზედაპირული დენის წირები მიმართულია ამოზნექილი გვერდიდან შეზნექილისკენ, ხოლო ფსკერული დენის წირები პირიქით – შეზნექილი გვერდიდან ამოზნექილისკენ. ამასთან, მაქსიმალური სიჩქარეები თანდათან გადაადგილდება ამოზნექილი გვერდიდან შეზნექილისკენ. ამიტომ, ცირკუ-

ლაცია იწვევს არასიმეტრიული ცოცხალი კვეთის ფართობების ჩამოყალიბებას. ამოზნექილ გვერდთან გვაქვს მყარი ნატანის დალექვა, შეზნექილ გვერდთან კი ღრმა გარეცხვები და ნაკადის დიდი სიღრმეები–ნატბორები. რადგან მდინარეს გეგმაში კლაკნილი მოხაზულობა აქვს, ამიტომ ნატბორები მდინარის ხან ერთ ნაპირთან იქმნება, ხან მეორესთან. შესაბამისად, გადაინაცვლებს მდინარის უდაბლესი წერტილების შემაერთებელი ხაზი – ფარვატერი. ორი მეზობელი მოხვეულობის შემაერთებელი სწორი უბანი ხასიათდება დაბალი სიღრმეებით, რომელთაც ჩქერებს უწოდებენ.

§ 2.4. მდინარეთა კვება. მდინარის რეჟიმი. წყლის დონის ცვალებადობა

იმ ფაქტორების ერთობლიობას, რომლებიც განსაზღვრავს მდინარის წყლიანობას, მდინარის კვებას უწოდებენ. მდინარის კვებაში მონაწილეობს ზედაპირული წყლები თხევად და მყარ მდგომარეობაში და მიწისქვეშა წყლები. ამრიგად, მდინარე იკვებება წვიმის წყლით, თოვლისა და მყინვარების დნობით მიღებული წყლით და მიწისქვეშა წყლებით. წყლის რეჟიმი ეწოდება წყლის დონის, ხარჯისა და მოცულობის ცვალებადობას დროში. მდინარის წყლის რეჟიმის ძირითადი რაოდენობრივი მახასიათებელი არის ჰიდროგრაფი–წყლის ხარჯის ქრონოლოგიური ცვალებადობის გრაფიკი მდინარის აღებულ კვეთში (ნახ. 2.8). ჰიდროგრაფი გვაძლევს ჩამონადენის შიგაწლიურ განაწილებაზე სრულ წარმოდგენას ანუ ჩამონადენის განაწილებას წლის კალენდარულ პერიოდში ან სეზონში. ჰიდროგრაფის ანალიზის შედეგად შეიძლება განვსაზღვროთ მდინარის ჩამონადენის წარმოშობა. ჰიდროგრაფით შემოხაზული ფართობი რიცხობრივად ჩამონადენის მოცულობის ტოლია; გამოიყენება აგრეთვე მდინარეში წყლის დონის ცვალებადობის გრაფიკი.

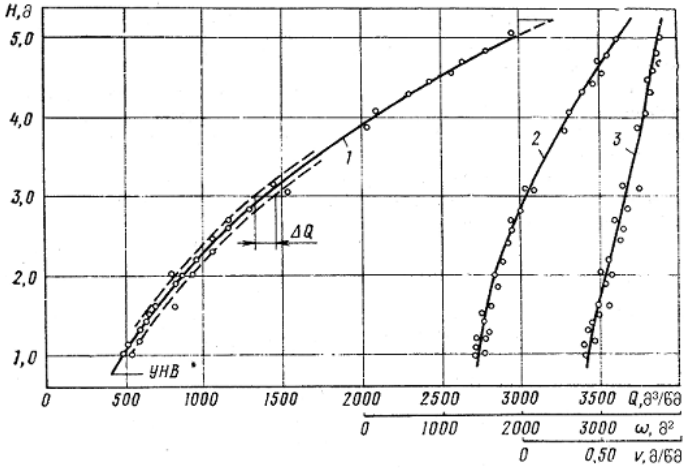
წყლის რეჟიმის ძირითადი ფაზებია – წყალმეტობა, წყალდიდობა და წყალმცირობა. წყალმეტობა არის მდინარის წყლის რეჟიმის ფაზა, რომელიც ყოველწლიურად მეორდება ერთსა და იმავე სეზონში, ხასიათდება დიდი წყლიანობით, წყლის დონის აწევით ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში და თოვლის დნობით ან თოვლისა და მყინვარის ერთდროული დნობით.



ნახ. 2.8

წყლის რეჟიმის ფაზა, რომელიც შეიძლება მრავალჯერ განმეორდეს წლის სხვადასხვა სეზონში და ხასიათდება წყლის ხარჯისა და დონის ხანმოკლე პერიოდში აწევით წყალდიდობა ეწოდება. იგი გამოწვეულია წვიმებით ან თოვლის დნობით, საერთო დათბობის შედეგად.

მდინარის ჩამონადენის მახასიათებლები (წყლის დონე, ხარჯი, სიმაღლე და სხვ.) განიცდის დღედამურ, თვიურ, წლიურ (სეზონურ) და მრავალწლიურ ცვალებადობას. აღებულ კვეთში მდინარის წყლის დონესა და ხარჯს შორის გრაფიკულად გამოსახულ დამოკიდებულებას ხარჯის მრუდი ეწოდება (ნახ. 2.9).



ნახ. 2.9. წყლის ხარჯის, ცოცხალი კვეთის ფართობისა და სიჩქარეთა დამახასიათებელი მრუდები

მდინარეში წყლის ხარჯის ცალკეული გაზომვების ძირითადი მიზანია კავშირის დამყარება წყლის ხარჯსა და დონეს შორის Q=f(H). ამის მიხედვით, შემდგომში შესაძლებელია წყლის ყოველდღიური ხარჯის დადგენა გაზომილი წყლის დონის საშუალებით. რადგან ხარჯი Q=ω·υ, ხარჯის მრუდს აქვს პირდაპირი კავშირი ცოცხალი კვეთის ფართობსა და საშუალო სიჩქარის მრუდებთან. ცოცხალი კვეთის მრუდს უწოდებენ ω=f(H) გრაფიკულ გამოსახულებას, ხოლო საშუალო სიჩქარისა და დონეს შორის გრაფიკულად გამოსახულ კავშირს, საშუალო სიჩქარის მრუდს υ=f(H).

ხარჯის მრუდზე ცდებით მიღებული წერტილები გარკვეული გაბნევით განლაგდება; მრუდს მდოვრედ ატარებენ გაბნევის ზოლის შუაში.

§ 2.5. მდინარის ჩამონადენის მახასიათებელი ელემენტები

წყლის ობიექტების მახასიათებლების დროში ცვალებადობას ჰიდროლოგიურ რეჟიმს უწოდებენ. მისი ერთ-ერთი ძირითადი მახასიათებელია ჩამონადენი. მდინარის წყლიანობის დასახასიათებლად, აგრეთვე სხვადასხვა მდინარის ჩამონადენის შესადარებლად ჰიდროლოგიაში იყენებენ შემდეგ მახასიათებლებს:

1. მდინარის ხარჯი არის დროის ერთეულში აღებულ განივკვეთში გადენილი წყლის რაოდენობა (მოცულობა). მას ჩვეულებრივ გამოსახავენ $მ^3/წმ$-ებით. იგი ახასიათებს მდინარის წყლიანობას აღებულ მომენტში. ჰიდროლოგიური გაანგარიშების დროს გამოიყენება ხარჯის საშუალო დღიური, საშუალო თვიური, საშუალო წლიური და საშუალო მრავალწლიური მნიშვნელობები.

2. ჩამონადენის მოცულობა W არის მდინარის აღებულ კვეთში დროის პერიოდში გადენილი სითხის მოცულობა (რაოდენობა) $W=Q_{საშ}T$, $მ^3$ ან $კმ^3$, სადაც W არის დროის T პერიოდში გადენილი სითხის მოცულობა, ხოლო $Q_{საშ}$ –წყლის საშუალო ხარჯი განსახილველ პერიოდში.

3. ჩამონადენის მოდული M არის წყლის ხარჯი, რომელიც ჩამოედინება წყალშეკრები აუზის ერთეული ფართობიდან დროის ერთეულში. გამოისახება $ლ/წმ$ $კმ^2$-ებით, ზოგჯერ $მ^3/წმ$

კმ^2-ებით. ჩამონადენის მოდულსა და ხარჯს შორის არსებობს შემდეგი დამოკიდებულება:

$$M = \frac{1000 \cdot Q}{F} = \left[\frac{\text{ლ}}{\text{წმ} \cdot \text{კმ}^2} \right]. \qquad (2.4)$$

1000 არის მ^3/წმ-დან ლ/წმ-ში გადამყვანი კოეფიციენტი.

მოდული ახასიათებს წყალშემკრები აუზის წყლიანობას. მდინარისათვის შეიძლება გამოთვლილ იქნეს მოდული აღებული მომენტისათვის, ასევე საშუალო ჩამონადენის მოდული რაიმე პერიოდისათვის (მაგ., თვისათვის, წლისათვის და ა.შ.). წლიური ჩამონადენის დასახასიათებლად იღებენ ე.წ. „ჰიდროლოგიურ“ წელს. მის დასაწყისად ხშირად თვლიან იმ პერიოდს, როდესაც მდინარის საზრდოობაში შეიმჩნევა მკვეთრი ცვლილება ან როდესაც ზედაპირული ჩამონადენი სრულიად წყდება და იწყება ნალექების დაგროვება თოვლის სახით. ჰიდროლოგიური წლის დასაწყისად ევროპულ ნაწილში ხშირად იღებენ პირველ ოქტომბერს, პირველ ნოემბერს ან პირველ დეკემბერს.

ჰიდროლოგიურ გაანგარიშებაში ფართოდ გამოიყენება ჩამონადენის მოდულის რუკა. მასზე დააქვთ საშუალო მრავალწლიური მოდულის მნიშვნელობა აუზის ცენტრში. ერთნაირი მოდულების მქონე წერტილებს აერთებენ იზოხაზებით.

4. ჩამონადენის შრის სიმაღლეა h. თუ ცნობილია ჩამონადენის მოცულობა რაიმე პერიოდში (W მ^3) და აუზის ფართობი, მაშინ ჩამონადენის შრის სიმაღლე ამ პერიოდში გამოითვლება ფორმულით:

$$h = \frac{W \cdot 10^3}{F \cdot 10^6}, \text{ მმ}. \qquad (2.5)$$

10^6 არის კმ^2-ის მ^2-ში გადამყვანი რიცხვი, ხოლო მ-დან მმ-ში გადამყვანი რიცხვია 10^3.

ჩამონადენის მოდულისა და შრის სიმაღლეს შორის არსებობს შემდეგი კავშირი:

$$h = M \cdot N,$$

სადაც N არის მილიონი წამის აღებულ პერიოდში. 30-დღიან თვეში N=2,59, ხოლო 31-დღიანი თვისათვის N=2,68, წლისათვის N=31,56 .10^6.

5. ჩამონადენის ნორმა. წლიური ჩამონადენი განიცდის მნიშვნელოვან ცვლილებას მრავალწლიან პერიოდში. თუ გამოვთვლით ჩამონადენის საშუალო მრავალწლიურ მნიშვნელობას, მაშინ მივიღებთ მეტ-ნაკლებად მყარ მახასიათებლებს, რომელსაც

საშუალო მრავლწლიურ ჩამონადენს ანუ ნორმას უწოდებენ. მაგალითად Q_0, h_0, M_0 და ა.შ.

6. მოდულური კოეფიციენტი არის ჩამონადენის ნებისმიერი მახასიათებლის შეფარდება ნორმასთან:

$$K = \frac{M_i}{M_0} = \frac{hi}{h_0} = \frac{Q_i}{Q_0} \quad . \tag{2.6}$$

i ინდექსით აღნიშნულია ჩამონადენის სიდიდე აღებული პერიოდისათვის. მოდულური კოეფიციენტი ახასიათებს მდინარის წყლიანობას აღებულ პერიოდში. მაგალითად, როდესაც k>1, ის წლები უხვწყლიანად ითვლება და პირიქით.

7. ჩამონადენის კოეფიციენტი არის აღებული პერიოდის h შრის სიმაღლის შეფარდება იმავე პერიოდში მოსული x ნალექების რაოდენობასთან და გამოისახება პროცენტებით

$$\eta = \frac{h}{x} \cdot 100\% \, .$$

იგი გვიჩვენებს მოსული ნალექების რა რაოდენობა ხმარდება მდინარის ჩამონადენის ჩამოყალიბებას.

თავი III. ჰიდროლოგიური გაანგარიშებები

§ 3.1. მდინარის ჩამონადენის ძირითადი სტატისტიკური მახასიათებლების განსაზღვრა

ჰიდროლოგიური გაანგარიშების ძირითადი მიზანია იმ მახასიათებლების განსაზღვრა, რომლებიც რაოდენობრივად აღწერს ჰიდროლოგიურ პროცესებს. მათ ჰიდროლოგიურ მახასიათებლებს უწოდებენ. მდინარის ჩამონადენის ფორმირების ფიზიკურ-გეოგრაფიული პირობების მრავალფეროვნება და ცვლილება დროში განაპირობებს ჰიდროლოგიური გაანგარიშების სირთულეს.

ჰიდროლოგიური მახასიათებლების ცვალებადობა აშკარად გამოხატულ ალბათურ ხასიათს ატარებს, ამიტომ საანგარიშო ჰიდროლოგიური მახასიათებლების განსაზღვრის (შეფასების) მეთოდები ეყრდნობა არსებულ დაკვირვებათა მწკრივების სტატისტიკურ კანონზომიერებებს. ცხადია, რაც უფრო ხანგრძლივი იქნება დაკვირვებათა მწკრივი, უფრო ზუსტი იქნება

სტატისტიკური კანონზომიერება და მით უფრო საიმედო მომავლისათვის ჰიდროლოგიურ მახასიათებელთა პროგნოზი.

მწკრივის ცვალებადობის ძირითად სტატისტიკურ მახასიათებლებს წარმოადგენს მწკრივების წევრთა საშუალო არითმეტიკული მნიშვნელობა X_0, ვარიაციის კოეფიციენტი C_V და ასიმეტრიის კოეფიციენტი C_S. თუ გვაქვს დაკვირვებათა $X_1, X_2, X_3 \ldots X_n$ მწკრივი, მაშინ მისი საშუალო არითმეტიკული ანუ მოდა შემდეგნაირად გამოითვლება:

$$X_0 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i \,, \tag{3.1}$$

სადაც n არის მწკრივის წევრთა რაოდენობა.

სტატისტიკური მწკრივის საშულო არითმეტიკულის მიმართ გაბნევის (ცვალებადობის) დასახასიათებლად გამოიყენება საშუალო კვადრატული გადახრა ანუ სტანდარტი, რომელიც გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - X_0)^2}{n-1}} \,. \tag{3.2}$$

საშუალო კვადრატული გადახრის კვადრატს დისპერსიას უწოდებენ. საშუალო კვადრატული გადახრა კარგად ახასიათებს მწკრივის წევრთა ცვალებადობას და აქვს მწკრივის წევრთა განზომილება. ჰიდროლოგიური გაანგარიშებისას ხშირად საჭირო ხდება სხვადასხვა ჰიდროლოგიური მახასიათებლის დაკვირვებათა მწკრივების ცვალებადობის შედარება. საშუალო კვადრატული გადახრა (რადგან აქვს მწკრივის წევრთა განზომილება) შედარებისათვის არ გამოდგება. სხვადასხვა მწკრივის ცვალებადობის შედარების მიზნით, საშუალო კვადრატულ გადახრას გამოსახავენ საშუალო არითმეტიკულ ნაწილებში, რომელსაც ვარიაციის კოეფიციენტს უწოდებენ. იგი ტოლია:

$$C_V = \frac{\sigma_X}{X_0} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(K_i - 1)^2}{n-1}} \,. \tag{3.3}$$

$K_i = \frac{X_i}{X_0}$ არის მწკრივის აღებული წევრის ფარდობა საშუალო არითმეტიკულთან. მას მოდულური კოეფიციენტი ეწოდება.

ვარიაციის კოეფიციენტი არის მწკრივის წევრთა ცვალებადობის მახასიათებელი უგანზომილებო სიდიდეა.

საშუალო არითმეტიკული და ცვალებადობის სხვადასხვა მახასიათებელი (σX,CV) სრულად ვერ ახასიათებს მწკრივს. საქმე ისაა, რომ სხვადასხვა მწკრივიდან შეიძლება შეგვხვდეს ისეთები, რომლებსაც აქვს ერთნაირი საშუალო არითმეტიკული და დისპერსია, მაგრამ ერთმანეთისაგან განსხვავდება ცენტრის მიმართ სხვადასხვაგვარი დაჯგუფებით და განაწილებით. თუ მწკრივის წევრთა გადახრებიდან დადებით და უარყოფით გადახრათა რაოდენობა ერთნაირია (მიუხედავად მათი აბსოლუტური სიდიდისა), მაშინ ასეთ მწკრივს სიმეტრიულს უწოდებენ. თუ დადებით გადახრათა რიცხვი უარყოფით გადახრებთან შედარებით მცირეა, მაშინ ამბობენ, რომ მწკრივს აქვს დადებითი ასიმეტრია; თუ მწკრივში დადებითი გადახრები სჭარბობს უარყოფით გადახრებს, მაშინ გვაქვს უარყოფითი ასიმეტრია. თუ გადახრებს ავიყვანთ კუბში დადებითი ასიმეტრიის დროს დადებითი გადახრები გაიზრდება უფრო მეტად, ვიდრე უარყოფითი გადახრები და გადახრათა კუბების ჯამი დადებითი იქნება. უარყოფითი ასიმეტრიის დროს კი გადახრათა კუბების ჯამი იქნება უარყოფითი. მწკრივის სიმეტრიულობის დასახასიათებლად უგანზომილებო გამოსახულების მისაღებად გადახრათა კუბების საშუალო მნიშვნელობას ყოფენ საშუალო კვადრატული გადახრის კუბ-ზე. ამ ფარდობას ასიმეტრიის კოეფიციენტს უწოდებენ. იგი ტოლია:

$$C_S = \frac{\sum_{i=2}^{n}(K_i - 1)^3}{nC_v^3}. \qquad (3.4)$$

ცხადია, სიმეტრიული მწკრივისათვის ასიმეტრიის კოეფიციენტი $C_S = 0$. ასიმეტრიის კოეფიციენტის მნიშვნელობა რომ საიმედო იყოს, საჭიროა გვქონდეს დაკვირვებათა ხანგძლივი მწკრივი (100 წელი და მეტი), რაც ჰიდროლოგიურ პრაქტიკაში იშვიათად გვხვდება. რადგან ვარიაციის კოეფიციენტი უფრო მდგრადია დროის მიმართ, ამიტომ საინჟინრო-ჰიდროლოგიურ გაანგარიშებებში ასიმეტრიის კოეფიციენტს გამოთვლიან ემპირიული ფორმულით, როგორც ვარიაციის კოეფიციენტის ჯერად რიცხვს, Cs=aCv.

თუ მდინარე იკვებება თოვლის დნობის ხარჯზე, a=2, ე.ი. Cs=2Cv.

თუ მდინარე იკვებება წვიმების ხარჯზე, a =4, ე.ი. Cs=3Cv.

თუ მდინარეს აქვს შერეული კვება, a =3 და Cs=3Cv.

3.2. კორელაცია

ჰიდროლოგიური კვლევების დროს ხშირად წარმოიქმნება ორი და მეტი მწკრივის ჰიდროლოგიურ მახასიათებლებს შორის დამოკიდებულების დამყარების აუცილებლობა.

თუ ფუნქცია დამოკიდებულია არა მარტო $X_1, X_2, X_3 \dots X_n$-ზე, არამედ სხვა ფაქტორებზეც, მაშინ, ფუნქციური კავშირებისგან განსხვავებით, Y–სა და $X_1, X_2, X_3 \dots X_n$-ს შორის კავშირს, კორელაციური ეწოდება.

ფუნქციური დამოკიდებულების შემთხვევაში არგუმენტის თითოეულ მნიშვნელობას შეესაბამება ფუნქციის მხოლოდ ერთი განსაზღვრული მნიშვნელობა. კორელაციური დამოკიდებულების შემთხვევაში არგუმენტის თითოეულ მნიშვნელობას შეიძლება შეესაბამებოდეს ფუნქციის რამდენიმე მნიშვნელობა.

ჰიდროლოგიურ მახასიათებლებს შორის კავშირი, უმეტეს შემთხვევაში, კორელაციურია. კორელაციური დამოკიდებულება შეიძლება გამოისახოს ანალიზურად, თუ შევარჩევთ განტოლებას, რომელიც კორელაციურად დააკავშირებს X და Y-ს.

კორელაციურ კავშირს ახასიათებენ R კორელაციის კოეფიციენტით. იგი იცვლება 0-დან 1-მდე, მაგრამ მას შეიძლება ჰქონდეს დადებითი ან უარყოფითი ნიშანი. კორელაციის კოეფიციენტის დადებითი მნიშვნელობა გვიჩვენებს პირდაპირ კავშირს, როდესაც X და Y-ის ორივე მნიშვნელობა იზრდება ან მცირდება ერთდროულად. კორელაციის კოეფიცენტის უარყოფითი მნიშვნელობა გვიჩვენებს, რომ X-ის გაზრდის შემთხვევაში Y მცირდება, რაც შებრუნებული კავშირის მაჩვენებელია.

რაც უფრო ახლოსაა R ერთთან, მით უფრო მჭიდროა X-სა და Y-ს შორის კავშირი.

კორელაციის კოეფიციენტი გამოითვლება ფორმულით:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - X_0)(Y_i - Y_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(X_i - X_0)^2 \cdot \sum_{i=1}^{N}(Y_i - Y_0)^2}} \quad . \qquad (3.5)$$

ჰიდროლოგიაში ორი მწკრივის ურთიერთკავშირის ხარისხის განსაზღვრასთან ერთად, ხშირად საჭირო ხდება აღებული მწკრივის წევრთა ურთიერთკავშირის (შიგა კავშირის) განსაზღვრა. ამისათვის იყენებენ ავტოკორელაციას.

ავტოკორელაციის კოეფიცენტი გამოითვლება ფორმულით:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_t - X_0)(X_{t+k} - X_0)}{\sigma_X^2}, \qquad (3.6)$$

სადაც X_t საწყისი მწკრივია t=0,1,2,…, N; X_{t+k}–მწკრივია, რომელიც გადაადგილებულია K ბიჯით (K=1,2,3,…, $\frac{\mathbf{N}}{\mathbf{4}}$).

3.3. უზრუნველყოფის მრუდების გამოყენება ჰიდროლოგიაში

როგორც ვიცით, მდინარის ჩამონადენი განიცდის ცვალებადობას დროში. წლიური ცვალებადობა გამოწვეულია წელიწადის დროებით. თუ მხედველობაში არ მივიღებთ ჩამონადენის დღეღამურ ცვალებადობას, გვექნება ჩამონადენის მახასიათებლების უწყვეტი მწკრივი. ჩამონადენის მრავალწლიანი რეჟიმის შესწავლისას საქმე გვაქვს წყვეტილ მწკრივთან, რომლებსაც ერთმანეთისგან ყოფს დროის მონაკვეთი. უწყვეტი მწკრივის ხანგრძლივობა ანუ უზრუნველყოფა გვიჩვენებს აღებული სიდიდის ან მასზე მეტი სიდიდის ხარჯის არსებობის ხანგრძლივობას. წყვეტილი მწკრივის უზრუნველყოფა გვიჩვენებს იმ შემთხვევების რიცხვს, რამდენჯერაც გვხვდება აღებული სიდიდის ან მასზე მეტი სიდიდის ხარჯი. თუ წყვეტილ მწკრივს დავალაგებთ კლებადობის მიხედვით, მაშინ მწკრივის წევრთა უზრუნველყოფა გამოითვლება ფორმულით:

$$P = \frac{m}{n} \cdot 100\%,$$

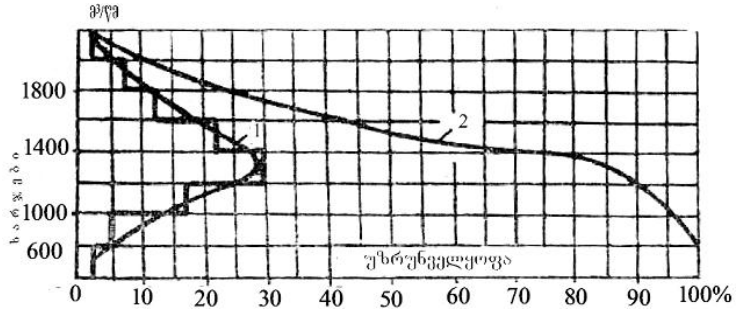
სადაც m კლებადობით დალაგებული მწკრივის წევრის რიგითი ნომერია; n–მწკრივის წევრთა რიცხვი. იმისათვის, რომ 0%-იანი და 100%-იანი უზრუნველყოფა გამოვრიცხოთ, ემპირიული უზრუნველყოფის გამოსათვლელად გამოიყენება შემდეგი ფორმულა:

$$P = \frac{m}{n+1} \cdot 100\%. \qquad (3.7)$$

ჰიდროლოგიური მწკრივების დასახასიათებლად გამოიყენება შემდეგი გრაფიკები: ჰიდროგრაფი, განმეორების გრაფიკი და უზრუნველყოფის გრაფიკი.

განმეორების გრაფიკის ასაგებად ორდინატთა ღერძზე გადაზომავენ კლებადობით დალაგებულ ხარჯებს, ხოლო აბსცისთა ღერძზე – ხარჯების განმეორების რიცხვს. ხარჯებს ყოფენ ინტერვალებად და განსაზღვრავენ თითოეული ინტერვალის

შესაბამისი ხარჯების განმეორების რიცხვს. წერტილები აიღება ინტერვალის შუაში, მიღებულ წერტილებს აერთებენ ვერტიკალური ხაზებით. მივიღებთ განმეორების გრაფიკს. თუ ინტერვალს თანდათანობით შევამცირებთ, მაშინ განმეორების გრაფიკი ზღვარში მოგვცემს განმეორების მრუდს (ნახ. 3.1).



ნახ. 3.1. განმეორების განაწილების 1 და უზრუნველყოფის 2 ტიპური მრუდები

თანდათანობით შევკრიბოთ ზედა ინტერვალიდან ქვედასკენ ხარჯების განმეორების რიცხვი. იგი მივაკუთვნოთ ინტერვალის ქვედა ბოლოს. ასეთი წესით აგებულ საფეხურისებრ გრაფიკს ხანგრძლივობის ანუ უზრუნველყოფის გრაფიკი ეწოდება. იგი გვიჩვენებს რამდენჯერ შეგვხვდება აღებულ ინტერვალში მოთავსებული ხარჯი ან მასზე მეტი ხარჯი დაკვირვების მთელ პერიოდში. ინტერვალის შემცირებით ზღვარში მივიღებთ მრუდს, რომელსაც ხანგრძლივობის ანუ უზრუნველყოფის მრუდს უწოდებენ. ხშირად აბსცისთა ღერძს გამოსახავენ განსახილველი პერიოდის პროცენტებით. მთელ პერიოდს იღებენ 100%-ის ტოლს. მათ უზრუნველყოფის პროცენტებს უწოდებენ (ნახ. 3.1). უზრუნველყოფის მრუდი გვიჩვენებს რამდენ შემთხვევაში (%-ით) შეიძლება შეგვხვდეს აღებული სიდიდის ან მასზე მეტი სიდიდის ხარჯი.

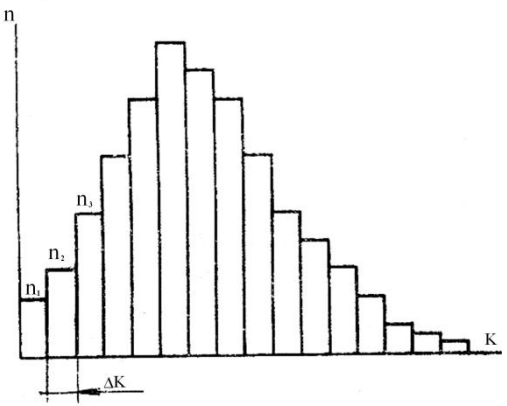
ჰიდროლოგიაში გამოიყენება აგრეთვე განაწილების მრუდები. მის ასაგებად აბსცისთა ღერძზე გადაზომავენ ხარჯებს ან მოდულურ კოეფიციენტებს, რომელთაც ყოფენ ინტერვალებად. ორდინატთა ღერძზე გადაიზომება თითოეულ ინტერვალში მოთასებული ხარჯების (ან მოდულური კოეფიციენტების) განმეორებათა რიცხვი n ანუ სიხშირე. მიღებულ გრაფიკს, ჰისტოგრამა ეწოდება. ინტერვალების თანდათანობით შემცირე-

ბით მივიღებთ მრუდს, რომელსაც განაწილების მრუდს უწოდებენ (ნახ. 3.2). ამრიგად, უზრუნველყოფის მრუდი მიიღება ჰისტოგრამიდან სიხშირეების თანდათანობითი შეკრებით ანუ განაწილების მრუდის ინტეგრირებით. განაწილების მრუდის ინტეგრალს თეორიული უზრუნველყოფის მრუდს უწოდებენ. უზრუნველყოფის მრუდის თეორიული გამოსახვა დღეისათვის შეუძლებელია, რადგანაც ძალიან ცოტა მონაცემი გვაქვს მრუდის ზედა და ქვედა მონაკვეთებისათვის, რომლებიც ახასიათებს ჩამონადენის უდიდეს და უმცირეს მნიშნელობებს. ამიტომ, უზრუნველყოფის თეორიულ მრუდს აგებენ განაწილების მათემატიკური მრუდების საფუძველზე.

ჰიდროლოგიაში ყველაზე ფართო გამოიყენება პირსონის III ტიპის ბინომური და სამპარამეტრიანი გამა-განაწილების მრუდები. ორივე სახის განაწილების მრუდები თავისუფლად შეიძლება განვსაზღვროთ X_0, C_v და Cs პარამეტრებით.

პირსონის III ტიპის ბინომური მრუდის მათემატიკური გამოსახულების ზუსტი ინტეგრირება შეუძლებელია. ა.ფოსტერმა მოახდინა ამ განტოლების მიახლოებითი ინტეგრირება და შეადგინა ცხრილები, რომელთა მიხედვითაც შეიძლება განისაზღვროს უზრუნველყოფის მრუდის ორდინატები X_0, C_v და C_s პარამეტრების საშუალებით. ეს ცხრილები შემდეგში დააზუსტა რიბკინმა. ცხრილებში მოცემულია უზრუნველყოფის მრუდის ორდინატის გადახრა საშუალო მნიშვნელობიდან Φ_p%. იმ შემთხვევაში, როცა C_v=1. C_s-სა და P%-ზე დაყრდნობით

$$\Phi_{P\%} = \frac{K_{P\%} - 1}{C_v} \cdot 100\% .$$



აქედან უზრუნველყოფის მრუდის ორდინატა

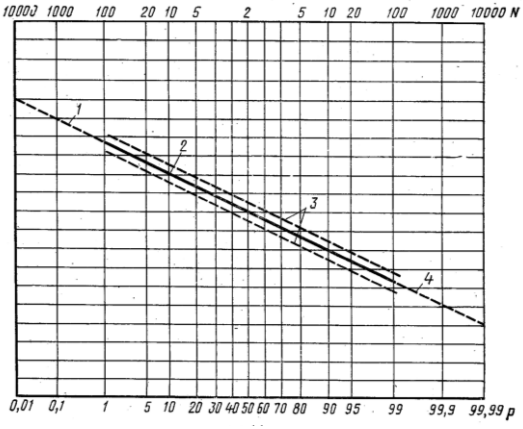
$$K_{P\%} = \phi_{P\%} \cdot C_v + 1. \qquad (3.8)$$

(3.8) ფორმულის ანალიზის საფუძველზე ვღებულობთ, რომ იმ შემთხვევაში, როდესაც $C_s<2C_v$, ბინომური მრუდის გამოყენება შეუძლებელია ჰიდროლოგიური გაანგარიშებებისათვის. თეორიულად და პრაქტიკულად დამტკიცებულია, რომ სამპარამეტრიანი მანაწილებლის გამოყენება შესაძლებელია C_s და C_v-ს ნებისმიერი თანაფარდობისათვის. სამპარამეტრიანი გამა-განაწილების მრუდების რიცხვითი ინტეგრირების საფუძველზე კრიცკიმ და მენკელმა შეადგინეს ცხრილები, რომლებიც საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ უზრუნველყოფის თეორიული მრუდის ორდინატა C_v, $\frac{C_S}{C_V}$ და, უზრუნველყოფაზე დამოკიდებულებით, ცხრილებში შევიტანოთ მოდულური კოეფიციენტების მნიშვნელობები $K_{P\%}$, P%=0,001-დან P%=99%-მდე. თუ ცნობილია $K_{P\%}$, უზრუნველყოფის მრუდის ორდინატა, მაშინ

$$X=K_{P\%}X_0, \qquad (3.9)$$

სადაც X_0 არის დაკვირვებათა მწკრივის საშუალო მნიშვნელობა – ნორმა.

უზრუნველყოფის თეორიული ეწოდება იმ მრუდს, რომელიც აგებულია თეორიული ფორმულით (3.9) განსაზღვრული კოორდინატებით. ემპირიული მრუდის აგება გართულებულია, რადგან არასაკმარისი რაოდენობითაა მოცემული ემპირიული მნიშვნელობები უზრუნველყოფის მრუდის ზედა და ქვედა ნაწილში. გარდა ამისა, ამ ნაწილებში მრუდის მოხაზულობა რთულია (აქვს დიდი გრადიენტი), რის გამოც უზრუნველყოფის მცირე ცვლილებას შეესაბამება ჰიდროლოგიური მახასიათებლის ძალიან დიდი ნაზარდი. ამ სიძნელეების გადალახვა შეიძლება უზრუნველყოფის მრუდის აგებით უჯრედულ ალბათობაზე. ამ უჯრედულ ალბათობის სკალას გარდაქმნიან ისე, რომ მართკუთხა კოორდინატთა სისტემაში მოხდეს უზრუნველყოფის მრუდის გაწრფივება (ნახ. 3.3). იმავე ნახაზზე დაიტანენ (3.6) ფორმულით გამოთვლილ ემპირიულ მნიშვნელობებს.



ნახ. 3.3. 1. დაბალი უზრუნველყოფის შესაბამისი ექსტრაპოლირებული ნაწილი; 2. გაწრფივებული ემპირიული მრუდი; 3. ემპირიული წერტილების მომვლები; 4. მაღალი უზრუნველყოფის შესაბამისი ექსტრაპოლირებული ნაწილი

3.4. მაქსიმალური ხარჯების გაანგარიშება დაკვირვებათა საკმარისი მწკრივის არსებობის შემთხვევაში

საანგარიშო მაქსიმალური ეწოდება ხარჯს, რომლის გატარებაზე იანგარიშება ჰიდროკვანძის წყალსაგდები ნაგებობების ზომები, ხიდის ნახვრეტის ზომები და სხვა.

საანგარიშო მაქსიმალური ხარჯების გაანგარიშება ხდება სახელმწიფო სტანდარტების მიხედვით. ამ სტანდარტებით დადგენილია მაქსიმალური ხარჯების საანგარიშო უზრუნველყოფა ნაგებობის კლასის მიხედვით.

საანგარიშო შემთხვევა	წყლის საანგარიშო მაქსიმალური ხარჯების უზრუნველყოფა P% ნაგებობის კლასის მიხედვით			
	I	II	III	IV
ძირითადი	0.1	1.0	3.0	5.0
შესამოწმებელი	0.01	0.1	0.5	1.0
* გარანტირებული შესწორების გათვალისწინებით				

თოვლის დნობით და წვიმებით გამოწვეული მაქსიმალური ხარჯები, დაკვირვებათა საკმარისი მწკრივის არსებობის შემთხვე-

ვაში, გაიანგარიშება უზრუნველყოფის ანალიზური მრუდების მეშვეობით. როგორც წესი, გამოიყენება სამპარამეტრიანი გამაგანაწილების მრუდი. განსაკუთრებულ შემთხვევაში გამოიყენება განაწილების ბინომიალური მრუდი. დაკვირვებათა მწკრივის სტატისტიკურ დამუშავებას წინ უნდა უსწრებდეს საწყისი მასალის დეტალური ანალიზი. განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება $Q = f(H)$ ხარჯის მრუდის სწორ აგებას და მის ექსტრაპოლაციას. ზემოხსენებული განაწილების მრუდის პარამეტრების, კერძოდ, დაკვირვებათა მაქსიმალური ხარჯების საშუალო მრავალწლიური მნიშვნელობა $\overline{Q}$, ვარიაციის კოეფიციენტი C_v და ასიმეტრიის კოეფიციენტი C_s. გამოითვლება მომენტების, უდიდესი დამაჯერებლობის და გრაფოანალიტიკური მეთოდებით. მომენტების მეთოდით საშუალო არითმეტიკული გამოითვლება ფორმულით:

$$\overline{Q} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_i}{n}, \tag{3.10}$$

სადაც n დაკვირვებათა წლების რაოდენობაა.

ვარიაციისა და ასიმეტრიის კოეფიციენტები მომენტების მეთოდით გამოითვლება შემდეგი ფორმულებით:

$$Cv = \left(a_1 + \frac{a_2}{n}\right) + \left(a_3 + \frac{a_4}{n}\right)\overline{Cv} + \left(a_3 + \frac{a_6}{n}\right)\overline{Cv^2};$$

$$Cs = \left(b_1 + \frac{b_2}{n}\right) + \left(b_3 + \frac{b_4}{n}\right)\overline{Cv} + \left(b_3 + \frac{b_6}{n}\right)\overline{Cv^2}.$$

$a_1 \ldots a_6$ და $b_1 \ldots b_6$ კოეფიციენტები აიღება ცხრილებიდან. $\overline{Cv}$ და $\overline{Cs}$ გადანაცვლებული ვარიაციისა და ასიმეტრიის კოეფიციენტებია, რომლებიც გამოითვლება შემდეგი ფორმულებით:

$$\overline{Cv} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(K_i - 1)^2}{n-1}}, \tag{3.11}$$

$$\overline{Cs} = \frac{n\sum_{i=1}^{n}(K_i - 1)^3}{\overline{C_v^3}(n-1)(n-2)}. \tag{3.12}$$

თუ $C_v \le 0{,}6$ და $C_s < 1{,}0$ ვარიაციისა და ასიმეტრიის კოეფიციენტების გაანგარიშება დასაშვებია (3.11) და (3.12) ფორმულებით.

დაკვირვებათა პერიოდი ითვლება საკმარისად, თუ განსახილველი პერიოდი რეპრეზენტაციულია და განსახილველი ჰიდროლოგიური მახასიათებლების ფარდობითი საშუალო კვადრატული ცდომილება 20% არ აღემატება.

საშუალო არითმეტიკულის საშუალო კვადრატული ცდომილება გამოითვლება ფორმულით:

$$\sigma_{cv} = \frac{\sigma_Q}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{1+r}{1-r}},$$

სადაც r ავტოკორელაციის კოეფიციენტია.

ვარიაციის კოეფიციენტის საშუალო კვადრატული ცდომილება გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$\sigma_{cv} = \frac{Cv}{n+4C_v^2}\sqrt{\frac{n(1+C_v^2)}{2}\left(1+\frac{3Cvr^2}{1+r}\right)}.$$

სხვა მახასიათებლებისა და კორელაციის კოეფიციენტების ცდომილებები აიღება სპეციალური ცხრილებიდან.

უდიდესი დამაჯერებლობის მეთოდი იმაში მდგომარეობს, რომ საძიებელი პარამეტრების შეფასებისას მხედველობაში მიიღება მისი ისეთი მნიშვნელობა, რომლის დროსაც დამაჯერებლობის ფუნქცია მიაღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას. ამ მეთოდის დროს ვარიაციის კოეფიციენტი C_v და ასიმეტრიის კოეფიციენტისა და ვარიაციის კოეფიციენტის ფარდობა $\frac{C_S}{C_v}$ განისაზღვრება ნომოგრამის, λ_2 და λ_3 სტატისტიკების მიხედვით

$$\lambda_2 = \frac{\sum_{i-1}^{n} lg\, K_i}{n-1} \quad \text{და} \quad \lambda_3 = \frac{\sum_{i-1}^{n} K_i\, lg\, K_i}{n-1} \tag{3.13}$$

იმ შემთხვევაში, როდესაც გვაქვს ცნობები ისტორიული მაქსიმუმის შესახებ, რომელიც არ შედის დაკვირვებათა მწკრივში, უზრუნველყოფის მრუდის პარამეტრები გამოითვლება შემდეგის გათვალისწინებით:

ა) უდიდესი დამაჯერებლობის მეთოდის დროს – სტატისტიკების მიხედვით

$$\lambda_2 = \frac{1}{N'}\left(\lg\frac{Q_{N'}}{\overline{Q}} + \frac{N'-1}{n-1}\sum_{i-1}^{n}\lg\frac{Q_i}{\overline{Q}}\right) \tag{3.14}$$

და

$$\lambda_3 = \frac{1}{N'}\left(\frac{Q_{N'}}{\overline{Q}}\lg\frac{Q_{N'}}{\overline{Q}} + \frac{N'-1}{n-1}\sum_{i-1}^{n}\frac{Q_i}{\overline{Q}}\lg\frac{Q_i}{\overline{Q}}\right); \qquad (3.15)$$

ბ) მომენტების მეთოდის დროს – ფორმულებით

$$\overline{Q} = \frac{1}{N'}\left(Q_{N'} + \frac{N'-1}{n-1}\sum_{i-1}^{n}Q_i\right) \qquad (3.16)$$

და

$$C_v = \sqrt{\frac{1}{N'}\left(\frac{Q_{N'}}{\overline{Q}}-1\right)^2 + \frac{N'-1}{n-1}\sum_{i-1}^{n}\left(\frac{Q_i}{\overline{Q}}-1\right)^2}, \qquad (3.17)$$

სადაც Q_N ისტორიული მაქსიმალური ხარჯია; n – დაკვირვებათა წლების რაოდენობა; N' – პერიოდის ხანგრძლივობა, რომლის დროსაც აღინიშნება $Q_{N'}(N > n)$.

მიღებული პარამეტრების მიხედვით აგებენ უზრუნველყოფის თეორიულ მრუდს, რომლის მიხედვით გამოითვლება საანგარიშო მაქსიმალურ ხარჯი:

$$Q_{P\%} = K_{P\%} \cdot \overline{Q_{max}},$$

სადაც $K_{P\%}$ არის მოდულური კოეფიციენტი, რომლის მნიშვნელობასაც აიღებენ კრიცკი მენკელის ცხრილებიდან. I კლასის ნაგებობის დაპროექტებისას მაქსიმალური ხარჯების გაანგარიშებაში შეჰყავთ საგარანტიო შესწორება ΔQ, რომელიც გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$\Delta Q = \frac{a \cdot E_{P\%}}{\sqrt{n}} \cdot Q_{P\%}. \qquad (3.18)$$

$Q_{P\%}$ საანგარიშო უზრუნველყოფის შესაბამისი ხარჯია; a – კოეფიციენტი, რომელიც ახასიათებს მდინარის ჰიდროლოგიურ შესწავლას, იცვლება 1-დან 1,5-მდე; $E_{P\%}$ – ახასიათებს მაქსიმალური ხარჯის გაანგარიშების საშუალო კვადრატულ შეცდომას. აიღება გრაფიკიდან.

საანგარიშო მაქსიმალური ხარჯი

$$Q_{max}^{\text{საანგ}} = Q_{P\%} + \Delta Q.$$

საგარანტიო შესწორება აიღება საანგარიშო მაქსიმალური ხარჯის არაუმეტეს 20%-ზე.

§ 3.5. მაქსიმალური ხარჯების გაანგარიშება ჰიდრომეტრულ დაკვირვებათა არარსებობის შემთხვევაში

ჰიდრომეტრულ დაკვირვებათა არარსებობის შემთხვევაში მაქსიმალური ხარჯების გაანგარიშებისათვის გამოიყენება ემპირიული ფორმულები, რომლებიც მიღებულია ჰიდროლოგიური კვლევების განზოგადების საფუძველზე. მდინარეები იყოფა – ბარის მდინარეებად და მთის მდინარეებად, რომელთა მაქსიმალური ხარჯების ფორმირების პირობები არსებითად განსხვავდება ერთმანეთისაგან. ასევე განსხვავდება თოვლის დნობითა და წვიმებით ჩამოყალიბებული მაქსიმალური ხარჯების ფორმირების პირობები.

თოვლის დნობით გამოწვეული მაქსიმალური ხარჯები ბარის მდინარეებისათვის გამოიანგარიშება შემდეგი ფორმულით:

$$Q_{max\,P\%} = \frac{K_0 h_p F}{(F+1)^n} \delta_1 \delta_2 \mu\,, \qquad (3.19)$$

სადაც F არის მდინარის წყალშემკრები აუზის ფართობი; h_p – წყალმეტობის პერიოდის ჩამონადენის შრის სიმაღლე, რომელიც შეესაბამება საანგარიშო უზრუნველყოფას; K_0–წყალმეტობის შეთანწყობის პარამეტრი; δ_1–კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს მაქსიმალური ხარჯების შემცირებას ტბებისა და წყალსაცავების გავლენით; δ_2–კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს მაქსიმალური ხარჯების შემცირებას ტყეებისა და ჭაობების გავლენით; μ–კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს ჩამონადენის შრისა და მაქსიმალური ხარჯების სტატისტიკური პარამეტრების უთანაბრობას.

ხარჯის მაჩვენებელი n და პარამეტრი K_0 აიღება ცხრილებიდან ბუნებრივი ზონების (რაიონების) და რელიეფის კატეგორიის მიხედვით.

ჩამონადენის შრის სიმაღლის საანგარიშო უზრუნველყოფის შესაბამისი მნიშვნელობა h_p აიღება ჩამონადენის $\bar{h}$ შრის საშუალო სიმაღლის, ვარიაციის კოეფიციენტისა და ასიმეტრიის კოეფიციენტის მიხედვით. h_p-ის მნიშვნელობა აიღება იზოხაზებიანი რუკებიდან. იზოხაზებიანი რუკებიდან აიღება აგრეთვე $\mathbf{C_v}$ ვარიაციის კოეფიციენტის მნიშვნელობა. ასიმეტრიის კოეფიციენტს იღებენ $C_s = 2C_v$-ის ტოლს, საანგარიშო შრის სიმაღლე კი გამოითვლება ფორმულით:

$$h_P = K_P \cdot \bar{h}\,.$$

δ_1 და δ_2 კოეფიციენტები გამოითვლება ემპირიული ფორმულებით, ხოლო μ კოეფიციენტი აიღება ცხრილებიდან გეოგრაფიული ზონისა და საანგარიშო უზრუნველყოფის მიხედვით.

თოვლის დნობით გამოწვეული მაქსიმალური ხარჯი მთის მდინარეებისათვის გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$Q_p = \frac{K_0 h_P F}{(F+1)^{0.15}} \delta_1 \mu . \qquad (3.20)$$

აღნიშვნები ამ ფორმულაში წინა ფორმულის აღნიშვნების ანალოგიურია.

K_0 შეთანწყობის პარამეტრი აიღება სპეციალური ცხრილიდან გეოგრაფიული რაიონის და ამ რაიონის წყალშემკრები აუზის ზღვის დონიდან საშუალო სიმაღლის მიხედვით.

ჩამონადენის შრის სიმაღლე ამ გამოსახულებაშიც სამი პარამეტრის – $\bar{h}$, C_v და C_S-ის მიხედვით გამოითვლება, ხოლო ასიმეტრიის კოეფიციენტი

$$C_S = 3\, C_v.$$

წვიმებით გამოწვეული მაქსიმალური ხარჯების გაანგარიშების მეთოდები შეიძლება დაიყოს ორ ჯგუფად:

1. მაქსიმალური ხარჯების გაანგარიშება რეგიონალური ემპირიული ფორმულების გამოყენებით, რომლებიც ითვალისწინებს მაქსიმალური ხარჯების ფორმირების მთავარ ფაქტორებს განზოგადებული ფორმით და მიღებულია მონაცემების სტატისტიკური დამუშავების გზით.

2. მეთოდები, რომლებიც ეყრდნობა ჩამონადენის გენეტიკურ ფორმულებს, რომლებიც, თავის მხრივ, ასახავს ჩამონადენის ფორმირების პროცესის თეორიულ წარმოდგენას.

რადგან თეორიული განტოლებების მკაცრი მათემატიკური ამონახსნი არ არსებობს, ამიტომ სახელმწიფო სტანდარტების მიხედვით დიდი და საშუალო სიდიდის წყალშემკრები აუზის მდინარეებისათვის რეკომენდებულია ემპირიული რედუქციული ფორმულა, ხოლო მცირე სიდიდის წყალშემკრები აუზის მდინარეებისათვის ჩამონადენის ზღვრული ინტენსიურობის ფორმულა.

ემპირიულ რედუქციულ ფორმულას აქვს შემდეგი სახე:

$$Q_P = M_{200}\left(\frac{200}{F}\right)^n \lambda_p \delta_1 \delta_2 F . \qquad (3.21)$$

M_{200} არის 1%-იანი უზრუნველყოფის მაქსიმალური ხარჯის მოდული, რომელიც დაყვანილია 200 კმ^2 ფართობზე, აიღება რუკებიდან; n –ხარისხის მაჩვენებელი, რომელიც აიღება რუკიდან; λ_p–1%-იანი უზრუნველყოფიდან სხვა უზრუნველყოფაზე გადამყვანი კოეფიციენტი, აიღება ცხრილიდან.

ჩამონადენის გაანგარიშების ზღვრული ინტენსიურობის ფორმულას აქვს შემდეგი სახე:

$$Q_P = A_{1\%}\varphi H_{1\%}\lambda_p\delta_1 F\,, \qquad (3.22)$$

სადაც H_1 არის 1%-იანი უზრუნველყოფის ნალექების შრის სიმაღლე, აიღება რუკიდან; φ –წყალდიდობის ჩამონადენის კოეფიციენტი აიღება ცხრილიდან; $A_{1\%}$ –წვიმის ჩამონადენის მაქსიმალური მოდული, მისი მნიშვნელობა აიღება ცხრილიდან.

§ 3.6. მინიმალური ხარჯების გაანგარიშება

3.6.1. მინიმალური ხარჯების გაანგარიშება ჰიდრომეტრიულ დაკვირვებათა შედეგების არსებობის შემთხვევაში

მინიმალური ხარჯების გაანგარიშება აუცილებელია შეუფერხებელი ელექტრო და წყალმომარაგების უზრუნველყოფისათვის, აგრეთვე მდინარეების გამოყენებისათვის სარწყავად და სანაოსნოდ. მდინარეების წყალმომარაგებისათვის გამოყენების დროს საანგარიშო უზრუნველყოფად აიღება 95%-იანი უზრუნველყოფა; ჰიდროსადგურების დაპროექტებისას ანგარიშობენ 90%-იან უზრუნველყოფის ხარჯს, ხოლო მორწყვისათვის – 85%-იან უზრუნველყოფის ხარჯს. საანგარიშო მინიმალური ხარჯს გამოითვლიან საშუალო თვიური ან საშუალო დღიური ხარჯების მიხედვით.

საშუალო თვიური ხარჯები გამოიყენება იმ შემთხვევაში, როდესაც წყალმცირობის პერიოდი ხანგრძლივია და მდგრადი (იგი გრძელდება არანაკლებ ორ თვეს და ამ პერიოდში არ არის წყალდიდობა).

30-დღიანი საშუალო ხარჯი გამოიყენება იმ შემთხვევაში, როდესაც არის ხანმოკლე წყალმცირობის პერიოდი წყვეტებით. იგი გამოითვლება შემდეგნაირად: წლიური ხარჯების ჰიდროგრაფები აიგება დაკვირვების ყველა წლისთვის. თითოეულ ჰიდროგრაფზე გამოიყოფა უბნები, რომლებიც შეესაბამება 30-დღიან არაკალენდარულ მონაკვეთს მინიმალური ხარჯებით. შემდეგ გამოვთვლით მათ საშუალო მნიშვნელობას.

ჰიდრომეტრიული დაკვირვებების არსებობის შემთხვევაში მინიმალური ხარჯების გაანგარიშება წარმოებს უზრუნველყოფის თეორიული მრუდის გამოყენებით. ამ მრუდის პარამეტრები: საშუალო მინიმალური ხარჯი Q_{0min}, ვარიაციის კოეფიციენტი C_v

და ასიმატრიის კოეფიციენტი C_S გამოითვლება ცნობილი ფორმულებით:

$$Q_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_c}{n}, \quad C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(K_i - 1)^2}{n}}, \quad C_S = \frac{\sum_{i=1}^{n}(K_i - 1)^3}{nC_v^3}.$$

შემდეგ შემოწმდება ამ პარამეტრების სარწმუნოობა ცნობილი მეთოდებით. მინიმალური ხარჯების უზრუნველყოფის თეორიულ მრუდს აგებენ განაწილების ბინომური მრუდის ან სამპარამეტრიანი გამა-განაწილების მრუდების გამოყენებით. უზრუნველყოფის მრუდების მიხედვით განისაზღვრება საანგარიშო უზრუნველყოფის შესაბამისი ორდინატა K_P, შემდეგ მინიმალური ხარჯი.

§ 3.6.2. მინიმალური ხარჯების გაანგარიშება ჰიდრომეტრიული დაკვირვების არარსებობის შემთხვევაში

მცირე მდინარეების მინიმალური ხარჯების ფორმირების პროცესი განსხვავდება საშუალო მდინარეების მინიმალური ხარჯების ფორმირების პროცესისაგან. ამიტომ მათი მინიმალური ხარჯების გაანგარიშების მეთოდები ერთმანეთისაგან განსხვავდება. მდინარეების დაყოფა მცირე და საშუალო მდინარეებად დამოკიდებულია მდინარის გეოგრაფიულ მდებარეობაზე (რაიონზე) და მინიმუმის ტიპზე (ზაფხულის, შემოდგომის და ზამთრის).

სახელმწიფო სტანდარტებში მოცემულია რუკები ევრაზიის ტერიტორიისა და რაიონებისათვის, იქვე წარმოდგენილია მცირე მდინარეების წყალშემკრები აუზის ზღვრული სიდიდეების ცხრილი.

საშუალო მდინარეების საანგარიშო მინიმალური ხარჯები შემდეგნაირად განისაზღვრება: იზოხაზებიანი რუკებიდან განისაზღვრება მინიმალური 30-დღიანი ჩამონადენის 80%-იანი უზრუნველყოფის მოდული წყალშემკრები აუზის ცენტრისათვის ინტერპოლაციით. შემდეგ ეს მოდული გადაჰყავთ 30-დღიან ხარჯში

$$Q_{80\%} = \frac{M_{80\%} F}{1000}, \tag{3.23}$$

სადაც F არის წყალშემკრები აუზის ფართობი.

საანგარიშო უზრუნველყოფის შესაბამისი მინიმალური ხარჯი

$$Q_{minP\%} = Q_{80\%} \cdot \lambda_P,$$

სადაც λ_P გადამყვანი კოეფიციენტია, რომლის მნიშვნელობა აიღება ცხრილებიდან.

მინიმალური 80%-იანი უზრუნველყოფის საშუალო თვიური ხარჯი იმ მდინარეებისათვის, რომლებიც იკვებება ტბებიდან

$$Q_{80\%ტბ} = 0.7Q_{80\%} + 0.26\beta Q_0,$$

სადაც $\mathbf{Q_{80\%}}$ არის ტბიდან გამოსული მდინარის 80%-იანი უზრუნველყოფის 30-დღიანი ხარჯი; β – ტბის ფარდობითი მოცულობა, $\beta = \frac{W_C}{W}$; W_C – ტბის საშუალო მრავალწლიური მოცულობა; W – საშუალო მრავალწლიური ჩანადენი ტბაში.

მცირე მდინარეების 80%-იანი უზრუნველყოფის 30-დღიანი ხარჯი

$$Q_{80\%} = 10^{-3}\alpha(F + f_0)^n.$$

α, f_0 და n პარამეტრები განისაზღვრება გეოგრაფიული რაიონის მიხედვით, ხოლო საანგარიშო უზრუნველყოფის მინიმალური ხარჯი

$$Q_P = Q_{80\%} \cdot \lambda_P.$$

გადამყვანი კოეფიციენტი λ_P მოცემულია ცნობარებში.

მესამე განყოფილება

ჰიდრომეტრია

თავი I. ჰიდრომეტრიის საგანი და ამოცანები

სიტყვა „ჰიდრომეტრია“ ნიშნავს სითხეების გაზომვას (ბერძნულად *νδωρ* – წყალი, *μετρεω* – ვზომავ). ფართო გაგებით, სითხეებს მიეკუთვნება წყალი, ნავთობი, გამდნარი ლითონები,

ქიმიური ხსნარები და სხვა. მაშასადამე, ჰიდრომეტრია, როგორც მეცნიერება, ერთმანეთან აკავშირებს მეცნიერების სრულიად განსხვავებულ დარგებს, სადაც შეისწავლება როგორც სითხეების მოძრაობისა და წონასწორობის პირობები, ისე სხვადასხვა პროცესი; მაგალითად, ნივთიერების გადასვლა მყარი მდგომარეობიდან თხევადში (ყინულის დნობა), თხევადიდან – ორთქლისებრში (აორთქლება) და სხვა.

ჰიდრომეტრია შეისწავლის სითხის მოძრაობისა და მდგომარეობის, წყლის ობიექტების რეჟიმების დამახასიათებელი სიდიდეების განსაზღვრის მეთოდებსა და საშუალებებს.

ჰიდრომეტრიის კვლევის სფეროში შედის სიღრმეების, დონეების, ფსკერისა და ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის, რელიეფის, წნევებისა და დაწნევების, სიჩქარეთა და სითხის დინების მიმართულებების, სიჩქარეების და წნევების პულსაციების, ტალღის ელემენტების, ჰიდრავლიკური ქანობების, სითხის მოცულობითი, წონითი და მასითი ხარჯების, ნაკადის სიმღვრივის, ნატანისა და პულპის ხარჯების, ნაკადის თერმული და ყინულოვანი რეჟიმების მახასიათებელი ელემენტების განსაზღვრა.

ჰიდრომეტრია შეიძლება განვიხილოთ ბუნებაში წყლის შესწავლისა და სხვადასხვა ტექნოლოგიურ პროცესებში, მანქანებსა და აპარატებში სითხეების გამოყენების თვალსაზრისითაც. ტექნიკის განვითარების თანამედროვე ეტაპზე სამრეწველო ჰიდრომეტრია (ავიაციაში, ნავთობის, აირის, კვების მრეწველობაში და სხვა) შეიძლება გამოიყოს დამოუკიდებელ განყოფილებად. ასეთ შემთხვევაში გაზომვას ექვემდებარება ძირითადად დინების სიჩქარე, წნევა და სითხის რაოდენობა (მოცულობა, წონა, მასა).

შედარებით განვითარებულია ბუნებრივი წყლის რესურსების ჰიდრომეტრია. დედამიწის სფეროს წყლებს შეისწავლის ჰიდროლოგია; მასში შედის: 1) ხმელეთის ზედაპირული წყლების ჰიდროლოგია; 2) ჰიდროგეოლოგია (მიწისქვეშა წყლების გეოლოგია); 3) ოკეანოლოგია (ოკეანეებისა და წყლების ჰიდროლოგია); 4) ჰიდრომეტეოროლოგია (მეცნიერება ატმოსფერული წყლის შესახებ).

ზედაპირული წყლების ჰიდროლოგია აერთიანებს პოტამოლოგიას (მეცნიერება მდინარეების შესახებ), გლაციოლოგიას (მეცნიერება მყინვარების შესახებ), ლიმნოლოგიას (ტბათმცოდნეობა) და ტელმატოლოგიას (ჭაობთმცოდნეობა).

ჰიდრომეტრია შედგება:

1) ხმელეთის ზედაპირული წყლების ჰიდრომეტრიისაგან; მასში შედის: ა) სამდინარო ჰიდრომეტრია (პოტატომეტრია), ბ) გლაციომეტრია, გ) ტბის ჰიდრომეტრია (ლიმნომეტრია), დ) ტელმატომეტრია;
2) გეოჰიდრომეტრიისაგან;
3) ზღვის ჰიდრომეტრიისაგან (პარალელური ტერმინებია ოკეანომეტრია, პრაქტიკული ოკეანოლოგია);
4) ჰიდრომეტეორომეტრიისაგან (ნალექებისა და აორთქლების გაზომვა).

იმასთან დაკავშირებით, რომ წყლის მეურნეობის პრობლემების კომპლექსური გადაწყვეტისას პირველ ადგილზე დგას ჩამონადენის რეგულირების საკითხი, განვითარება დაიწყო დარეგულირებული მდინარეების ჰიდრომეტრიამ.

რადგან ჰიდრომეტრიულ სამუშაოთა მიზანი წყლის ობიექტების ჰიდროლოგიური რეჟიმის შესწავლაა, ამიტომ ჰიდრომეტრიას განიხილავენ, როგორც ჰიდროლოგიის ნაწილს.

ჰიდრომეტრია, ჰიდროლოგიის თვალსაზრისით, იყოფა ორ ნაწილად: 1) ჰიდრავლიკური გაზომვები და 2) ჰიდრომეტრია. ორივე ნაწილი ატარებს ჰიდროლოგიური გაზომვების სახელწოდებას. ჰიდრომეტრიას უშუალო კავშირი აქვს მეტროლოგიასთან.

ჰიდრომეტრია არის უფრო ფართო მეცნიერების – ჰიდროლოგიის ნაწილი, რომლის მიზანია წყლის ობიექტების რეჟიმების რაოდენობრივი განსაზღვრის მეთოდებისა და ხელსაწყოების დამუშავება; წყლის ობიექტების ჰიდროლოგიური რეჟიმის სისტემური შესწავლა იმ მიზნით, რომ მივიღოთ წყლის დონის, წყლისა და მყარი ნატანის ჩამონადენის, წყლის ქიმიური შედგენილობის და ტემპერატურის მრავალწლიანი მონაცემები. ეს მონაცემები აუცილებელია ჰიდროლოგიური და წყალსამეურნეო გაანგარიშებების შესასრულებლად, ჰიდროტექნიკური ნაგებობების მშენებლობისა და ექსპლუატაციისათვის.

ჰიდრომეტეოროლოგიური რეჟიმის შესწავლისათვის ჩამოყალიბებულია მუდმივი და დროებითი სადგურებისა და საგუშაგოების ფართო ქსელი და იგეგმება საექსპედიციო სამუშაოები. სადგურებისა და საგუშაგოების სახეობა განაპირობებს მათი მოღვაწეობის სფეროს, ხოლო თანრიგი განაპირობებს დაკვირვებათა სამუშაოების მოცულობას.

სახეობის მიხედვით სადგურები და საგუშაგოები იყოფა მეტეოროლოგიურ, აეროლოგიურ, ჰიდროლოგიურ, ზღვის ჰიდრომე-

ტეოროლოგიურ (სანაპირო), სანაოსნო ჰიდრომეტეოროლოგიურ (გემები) და სპეციალიზებულ სადგურებად და საგუშაგოებად.

სადგურები და საგუშაგოები იყოფა I, II და III თანრიგებად. არსებობს I და II თანრიგის ჰიდროლოგიური სადგურები. I თანრიგის სადგურები შეისწავლის წყლის ობიექტების რეჟიმებს მათი მოქმედების არეალის გარკვეულ უბანზე, ხელმძღვანელობს მათზე მიმაგრებულ II თანრიგის სადგურებს და ჰიდროლოგიურ საგუშაგოებს, ცნობებს აწვდის დაინტერესებულ ორგანიზაციებს და წარმოებებს. II თანრიგის სადგურები აწარმოებს საველე სამუშაოებს, საგუშაგოებზე არსებული დაკვირვებების დამუშავებას.

განასხვავებენ I, II და III თანრიგის სამდინარო ჰიდროლოგიურ საგუშაგოებს.

I თანრიგის საგუშაგო აკვირდება მდინარეში წყლის დონესა და ტემპერატურას, ყინულის წარმოქმნას, ზომავს მდინარის წყლის ხარჯს, ზოგიერთ საგუშაგოზე ტივტივასა და ფსკერული ნატანის ხარჯს, იღებს წყლის სინჯებს სიმღვრივის და ქიმიური შედგენილობის განსაზღვრისათვის.

II თანრიგის საგუშაგო აწარმოებს I თანრიგის საგუშაგოს ყველა სახის სამუშაოს წყლის ხარჯის, ტივტივასა და ფსკერული ნატანის ხარჯის განსაზღვრის გარდა.

III თანრიგის საგუშაგო აწარმოებს დაკვირვებას წყლის დონეზე, ტემპერატურასა და ყინულის წარმოქმნაზე. სამდინარო ჰიდროლოგიური საგუშაგოს გარდა, არსებობს I და II თანრიგის საგუშაგოები ტბებზე. არსებობს აგრეთვე სპეციალიზებული საგუშაგოები:

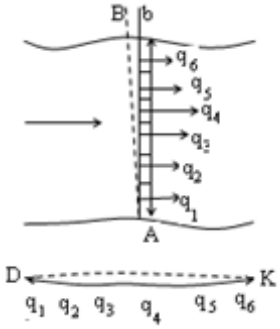
– რომლებიც შეისწავლიან წყლის ბალანსის ფორმირების პროცესს მცირე სიდიდის წყალშემკრებ აუზებზე;
– აგრომეტროლოგიური, რომლებიც შეისწავლიან აგროკლიმატურ პირობებს და მათ გავლენას სასოფლო-სამეურნეო წარმოებაზე;
– შესართავის, რომლებიც შეისწავლიან დიდი მდინარეების შესართავების ჰიდრომეტეოროლოგიურ რეჟიმს და ზღვის მიმდებარე ტერიტორიის რეჟიმს;
– თოვლისა და ზვავების, რომლებიც შეისწავლიან თოვლის საფარს, ზვავების წარმოქმნას და გადაადგილებას;
– ჭაობის, რომლებიც შეისწავლიან მსხვილი ჭაობის მასივების წყლისა და სითბოს რეჟიმს სხვადასხვა ფიზიკურ-გეოგრაფიულ პირობებში.

§ 1.1. ჰიდრომეტრიული კვეთის შერჩევა და მისი აღჭურვილობა

ჰიდრომეტრიული კვეთი ეწოდება მდინარის განივკვეთს, რომელშიც იზომება წყლის ხარჯი. სითხის ხარჯის ზუსტი განსაზღვრისთვის დიდი მნიშვნელობა აქვს ჰიდრომეტრიული კვეთისათვის ადგილის შერჩევას და მისი მიმართულების ზუსტ განსაზღვრას.

ჰიდრომეტრიული კვეთისათვის მდინარის შერჩეული მონაკვეთი, როგორც ჰიდრომეტრიული სადგურისა და საგუშაგოებისათვის შერჩეული მონაკვეთი (უფრო მოსახერხებელია, რომ ჰიდრომეტრიული კვეთი ეწყობოდეს წყალსაზომ სადგურში ან საგუშაგოზე), უნდა აკმაყოფილებდეს შემდეგ პირობებს:

1. მდინარის მონაკვეთი სულ მცირე მისი სამი სიგანის ტოლ მანძილზე უნდა იყოს სწორხაზოვანი და მდინარე უნდა მიედინებოდეს ერთ კალაპოტში, ე.ი. არ უნდა იტოტებოდეს. ნაკადის მოძრაობა უნდა უახლოვდებოდეს პარალელურჭავლიან მოძრაობას.
2. მდინარეს არ უნდა ჰქონდეს ჭალა და, თუ ეს უკანასკნელი გარდაუვალია, უნდა იყოს ვიწრო, გეგმაში სწორხაზოვანი და არ უნდა იყოს დაფარული მცენარეებით.
3. მდინარის კალაპოტი უნდა იყოს მდგრადი (არ ირეცხებოდეს და არ ილექებოდეს), არ უნდა ჰქონდეს კუნძულები (მეჩეჩები) და მნიშვნელოვნად ამობურცული ადგილები, რომლებიც დაარღვევს ჭავლების პარალელურობას, მისი ხორკლიანობა უნდა იყოს ერთგვაროვანი და ჰქონდეს გობისებრი ფორმა. მდინარის ნაპირი არ უნდა იყოს არც ძალიან დამრეცი და არც ძალიან ციცაბო.
4. დაშორებული უნდა იყოს მდინარის შენაკადებიდან და ხელოვნური ნაგებობებიდან არაუმცირეს მდინარის 5 მ სიგანის ტოლ მანძილზე, შეტბორვის თავიდან აცილების მიზნით.
5. მონაკვეთი შეძლებისდაგვარად ახლოს უნდა მდებარეობდეს დასახლებულ პუნქტთან.



ნახ. 1.1. ჰიდრომეტრიული კვეთის მიმართულების განსაზღვრის სქემა

ჰიდრომეტრიული კვეთის მიმართულება ისე უნდა შეირჩეს, რომ მის გასწვრივ მდინარის განივკვეთი იყოს ნაკადის საშუალო

მიმართულების მართობუ-ლი. პატარა მდინარეებისათვის, პირველი მიახლოებით, ჰიდრომეტრიული კვეთის დაკვალვა შეიძლება შესრულ-დეს თვალზომით. კვეთი, რომელიც განკუთვნილია სისტემური გაზომვები-სათვის, საჭიროა დაიკვალოს ზუსტად. ამასთან, მხედველობაში უნდა იქნეს მიღებული ის გარემოება, რომ ცალ-კეული ჭავლების გადახრა კვეთის მართობულობიდან არ უნდა აღემატ-ებოდეს 30°. იმ შემთხვევაში, როდესაც სიჩქარე იზომება შტანგაზე დამაგრებული კომპონენტური ტრიალებით (ГР-21 და სხვა), ჭავლის გადახრა ავტომა-ტურად მიიღება მხედველობაში. ჰიდრომეტრიული კვეთის მიმარ-თულების განსაზღვრის ყველაზე ზუსტი მეთოდია ГР-42 საზომი ხელსაწყოს გამოყენებით მიმართულების განსაზღვრა.

სამუშაოები შესრულდება შემდეგი თანამიმდევრობით:

1. წინასწარ, თვალზომით გატარებულ კვეთზე გავზომავთ სიღრმეებს და მოვნიშნავთ საზომ ვერტიკალებს (ნახ. 1.1).
2. ყველა საზომ ვერტიკალზე გავზომავთ სიჩქარეს $0.6h$ სიღრმეზე. იგი მიიღება, როგორც საშუალო სიჩქარე ვერტიკალზე.
3. გამოვთვლით თითოეულ ვერტიკალზე ელემენტარულ ხარჯს.

$$q = vh\ ,$$

სადაც h არის ნაკადის სიღრმე ვერტიკალზე; v – საშუალო სიჩქარე ვერტიკალზე.

4. ასევე გამოვთვლით თითოეულ ვერტიკალზე ცალკეულ ხარჯებს

$$q_{ც} = qb\ ,$$

სადაც b ორი მეზობელი მონაკვეთის ცენტრებს შორის მანძილია. კიდურა მონაკვეთებისათვის აიღება მანძილი ნაპირიდან პირველ ვერტიკალამდე და დაემატება მომდევნო მონაკვეთის ცენტრამდე მანძილი.

5. მდინარის მონაკვეთის გეგმაზე მასშტაბში გადავზომავთ ცალკეულ ხარჯებს, როგორც ვექტორებს (ნახ. 1.1).
6. მდინარის მარჯვენა ნაპირზე ავიღებთ ნებისმიერ 0 წერტილს და ამ წერტილიდან გეომეტრიულად შევკრიბავთ ცალკეული ხარჯების ვექტორებს. ჯამური ვექტორი იქნება დინების საშუალო მიმართულება, ხოლო მისი მართობული – AB ნახაზზე ჰიდრომეტრიული კვეთი. მას ვამაგრებთ მდგრადი რეპერებით – ძელებით.

ჰიდრომეტრიული კვეთი, ჩვეულებრივ, აღჭურვილია შემდეგი დანადგარებით:

1. თუ წყალსაზომი საგუშაგო და ჰიდრომეტრიული კვეთი ერთმანეთს არ ემთხვევა, მაშინ ეს უკანასკნელი უნდა აღიჭურვოს დონესაზომი ხელსაწყოებით;
2. რეპერებით;
3. მდინარეზე ჰიდრომეტრიული გადასასვლელი საშუალებები, მდინარის სიგანის, მასში წყლის მოძრაობისას სიჩქარისა და სხვა პირობების გათვალისწინებით. გადასასვლელებად გამოიყენება ხიდი, ჰიდრომეტრიული აკვანი, ნავი, კატერი, ბორანი და დისტანციური ჰიდრომეტრული დანადგარი.

ჰიდრომეტრიული კვეთის მიმართულების განსაზღვრა შეიძლება აგრეთვე ზედაპირული ტივტივების საშუალებით.

თავი II. წყლის დონე

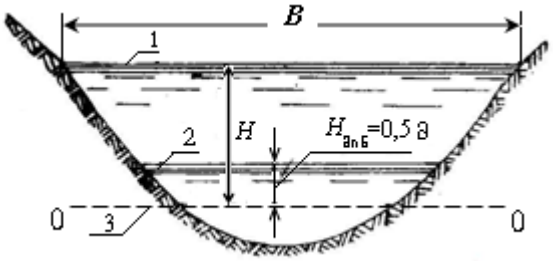
§ 2.1. წყლის დონის გასაზომი ხელსაწყოები და მოწყობილობანი

წყლის დონე ეწოდება წყლის ზედაპირის სიმაღლეს მუდმივი ჰორიზონტალური სიბრტყის მიმართ. საინჟინრო ჰიდროლოგიასა და ჰიდროტექნიკაში წყლის დონეებს, ჩვეულებრივ, აითვლიან აბსოლუტურ ნიშნულებში, რაც მოხერხებულია გეგმის ნატურაში გადატანის თვალსაზრისით.

მდინარეებისა და წყალსაცავების დონეების გაზომვისა და მონაცემების დამუშავებისას (მაგალითად, რაიმე პერიოდში საშუალო დონის გამოთვლისას) მიზანშეწონილია, ეს სიდიდეები გამოისახოს პირობითი ნიშნულებით. ამასთან, ნულოვანი ნიშნულის მქონე მუდმივი სიბრტყის შერჩევას არსებითი მნიშვნელობა აქვს. თუ ასეთ სიბრტყეს გავატარებთ წყლის ყველაზე უდაბლესი ჰორიზონტის ნიშნულზე, მაშინ უმაღლესის დონე ერთდროულად მისი რხევის ამპლიტუდის ზედა ზღვრის გამომსახველიც იქნება. იმისათვის, რომ დავადგინოთ უდაბლესი დონე, აუცილებელია ხანგრძლივი დაკვირვებების ჩატარება. ამიტომ, მუდმივ სიბრტყეს, როგორც წესი, ატარებენ დაკვირვებებით დადგენილი უდაბლესი დონიდან ქვემოთ 0,5 მ-ზე (ნახ. 2.1), რაც H უარყოფით მნიშვნელობას გამორიცხავს. თუ წყლის ობიექტი იყინება, მაშინ დონეს ადგენენ ღრმულებში წყლის ზედაპირის მიხედვით.

წყალსადინარში ან წყალსატევში წყლის დონის განმსაზღვრელ მოწყობილობას წყალსაზომი საგუშაგო ეწოდება. ამ ტერმინს, ჩვეულებრივ, ხმარობენ ჰიდროლოგიასა და ჰიდროტექნიკაში. სამრეწველო დანადგარებსა და აგრეთვე საექსპლუატაციო ჰიდრომეტრიაში იხმარება ტერმინი დონესაზომი. აუცილებელია სისტემატურად შემოწმდეს წყალსაზომი საგუშაგოს საზომ მოწყობილობათა მაღლივი მდებარეობა, რისთვისაც ისინი აღჭურვილია ძირითადი და საკონტროლო რეპერებით. მათ ათავსებენ საგუშაგოს კვეთთან რაც შეიძლება ახლოს, მაგრამ წყალდიდობით გამოწვეული დატბორვის ზონის გარეთ.

პირობით ჰორიზონტალურ სიბრტყეს 3 (ნახ. 2.1), საიდანაც დონეები აითვლება, წყალსაზომი საგუშაგოს გრაფიკის ნული ეწოდება. ასეთი სახელწოდება იმით აიხსნება, რომ დროის მიხედვით დონეების ცვლილების გრაფიკს აგებენ ვერტიკალურ ღერძზე პირობითი დონეების გადაზომვით, ე.ი. კოორდინატთა სისტემის სათავეს ათავსებენ ნულოვან წერტილთან. გრაფიკის ნულის ნიშნული ყოველთვის ცნობილია. მას უმატებენ პირობითი დონეების მნიშვნელობებს და ღებულობენ წყლის ჰორიზონტების აბსოლუტურ ნიშნულებს. წყალსაზომ საგუშაგოებს, რომლებიც მდინარეზე ერთმანეთისგან მნიშვნელოვანი მანძილითაა დაცილებული, გრაფიკის ნულის სხვადასხვა ნიშნული გააჩნია.



ნახ. 2.1. ნაკადის განივკვეთი: 1 – წყლის დონე; 2– უდაბლესი (მინიმალური) დონე; 3 – პირობითი დონე

ერთსა და იმავე ტბაზე ან წყალსაცავზე განლაგებულ საგუშაგოებს, დონეებზე დაკვირვების შედეგებით, ადვილად სარგებლობის მიზნით, ჩვეულებრივ გრაფიკის ნულის ერთნაირი ნიშნულები აქვს. წყალსაცავებზე გრაფიკის ნულს იღებენ

წყალსატევში დამუშავების პრიზმის საპროექტო ნიშნულს ქვემოთ 0,5–1მ-ზე.

წყლის დონეებზე დაკვირვებისათვის საგუშაგოებს აწყობენ სანაოსნო არხებსა და მდინარეებზე, დასახლებული პუნქტების, სამრეწველო საწარმოების, კაშხლების, ჰიდროელექტროსადგურების, რაბების, ნავსადგურების, ხიდებისა და საგზაო მილების ახლოს, ირიგაციული და სამრეწველო დანიშნულების წყალმიმღებ ნაგებობათა განლაგების ადგილებში.

დიდი ყურადღება ეთმობა დონეების გაზომვას ჩამონადენის, ე.ი. წყლის იმ მოცულობის განსაზღვრისას, რომელიც გაედინება მდინარის განივკვეთში დროის გარკვეულ პერიოდში (თვე, წელი და ა.შ.). ასეთ შემთხვევაში სარგებლობენ წყლის დონესა და ხარჯს შორის არსებული ურთიერთკავშირით. დონეს ზომავენ უფრო მარტივად და სწრაფად, ვიდრე წყლის ხარჯს. განუწყვეტლივ ზომავენ დონეს, პერიოდულად ხარჯს, გაანგარიშებებით ადგენენ ხარჯის ცვლილებას დროის მიხედვით, შემდეგ ჩამონადენსაც. სწორედ ესაა მდინარეებზე ჰიდრომეტრიულ სამუშაოთა წარმოების მთავარი მიზანი. გარდა ამისა, ნაკადის სხვადასხვა კვეთში გაზომილი დონეების მიხედვით განსაზღვრავენ ჰიდრავლიკური და ჰიდროლოგიური გაანგარიშებისათვის აუცილებელ სიდიდეს – წყლის ზედაპირის ქანობს.

წყალსაზომი საგუშაგოები დანიშნულების მიხედვით არის:

ძირითადი, რომლის საშუალებითაც სისტემატურად აკვირდებიან დონეებს განმსაზღვრელ პუნქტში;

ჰიდროკვეთური, რომელიც ეწყობა ჰიდრომეტრიულ კვეთში, მათი საშუალებით დონეებს აკვირდებიან მხოლოდ წყლის ხარჯების განსაზღვრის დროს;

ჰიდროპროგნოზული, რომლის საშუალებითაც (ძირითად საგუშაგოსთან ერთად) დაკვირვება მიმდინარეობს ჰიდროლოგიური პროგნოზირების, ე.ი. წყლის რეჟიმის წინასწარმეტყველების მიზნით;

ქანობის გასაზომი, რომელიც საშუალებას იძლევა განისაზღვროს წყალსადინარის ვარდნა, ე.ი. წყლის ზედაპირის ნიშნულების სხვაობა;

სპეციალური დანიშნულების, მაგალითად, კალაპოტშიგა პროცესების, წყლის პერიოდული გაშვებისას წარმოქმნილი ტალღებისა და სხვათა შესასწავლად.

მოქმედების ვადის მიხედვით წყალსაზომი საგუშაგოებია:

მუდმივი, რომლის დანიშნულებაა ხანგრძლივი (სტაციონარული) დაკვირვების წარმოება წყლის დონეებზე.

დროებითი, რომელიც იქმნება კვლევისა და მშენებლობის პერიოდში.

მოძრავი, რომელიც იქმნება საძიებო პარტიების მუშაობის ადგილებში.

დაკვირვებები ზემოთ არსებულ საგუშაგოზე არ წყდება მანამ, სანამ არ შეიქმნება საგუშაგო ქვემოთ, მდინარის დინების გასწვრივ.

კონსტრუქციის მიხედვით არის წყალსაზომი საგუშაგოების შემდეგი ტიპები:

არაგადამცემი, რომლის საშუალებითაც დონეები აითვლება უშუალოდ წყლით დასველებული ლარტყის დანაყოფების მიხედვით: ასეთ ტიპს მიეკუთვნება ლარტყიანი, ხიმინჯიანი და ლარტყხიმინჯიანი საგუშაგოები.

გადამცემი, რომლის საშუალებითაც დონეები აითვლება წყლის თავისუფალი ზედაპირიდან გარკვეულ მანძილზე, ე.ი. დონეთა მდებარეობა ხელსაწყოს მარეგისტრირებელ ნაწილს გადაეცემა გადამწოდის საშუალებით.

გადამცემი საგუშაგო, თავის მხრივ, შემდეგი ტიპისაა: საგუშაგო დონის არაავტომატური აღმნიშვნელით, ავტომატური აღმნიშვნელით, საგუშაგო დონეების უწყვეტი ფიქსირებით. ამ უკანასკნელში დონეები რეგისტრირდება წყლის დონის თვითჩამწერის ანუ ლიმნიგრაფის საშუალებით. გადამცემს მიეკუთვნება აგრეთვე საგუშაგო დისტანციური მოწყობილობით.

§ 2.2. წყალსაზომი საგუშაგოს მოწყობის პრინციპები

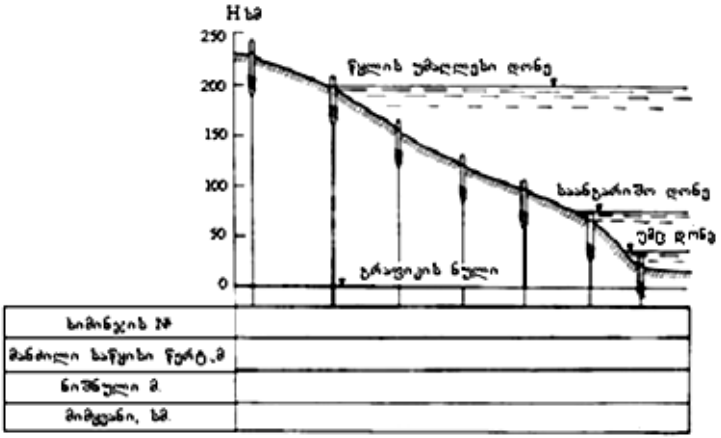
წყალსაზომ საგუშაგოზე წყლის დონეზე დაკვირვება ისე უნდა მოწყოს რომ:

1. ერთსა და იმავე საგუშაგოზე დაკვირვების მასალების შედარება მოსახერხებელი იყოს საგუშაგოს არსებობის მთელ პერიოდში;
2. შესაძლებელი იყოს ერთსა და იმავე ობიექტზე არსებული რამდენიმე საგუშაგოს მონაცემების შედარება.

ეს მოთხოვნები შესაძლებელია შესრულდეს იმ შემთხვევაში, როდესაც ყველა საგუშაგოზე იმუშავებს დაკვირვების ერთიანი სისტემა.

ყოველი წყალსაზომი საგუშაგო უნდა შედგებოდეს: 1) წყალსაზომი მოწყობილობებისაგან (ლარტყა, ხიმინჯი თვითჩამწერი); 2) სიმაღლის მაჩვენებელი მუდმივი ნიშნებით (რეპერები);

წყალსაზომ საგუშაგოზე დაკვირვებული დონეები შეესაბამისობაში უნდა იყოს ე.წ. საგუშაგოს გრაფიკის ნულის სიბრტყესთან, რომლის დონის ნიშნული საგუშაგოს არსებობის მთელ პერიოდში მუდმივია. გრაფიკის ნულის სიბრტყის სიმაღლის მდებარეობა განისაზღვრება ვერტიკალური მანძილით წყალსაზომ საგუშაგოზე არსებული რეპერიდან (ნახ. 2.2) გრაფიკის ნულამდე.



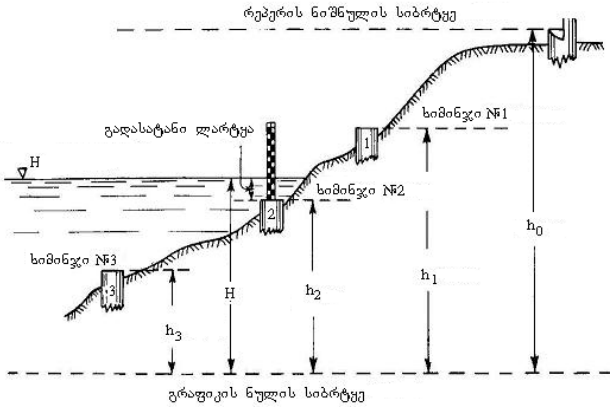
ნახ. 2.2. ხიმინჯის წყალსაზომი საგუშაგოს სქემა

გარდა გრაფიკის ნულისა, წყალსაზომ საგუშაგოზე არსებობს ერთი ან რამდენიმე დაკვირვების ნული. დაკვირვების ნულში იგულისხმება ის სიბრტყე, საიდანაც იზომება წყლის დონის სიმაღლე დაკვირვების დროს. ეს უკანასკნელი განისაზღვრება რეპერის ნიშნულისა და ხიმინჯის თავის (ან ლარტყის ნულის) სიმაღლის სხვაობით.

ლარტყისა და ხიმინჯების თავების ნულის ამაღლებას გრაფიკის ნულიდან მიმყვანი ეწოდება. 2.3 ნახაზზე ლარტყებისათვის მიმყვანები, შესაბამისად, იქნება h_1, h_2, h_3 (სმ).

წყალსაზომ საგუშაგოზე დაკვირვებები შეიძლება დაიწყოს მას შემდეგ, რაც შესრულდება შემდეგი სამუშაოები:

1. დანიშნულია გრაფიკის ნულის ნიშნული;
2. რეპერიან ნიველირებით დადგენილია ხიმინჯის თავების და ლარტყის ნულის ნიშნულები;
3. ყველა ხიმინჯისთვის დადგენილია მიმყვანი (სმ).



ნახ. 2.3. ხიმინჯიანი წყალსაზომი საგუშაგოს ნიშნულებისა და ათვლის სქემა

საგუშაგოზე წყლის დონეზე დაკვირვება:

1. დამკვირვებელი ჩაიწერს ლარტყის ან ხიმინჯის ნომერს, რომელზეც ზომავს წყლის დონეს. ლარტიან საგუშაგოზე ჩაიწერს ლარტყის ანათვალს ან ხიმინჯიან საგუშადოზე საანგარიშო ხიმინჯზე მოთავსებულ გადასატანი ლარტყის ჩვენებას. ჩვენებები ჩაიწერება სმ-ში.

საგუშაგოს, საცნობარო ცხრილიდან განისაზღვრება ხიმინჯის (ლარტყის) ნულის მიმყვანი;

2. გამოითვლება დონის სიმაღლე (სმ-ში), რომელიც ათვლილი სიმაღლისა და მიმყვანის ჯამს უდრის. თუ გვინდა მივიღოთ წყლის დონის აბსოლუტური ნიშნული, გრაფიკის ნულიდან სიმაღლეს უნდა დაემატოს გრაფიკის ნულის აბსოლუტური სიმაღლის ნიშნული.

§ 2.3. წყალსაზომი საგუშაგოების ტიპები

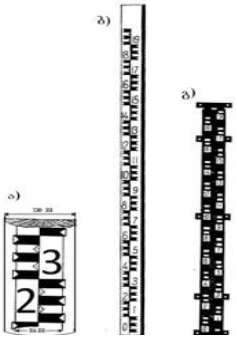
კონსტრუქციის მიხედვით წყალსაზომი საგუშაგოები არის 1) მარტივი (ლარტყიანი, ხიმინჯიანი, შერეული); 2) გადამცემი; 3) თვითჩამწერი; 4) დისტანციური. ეს უკანასკნელი ახდენს დონის რეგისტრაციის უწყვეტად ან გარკვეულ დროში და გადასცემს ინფორმაციას დიდი მანძილზე.

წყალსაზომი ხელსაწყოები უნდა ზომავდნენ დონეს 0.25–0.50მ მაღლა და დაბლა ისტორიულ დონესთან შედარებით, რომელიც

დგინდება ბუნებრივი მნიშვნელობებით (კვლებით) ან ადგილობრივი მოსახლეობის გამოკითხვით;

1) მარტივი წყალსაზომი საგუშაგოები

ა) ლარტყიანი საგუშაგოები ყველაზე იაფი და ყველაზე მარტივი და მოსახერხებელი საგუშაგოა. იგი ეწყობა იმ მდინარეებზე, რომელშიც ნულის დონის ცვალებადობის ამპლიტუდა 2–3 მეტრია. მათ აწყობენ მდინარის იმ მონაკვეთზე, სადაც დაცული იქნება ყინულის სვლისგან, ტალღებისაგან, ხე-ტყის დაცურების დროს და სხვა.

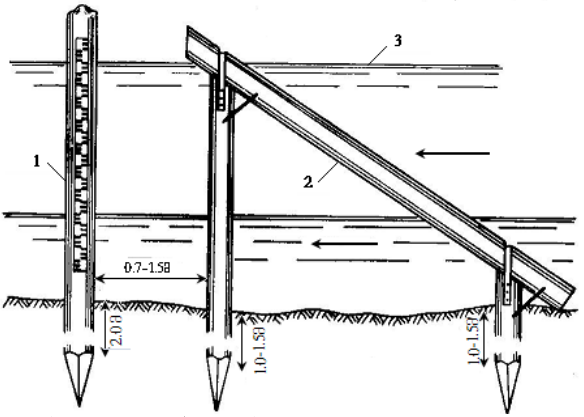


ნახ. 2.4. წყალსაზომი ლარტყები: ა) ხის; ბ) ლითონის ემალირებული; გ) თუჯის

ძირითადი იარაღია წყალსაზომი ლარტყა. ისინი არის ლითონის ემალირებული თუჯის და ხის (ნახ. 2.4). კლდოვან ნაპირებზე, ხიდებსა და ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებაზე ეწყობა ვერტიკალური ლარტყები. ნაგებობების არარსებობის შემთხვევაში ისინი მაგრდება სპეციალურ ხიმინჯზე. დაზიანების თავიდან აცილების მიზნით მათ წინ ეწყობა ე.წ. ყინულის მჭრელი (ნახ. 2.5) ყინულისა და სხვა მცურავი სხეულების ლარტყებისაგან დაცვის მიზნით მდინარის ნაპირზე ეწყობა ე.წ. დახრილი ლარტყები (ნახ. 2.6).

ბ) ხიმინჯებიანი საგუშაგო. ასეთი საგუშაგო ეწყობა დაბლობის მდინარეებზე, რომლებიც დონის ცვალებადობის დიდი ამპლიტუდით ხასიათდება. მათ აწყობენ მდინარის მართობულ ერთ კვეთში. ხიმინჯების რაოდენობას განსაზღვრავს დონის ცვალებადობის ამპლიტუდა და ნაპირის დახრის კუთხე. ყველაზე ზედა ხიმინჯი უნდა იყოს 0.25–0.5მ-ით მაღლა ისტორიულ დონესთან შედარებით, ხოლო ქვედა ხიმინჯი ყველაზე შესაძლო დაბალ დონესთან შედარებით, 0.5მ-ით დაბლა. ორი მეზობელი ხიმინჯის თავებს შორის მანძილი არ უნდა იყოს 0.8 მ-ზე მეტი. ხიმინჯებიანი საგუშაგო აღჭურვილია 220სმ სიმაღლის და 8 სმ დიამეტრის ლითონის ხიმინჯებით, რომლის ბოლო 35 სმ არის ხრახნი, ხოლო ზედა 15 სმ – თავი, რომლის დიამეტრია 10 სმ. თავზე უკეთდება ბრტყელი ჭრილები გასაღებისათვის, რომლითაც ხიმინჯი გრუნტში ჩაიხრახნება. დროებითი ხიმინჯები შეიძლება დავამზადოთ 20–25სმ დიამეტრის ხისგან. სიგრძე განისაზღვრება

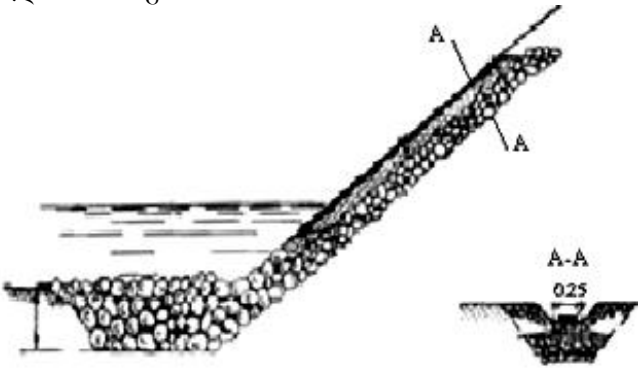
გრუნტის სახეობით, მაგრამ უნდა იყოს არანაკლებ 1.5 მ (ნახ. 2.2).



ნახ. 2.5. ლარტყიანი წყალსაზომი მოწყობილობა:
1 – ხიმინჯზე მიმაგრებული ლარტყა; 2 – ზღუდე,
რომელიც ლარტყას იცავს მცურავი სხეულებისაგან;
3 – მაღალი წყლების დონე

თუ ნაპირი კლდოვანია, მაშინ კედელზე აკეთებენ საფეხურების ამონაკვეთებს. ჰორიზონტალური მოედანი უნდა იყოს არანაკლებ 20×30, მის ცენტრში აწყობენ ლითონის (ჩაცემენტებულ) მანჭვალს.

საგუშაგოს ყველა ხიმინჯი ნიველირებით დაკავშირებულია რეპერთან. წყლის დონე იზომება გადასატანი ლარტყით, რომლის სიგრძეა 100სმ და უკეთდება 1სმ დანაყოფები, მზადდება მსუბუქი ლითონისაგან.



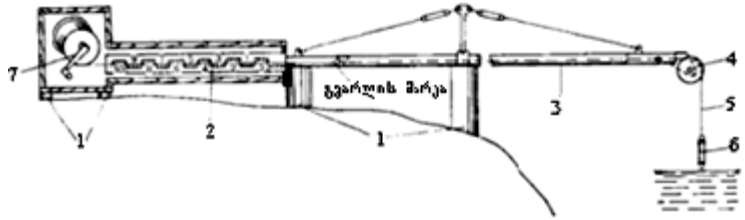
ნახ. 2.6. დახრილი ლარტყის მოწყობის სქემა

გ) შერეული საგუშაგოები. ისინი ლარტყიანი და ხიმინჯიანი ელემენტებია, ეწყობა ისეთ მდინარეებზე, რომლის ფერდობი ხასიათდება ქანობის მკვეთრი გარდატეხით. ფერდობის ციცაბო ნაწილზე ეწყობა ლარტყა, დამრეც ნაწილზე – ხიმინჯი.

2) გადამცემი წყალსაზომი საგუშაგო. გადამცემი საგუშაგო ეწყობა მაშინ, როდესაც მდინარესთან მისასვლელი გართულებულია ვერტიკალური ნაპირების არსებობის გამო. გადამცემი საგუშაგო შეიძლება მოეწყოს ბუნებრივ ნაპირზე ან ჰიდროტექნიკურ ნაგებობაზე. ადგილობრივი პირობებიდან გამომდინარე, არსებობს სხვადასხვა სახის საგუშაგო.

სახიდე საგუშაგო. თუ საგუშაგოს ადგილზე არის ხიდი, მაშინ მასზე აკეთებენ მუდმივ წერტილს (დაკვირვების ნული, რომლის აბსოლუტურ სიმაღლეს განსაზღვრავენ ნიველირით. დაკვირვება გულისხმობს ამ წერტილსა და სითხის დონეს შორის ვერტიკალური მანძილის გაზომვას. შეიძლება ჩატარდეს დანაყოფებიანი გვარლით, ლარტყით ან ლითონის დანაყოფებიანი სახელურით.

გვარლური საგუშაგო. ასეთი საგუშაგო ეწყობა მთის მდინარეზე, როდესაც არ გვაქვს ჰიდროტექნიკური ნაგებობა, ხოლო ნაპირი ციცაბოა. საგუშაგოს ძირითადი ნაწილია ნაშვერი (ნახ. 2.7). ნაშვერი კეთდება ხის მკვრივი ჯიშის ძელისგან ან ფოლადის მილისგან. მყარად მაგრდება ნაპირზე. მილის (ძელის) სანაპირო ზოლში უძრავად მაგრდება 1მ სიგრძის ჰორიზონტალური წყალსაზომი ლარტყა, რომლის ნულოვანი დანაყოფი მიმართულია მდინარისაკენ, გამონაშვერის ბოლოში მოწყობილია



ნახ. 2.7. გადამცემი საგუშაგოს სქემა
1. ხიმინჯი; 2. ლარტყა; 3. შვერილი; 4. ბლოკი; 5. გვარლი; 6. ტვირთი

ბლოკი (ჭოჭონაქი), ხოლო იმ ბოლოზე რომელიც ნაპირზე მდებარეობს მოწყობილია კოჭი. მასზე დახვეულია დრეკადი გვარლი. გვარლის ბოლოს ჩამოკიდებულია ცილინდრული ტვირთი კონუსური ბოლოთ. ტვირთის წონა – 2–5კგ. გვარლს

აქვს დანაყოფები ყოველ 1მ-ზე. წინასწარ აკეთებენ საგუშაგოს ტარირებას იმისათვის, რომ გვარლზე ათვლილი დონეები მოცემულ იქნეს უშუალოდ საგუშაგოს ნულიდან. შემდეგ ტვირთს უშვებენ წყალში, ხოლო ლარტყას შვერილზე მიიყვანენ გვარლის უახლოეს დანაყოფთან ისე, რომ მასზე ათვლილი სმ-ები უდრიდეს გრაფიკის ნულის მომატებული დონეების მნიშვნელობას. სიზუსტე 2–3 სმ-ს უდრის, მაგრამ ელექტროკონტექსტის გამოყენებისას სიზუსტე 1სმ-მდე იზრდება.

3) თვითჩამწერი საგუშაგოები

თვითჩამწერი წყალსაზომი საგუშაგოები უწყვეტად ჩაიწერს წყლის დონის ცვალებადობას. მის ძირითადი ნაწილია თვითჩამწერი ხელსაწყო. არსებობს მრავალი ტიპის თვითჩამწერი, ისინი შედგება ორი ძირითადი ელემენტისაგან: დონის გადამწოდისა და ჩამწერი მოწყობილობებისაგან.

დონის გადამწოდი შეიძლება იყოს ტივტივიანი, მანომეტრული და სხვა. ტივტივიანი დღეისათვის ყველაზე გავრცელებული სახეობაა.

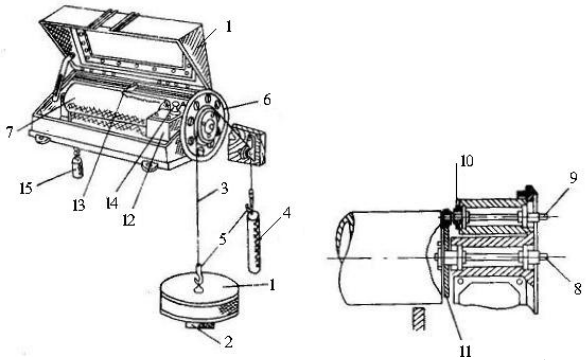
ჩამწერი მოწყობილობა აწარმოებს ჩაწერას გრაფიკის სახით ლენტაზე. ჩაწერის მასშტაბი შეირჩევა დონის ამპლიტუდაზე დამოკიდებულებით და სიზუსტის მოთხოვნილების მიხედვით. დონის თვითჩამწერი მექანიზმები მოქმედებაში მოდის ზამბარებით, საათის მექანიზმით.

ქაღალდის ლენტა, რომელზეც ჩაიწერება დონის ცვალებადობა, ეხვევა დოლზე. დოლი მოძრაობს საათის მექანიზმით ან დონის ცვალებადობით, რომელიც გადაეცემა ბარაბანს ბაგირზე გადაკიდებული ტვირთით. ამ შემთხვევაში დოლი ერთი მიმართულებით ბრუნავს დონის აწევის დროს და მეორე მიმართულებით დაწევის დროს.

ჩამწერი მოწყობილობა საათის მექანიზმის და მბრუნავი დოლის საშუალებით მოდის მოძრაობაში. ურიკა კალმით მოძრაობს ერთი მიმართულებით დოლის გასწვრივ, საათის მექანიზმის მოქმედებით ხანგრძლივი მოქმედების თვითჩამწერზე აყენებენ ორ დოლს, რომელიც მოწყობილია ისე, რომ ქაღალდი ერთი დოლიდან გადაეხვევა მეორეზე.

არსებობს მრავალი ტიპის წყლის დონეების თვითჩამწერები. ჰიდრომეტეოროლოგიურ სამსახურში უფრო მეტად გავრცელებულია „ვალდაის“ ტიპის დონის თვითჩამწერი (ნახ. 2.8). თვითჩამწერის მიმღებ-გადამწოდი სისტემა შედგება 250 მმ დიამეტრის ლითონის ტივტივისაგან (1); (2) ტივტივა ჩამოკიდებულია რბილ მოქნილ გვარლზე (3), რომლის საპირისპირო

ბოლოზე მიბმულია 1,4 კგ ტვირთი; (4) ტივტივა და ტვირთი გვარლზე მაგრდება სპეციალური დამჭერით, გვარლი გადაეცემა ხელსაწყოს ბორბალზე (6), რომელიც წარმოადგენს 2 ერთად შედუღებული ლითონის დისკი. მცირე დისკის გარშემოწერილობის სიგრძეა 300მმ, დიდის – 600მმ. მიმღებ-გადამწოდ სისტემას წყლის დონის რყევის დროს ბრუნვაში მოჰყავს თვითჩამწერის დოლი (7). ეს სისტემა უზრუნველყოფს დონის ჩაწერის სასურველი მასშტაბის შერჩევას.



ნახ. 2.8. „ვალდაის“ ტიპის დონის თვითჩამწერი

თვითჩამწერი მოწყობილობა შედგება დოლისგან (7), საათის მექანიზმისა (12), და კალმიანი ურიკისგან (13), რომელიც ცოცავს დოლის გასწვრივ ლითონის ორ ღერძზე, დოლი ბრუნავს მოძრავ ცენტრზე, რომელიც მიკრულია კორპუსის მარცხენა მხარეზე და ტივტივის ბორბლის ძირითად ღერძზე (8), რომელიც დამაგრებულია კორპუსის მარჯვენა გვერდზე.

საათის მექანიზმი (12) მოთავსებულია ტენშეუდწევ კორპუსში. ის მოქმედებს წონითი მოსამართით: ზედა სახურავზე მოთავსებულია მოსამართი თავი (14) და ორი მოსამართი ბერკეტით. ერთი მათგანი ВКЛ ინდექსით ემსახურება საათის მექანიზმის გაშვებას, ხოლო მეორე ინდექსი П საათის სვლის მიმცემის У სვლის შენელებას.

ურიკა კალმით გადაადგილდება დოლის გასწვრივ საათის მექნიზმის ძალით, რომელიც გადაეცემა ურიკას ფოლადის სიმძიმის საშუალებით, რომლის ერთი ბოლო და მოსამართი დახვეულია თავის დოლზე, მეორე ბოლოზე კი ჩამოკიდებულია 0.9 კგ საწონი. (15) ურიკა მიმაგრებულია სიმთან მომჭერი ხრახნის საშუალებით და საათის მექანიზმის მომართვის შემდეგ

შეიძლება გადავაადგილოთ და დავამაგროთ საჭირო საწყის მდგომარეობაში.

4) დისტანციური წყალსაზომი საგუშაგოები

დისტანციურ წყალსაზომ საგუშაგოებს ძალიან დიდი მნიშვნელობა აქვს დისპეტჩერული სამსახურისათვის ჰიდროელექტროსადგურებზე, რაბებზე, დიდ წყალსაცავებში, სარწყავ სისტემებზე და მცირედ დასახლებული რაიონებისათვის. ამ ტიპის საგუშაგოებზე ეწყობა ისეთი ხელსაწყოები, რომლებიც დონეების სიმაღლეს ავტომატურად გადასცემენ შორ მანძილზე დანიშნულ ვადებში ან განუწყვეტლივ.

გადაცემა ხორციელდება მექანიკური მოწყობილობების საშუალებით, ელექტროგადამცემი კავშირით ან რადიოთი.

ამ ტიპის ხელსაწყოების ძირითადი კვანძებია: 1) გადამწოდი (გასაზომი დონეების საზომი და გარდამქმნელი ხელსაწყოები); 2) საზრდოობის წყარო, 3) კავშირის არხი, 4) რეგისტრირებული დონის მიმღები მოწყობილობები. ამ უკანასკნელს მიეკუთვნება დისტანციური დონსაზომი. მისი დანიშნულებაა შორ მანძილზე გადმოცემული წყლის დონის რეგისტრაცია და მისი თვითჩამწერის ბაფთაზე ჩაწერა. იგი ძირითადად ორი ნაწილისაგან შედგება; დონის რყევის მიმღებისა და დონის აღმრიცხველი თვითმწერისაგან, რომლებიც ერთმანეთთან შეერთებულია გამტარებით.

§ 2.4. მოწყობილობა და ხელსაწყოები მაქსიმალური და მინიმალური დონეების რეგისტრაციისათვის

ჩვეულებრივ წყალსაზომ საგუშაგოზე წყლის დონეზე დაკვირვება სწარმოებს დღე-ღამეში ორჯერ (8სთ-ზე და 20სთ-ზე), მაშინ, როდესაც დონეები განუწყვეტელ და სწრაფ ცვალებადობას განიცდის, შეიძლება ამ საათებში არ დაფიქსირდეს მაქსიმალური და მინიმალური დონეები. მათი ცოდნა კი აუცილებელია დონეთა ცვალებადობის ფარგლების დადგენისათვის. მაქსიმალური და მინიმალური დონეების დაფიქსირებისათვის გამოიყენება მაქსიმალური და მინიმალური ლარტყები.

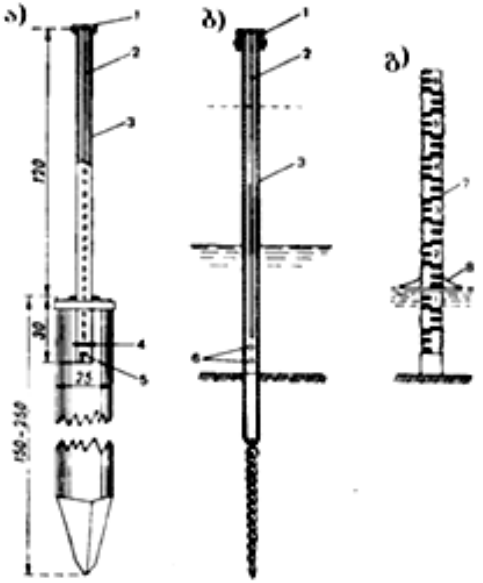
ა) მაქსიმალური ლარტა ფოლადის მილში და ხიმინჯზე (ნახ. 2.9) არის 5სმ დიამეტრის მილი, რომელიც მყარადაა დამაგრებული ხიმინჯზე. მილს ქვედა ნაწილში უკეთდება ხვრეტები წყლის შესასვლელად. მილში მოთავსებულია 1სმ დიამეტრის ღეროს 1სმ-იანი დანაყოფით. წყალში ჩაშვებამდე ღეროს ფარავენ წყალში ხსნადი ცარცით. მაქსიმალური დონე

განისაზღვრება ცარცის გარეცხვის სიმაღლით. ღეროს თავი ნიველირებით უნდა დავუკავშიროთ საგუშაგოზე არსებულ რეპერის ნიშნულს.

ბ) ლითონის ლარტყა ხრახნული ბოლოთი (ნახ. 2.9, ბ). იგი დიდად არ განსხვავდება ზემოთ აღწერილი ლარტყისაგან. განსხვავება იმაშია, რომ ის ხიმინჯზე კი არ მაგრდება, არამედ ჩაიხრახნება გრუნტში 0.75მ სიღრმეზე. შემდეგ ნიველირებით უნდა განისაზღვროს მისი თავის ნიშნული და დაკვირვების ნულის ნიშნული (მიმყვანი).

გ) ფლოროვის კბილებიანი ლარტყა (ნახ. 2.9, გ) მისი დანიშნულება მინიმალური დონის რეგისტრაცია. კბილებიან ლარტყაზე ზამბარით ჩამოცმულია ტივტივა. წყლის დონის დაწევის შემთხვევაში ტივტივა ჩადის ქვევით, მაგრამ წყლის დონის მაღლა აწევის დროს ტივტივა ზამბარის გამო ჯდება ე.წ. კბილებში და ვერ ადის მაღლა. ამრიგად, ფიქსირდება მინიმალური დონე.

შევნიშნოთ, რომ ავტომატური თვითჩამწერი ხელსაწყოები გაცილებით ზუსტად აფიქსირებს მინიმალურ და მაქსიმალურ დონეებს.



ნახ. 2.9. მაქსიმალური და მინიმალური ლარტყების ტიპები: ა) და ბ) მაქსიმალური; გ) მინიმალური

თავი III. სიღრმის გაზომვა

მდინარის სიღრმის გაზომვა იმ ჰიდრომეტრიულ სამუშაოთა კომპლექსის ერთ-ერთი შემადგენელი ნაწილია, რომლის მიზანიცაა წყლისა და მყარი ნატანის ხარჯის გაზომვა. გარდა ამისა, მას დამოუკიდებელი მნიშვნელობაც აქვს კალაპოტის დეფორმაციის დადგენისა და გემთსავალი ტრასის შერჩევისათვის. მდინარის სიღრმე ეწოდება ვერტიკალურ მანძილს სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან ფსკერამდე ან მანძილს ცოცხალ კვეთში სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან ფსკერამდე. სწორედ ეს უკანასკნელი წარმოადგენს თეორიულ სიღრმეს. თუ მდინარის კალაპოტის ქანობი არ აღემატება 10°-ს, მაშინ სხვაობა ამ ორ სიღრმეს შორის მხოლოდ 1,5%-ს შეადგენს. ეს უკანასკნელი კი დასაშვებია, რადგან თვით სიღრმის გაზომვის თანამედროვე მეთოდების სიზუსტეც დაახლოებით ამ ფარგლებშია, ამიტომ ჰიდრომეტრიაში მდინარის სიღრმედ მიღებულია ვერტიკალური მანძილი სითხის თავისუფალ ზედაპირსა და ფსკერს შორის.

არსებობს სიღრმის საზომი მრავალი მეთოდი და ხელსაწყო. მოკლედ განვიხილავთ მხოლოდ იმათ, რომლებიც დღეისათვის გამოიყენება ჰიდრომეტრიულ პრაქტიკაში.

ჰიდრომეტრიული შტანგა ყველაზე მარტივი და გავრცელებული ხელსაწყოა. იგი წრიული კვეთის ხის ძელია, დიამეტრით 4–5სმ და სიგრძით 5–7მ; მას ქვედა ბოლოზე უკეთებენ ლითონის ბუნიკს, რომელიც თავისი წონით (1კგ.) საშუალებას აძლევს შტანგას წყალში ჩაიძიროს და ამავე დროს იცავს დაზიანებისაგან. შტანგას უკეთდება 10სმ-იანი დანაყოფები, რომლებსაც ღებავენ მონაცვლეობით თეთრ და წითელ ფერებად. შტანგით სიღრმის გაზომვის სიზუსტე 2–5სმ-ის ფარგლებშია. სიზუსტე საერთოდ დამოკიდებულია დინების სიჩქარეზე, ტალღების არსებობაზე და სხვა. ლარტყა გამოიყენება პატარა სიღრმის მდინარეებზე. ანალოგიურ პირობებში შეიძლება გამოიყენონ ჰიდრომეტრიული ტრიალას შტანგაც.

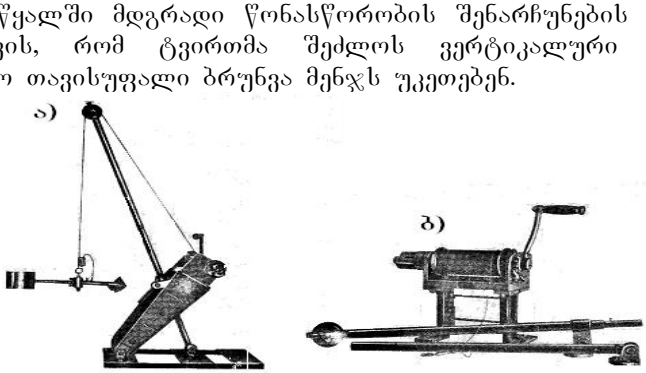
ხელის საძირავი ხელსაწყო ლოტი არის ლითონის ტვირთი (ნახ. 3.1), რომელსაც ზედა ბოლოზე უკეთდება ნახვრეტი კაპრონის ზონარის ან ლითონის გვარლის დასამაგრებლად. გვარლს აქვს დანაყოფები მეტრებსა და დეციმეტრებში. სტანდარტული საძირავის წონაა

ნახ. 3.1. ჰიდრომეტრიული ლოტი

4,5კგ, დიამეტრი 56 მმ და სიგრძე – 355 მმ. გამოიყენება მდინარეებში 25მ-მდე სიღრმის გასაზომად, ხოლო წყალსაცავებში მისი საშუალებით შეიძლება გაიზომოს 100 მეტრამდე სიღრმე.

მექანიკური საძირავი შედგება სამი ძირითადი ნაწილისაგან: ჯალამბარი, რომელიც აღჭურვილია მრიცხველით; ლითონის გვარლი, რომლის საშუალებითაც ხდება ტვირთის ჩაშვება და ამოღება. ჯალამბარი და ტვირთი გამოიყენება როგორც სიღრმის, ისე სიჩქარის გასაზომად, პირველ შემთხვევაში მისი საშუალებით ხდება გვარლის ჩაშვება ტვირთით, მეორე შემთხვევაში სიჩქარის საზომი ხელსაწყოების ჩაშვება. ჯალამბარზე დამაგრებული მრიცხველი ახდენს წყალში ჩაშვებული გვარლის სიგრძის აღრიცხვას 1 სმ სიზუსტით.

ყველაზე ფართოდ არის გავრცელებული ჯალამბრები „ნევა“ და „ლუგა“ (ნახ. 3.2). ტვირთვის ჩასაშვები გვარლი შედის ჯალამბრის კომპლექსში. იგი დამზადებულია 2,2–3,0 მმ დიამეტრის და 22მ სიგრძის ფოლადისაგან. ტვირთს აძლევენ გარსშემომდენის ფორმას. ბოლოში ამაგრებენ მიმმართველ სტაბილიზატორს წყალში მდგრადი წონასწორობის შენარჩუნების მიზნით. იმისათვის, რომ ტვირთმა შეძლოს ვერტიკალური ღერძის გარშემო თავისუფალი ბრუნვა მენჯს უკეთებენ.



ნახ. 3.2. ჰიდროლოგიური ჯალამბარი
ა) “ნევა” ბ) “ლუგა”

სტანდარტული ტვირთის წონა 5-დან 100 კგ-მდე იცვლება.

თანამედროვე პირობებში ყველაზე ფართოდ იყენებენ საზომ ექოლოტებს, ისინი ხასიათდება მაღალი სიზუსტით და სწრაფქმედებით. მათი მოქმედების პრინციპი იმაში მდგომარეობს, რომ ვიბრატორ-გამომსხივებლიდან გაგზავნილი ულტრაბგერა აირეკლება მდინარის ფსკერზე და არეკვლილ იმპულსს მიიღებს მიმღები ვიბრატორი. დრო, რომელსაც უტრაბგერის იმპულსი ანდომებს მდინარის ფსკერამდე ჩასვლას და არეკვლის შედეგად

უკან ამოსვლას, დამოკიდებულია მდინარის სიღრმეზე. გარდა ამისა, წყალში ულტრაბგერის გავრცელების სიჩქარე დამოკიდებულია წყლის ტემპერატურასა და მარილიანობაზე. მათი გათვალისწინებით ყოველი ცდის წინ ტარდება ექოლოტის ტარირება საველე პირობებში, რომლის დროსაც ავტომატურად ხორციელდება ჩვენების კორექტიება ტემპერატურისა და მარილიანობის გათვალისწინებით. ტარირება ტარდება, ექოლიტის ტიპის, შესაბამისად, ქარხნის მიერ თანდართული ინსტრუქციის მიხედვით. ექოლოტების საშუალებით შეიძლება გაიზომოს სიღრმეები 0.2–20მ სიღრმის დიაპაზონში.

სიღრმე იზომება ერთ-ერთი ზემოხსენებული ხელსაწყოთი. საზომი წერტილების კოორდინატები განისაზღვრება სხვადასხვა მეთოდით. დასახული მიზნებისა და სიზუსტის მიხედვით და ადგილობრივი პირობების მიხედვით გასაზომი სვლები განლაგდება:

1) განივი პროფილების მიხედვით;
2) გრძივი პროფილების მიხედვით;
3) ირიბი პროფილების მიხედვით;
4) შერეული მეთოდით.

განივი პროფილების მიხედვით, სიღრმის გაზომვები საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ გასაზომი წერტილების მდებარეობა და დეტალურად გავზომოთ სიღრმეები წინასწარ დადგენილი მიმართულებით. ამისათვის, მდინარის ერთ-ერთ ნაპირზე გაიყვანენ და რეპერებით დაამაგრებენ მაგისტრალს. განივკვეთებს დანიშნავენ მაგისტრალის მართობულად და ამაგრებენ პალოებით. განივკვეთები 100 მეტრამდე სიგანის მდინარეში დაინიშნება სიგანის 1/2 ან 1/3 მანძილზე, ხოლო 1000 მ-მდე სიგანის დროს სიგანის ან 1/3 ან 1/4 მანძილზე. 50 მეტრამდე სიგანის მდინარისათვის იღებენ 20–30 წერტილს, 1000 მეტრამდე სიგანის მდინარისათვის 40–50 წერტილს. ამ მეთოდის ნაკლია შრომატევადობა.

თუ ჰიდრომეტრიულ კვეთზე მოწყობილია ხიდი ან აკვანი, მაშინ სიღრმეების გაზომვა გამარტივებულია. ამისათვის ხიდის გასწვრივ გაჭიმავენ ფოლადის ბაფთას და მონიშნავენ საზომ წერტილებს. სიღრმეები იზომება ლარტყით, შტანგით ან დანაყოფებიანი ლარტყით. თუ კვეთი აღჭურვილია ჰიდრომეტრიული აკვნით, მაშინ იმ გვარლის პარალელურად, რომელზეც გადაადგილდება აკვანი, გაჭიმავენ 2.5–3.0მმ დიამეტრის საზომ გვარლს, რომელზეც მონიშნავენ წერტილებს, საიდანაც სიღრმე გაიზომება ლატანით ან მექანიკური საძირავით.

ნავიდან სიღრმის გაზომვები გვარლის საშუალებით. 200–300მ სიგანის მდინარის შემთხვევაში, თუ წყლის სიჩქარე 1.5მ/წმ-ია, სიღრმის გაზომვა წარმოებს გაჭიმული გვარლის გასწვრივ მოძრავი ნავიდან. ამ დროს განივკვეთზე ჭიმავენ 3–5მმ დიამეტრის გვარლს, რომელიც დაყოფილია ყოველ 2–5მ-ზე. გვარლის ერთ ბოლოს ამაგრებენ ნაპირზე, მეორე ბოლოს ჭიმავენ მოპირდაპირე ნაპირზე ხელით ან ჯალამბრით. თუ მდინარის სიგანე 100მ-ზე მეტია, მდინარის შუაში აჩერებენ ნავს, ღუზაზე გაჭიმული გვარლი თავისი სიმძიმით ჩაღუნვისგან რომ დაიცვან. გვარლი გაჭიმული უნდა იყოს ისე მაგრად, რომ მდინარის სიგანესა და გვარლის სიგრძეს შორის სხვაობა 2%-ზე მეტი არ იყოს. გამზომი ნავი გადაადგილდება გაჭიმული გვარლის გასწვრივ და გამზომი ტექნიკოსი აწარმოებს სიღრმეების გაზომვას გვარლზე მონიშნული ადგილების მიხედვით.

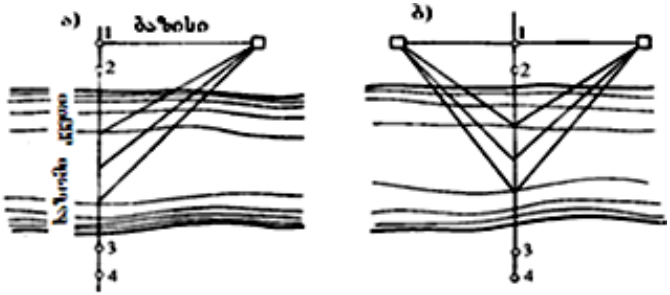
განივკვეთის პროფილების გაზომვები ნაპირიდან დანიშვნის მიხედვით

მდინარეზე, რომლის სიგანე 200–300მ აღემატება, პროფილზე გასაზომი წერტილების მდებარეობას განსაზღვრავენ დანიშვნით ნაპირებიდან მენზულით, კიპრეგელით (თეოდოლიტით) ან ნავიდან სექტანტით.

თუ მდინარე 300მ-მდე სიგანისაა, ამ შემთხვევაში კვეთის ნიშნები შეიძლება ერთ ნაპირზე დავაყენოთ, ხოლო თუ 500მ-ზე მეტი სიგანისაა, მაშინ კვეთის ნიშნებს ორივე ნაპირზე აყენებენ. კვეთის ნიშნების ფორმა და ზომები დამოკიდებულია მდინარის სიგანეზე. 300 მ სიგანის მდინარეზე კვეთის ნიშნებად იყენებენ ლატანებს ფერადი ალმით, ხოლო დიდი სიგანის მდინარეზე 3–5 ლატანზე მიმაგრებული ფანერების ან მსუბუქი ფიცრების ფარებით.

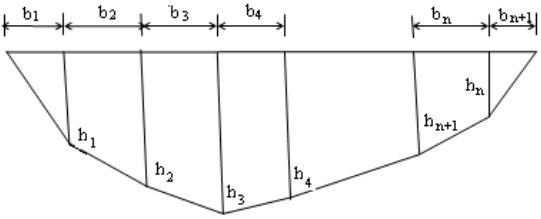
გაზომვები ნაპირიდან დანიშვნით. ერთი კუთხესაზომი ინსტრუმენტით, გაზომვის დანიშვნის დროს, პირველად შეარჩევენ გასაზომ მონაკვეთს და დაამაგრებენ კვეთის ნიშნებით. შემდეგ ერთ ნაპირზე, მდინარის გასწვრივ მონიშნავენ ბაზისს (ნახ. 3.3). ერთ ბოლოში აყენებენ კუთხესაზომ ინსტრუმენტს იმ ანგარიშით, რომ უშორეს წერტილში წარმოქმნილი კუთხე დამიზნების სხივსა და განივკვეთის მიმართულებას შორის არ იყოს 30°-ზე ნაკლები.

პირველად, თითოეულ განივკვეთზე განსაზღვრავენ მდინარის სიგანეს, რისთვისაც სანიველირო ლარტყას აყენებენ მდინარის ორივე ნაპირზე. წყლის კიდეებთან მენზულისტი იღებს ნიშნულებს ლარტყიდან, ხოლო მანძილსაზომით განისაზღვრება



ნახ. 3.3. საზომი წერტილების მონიშვნა კვეთში
ა) ხელსაწყოთი 1; ბ) ხელსაწყოთი 2

მანძილი ინსტრუმენტიდან წყლის კიდეებამდე. გაზომვის შედეგებით დაიტანენ განივკვეთის მდებარეობის პლანშეტზე. თუ ადგილობრივი პირობები მდინარესთან რთულია, მაშინ გამოიყენება ორი ინსტრუმენტი. ამ დროს კუთხესაზომს აყენებენ ბაზისის ბოლო წერტილებზე (ნახ. 3.4).



ნახ. 3.4. მდინარის განივკვეთის ფართობისა და სველი პერიმეტრის საანგარიშო სქემა

გასაზომი წერტილების დანიშვნა შეიძლება ჩატარდეს ორნაირად: ერთ შემთხვევაში გამზომი დანიშვნას იწყებს ნავიდან გაცემული სიგნალის შემდეგ, ხოლო მეორე შემთხვევაში მენზულისტის მიერ გაცემული სიგნალის შემდეგ.

გაზომვის დანიშვნები სექტანტით. ნაკლებად მისადგომ ნაპირებიან განიერ მდინარეებზე გასაზომი წერტილების დანიშვნისთვის მოხერხებულია სექტანტის გამოყენება. დანიშვნები წარმოებს ნავიდან. კვეთზე გასაზომი წერტილების მდებარეობას განსაზღვრავენ კუთხით, რომელიც წარმოიქმნება გასაზომი კვეთის ხაზის მიმართულებასა და ნაპირზე არსებული ორიენტირის მიმართულებას შორის. ორიენტად შეიძლება გამოვიყენოთ სარყე ან სხვა რაიმე საგანი. დაკვირვების წერტილის მდება-

რეობა შეირჩევა ადგილზე, რომელიც კარგად გამოჩნდება რამდენიმე პროფილიდან. განისაზღვრება მისი მდებარეობა გეგმაზე.

სიღრმეების გაზომვის შედეგები გამოიყენება განივი პროფილის ასაგებად და კალაპოტის მორფომეტრიული მახასიათებლების გამოსაანგარიშებლად.

ვსაზღვრავთ მეზობელ ვერტიკალებს შორის საშუალო სიღრმეებს $\frac{h_1+h_2}{2}, \frac{h_2+h_3}{2}, \cdots \frac{h_{1n-1}+h_n}{2}$ და ვერტიკალებს შორის მანძილებს $b_1, b_2 \cdots b_{n+1}$. რადგან ვერტიკალებს შორის მანძილი მცირეა, შეგვიძლია მივიღოთ, რომ ვერტიკალებს შორის მდინარის ფსკერი იცვლება სწორხაზოვნად. აქედან გამომდინარე, საანგარიშო ვერტიკალებს შორის ფართობი შეიძლება გამოვთვალოთ, როგორც სამკუთხედისა და ტრაპეციის ფართობები, როგორც 3.4 ნახაზზეა ნაჩვენები, შემდეგი ფორმულებით:

$$F_1 = \frac{h_1+b_1}{2}; = F_2 \frac{h_{n-1}+h_n}{2} h_n; F_{n+1} = \frac{h_n+h_{n+1}}{2} h_n.$$

მდინარის განივკვეთის საერთო ფართობი გამოითვლება ფორმულით:

$$F = \frac{h_1 b_1}{2} + \frac{h_2 h_2}{2} b_2 + \ldots + \frac{h_{n-1} h_n}{2} b_n + \frac{h_{n+1} h_n}{2} b_n.$$

ზემოთ აღწერილი მეთოდი მდინარის განივკვეთის ფართობის განსაზღვრის ანალიზური მეთოდია.

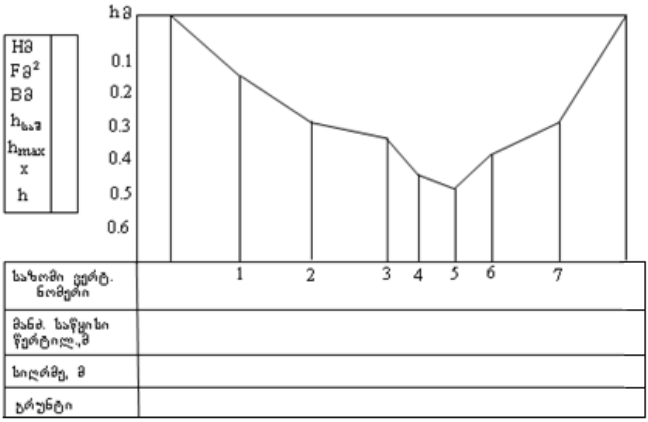
შემდგომი ამოცანაა მდინარის განივკვეთის აგება, მისი ფართობის გამოთვლა გრაფიკულად.

ვიღებთ სტანდარტული საწერი ქაღალდის ზომის მილიმეტრიან ქაღალდს. ვარჩევთ მასშტაბს იმ მოსაზრებით, რომ განივკვეთი მის ქვემოთ მდებარე ცხრილით (ნახ. 3.5) მოთავსდეს ამ ფურცელზე. ამასთან, კალპოტის ფსკერის მოხაზულობის აგებისას ორ მოსაზღვრე ვერტიკალს შორის ვატარებთ სწორ ხაზს. სითხის თავისუფალი ზედაპირის ხაზზე დაგვაქვს წყლის დონის აბსოლუტური ნიშნული ან ნიშნული გრაფიკის ნულიდან.

როგორც ცნობილია, თითოეული წყალსაზომი საგუშაგო აღჭურვილია დონესაზომი მოწყობილობით (ლარტყა, ხიმინჯი ან თვითჩამწერი) და რეპერით. წყალსაზომ საგუშაგოზე ათვლილი დონე უნდა დავუკავშიროთ პირობით ჰორიზონტალურ სიბრტყეს ანუ საგუშაგოს გრაფიკის ნულს. ამისათვის, ლარტყაზე ანათვალს უნდა დავუმატოთ ე.წ. მიმყვანი ანუ სხვაობა ლარტყის ნულის

ნიშნულსა და გრაფიკის ნულის ნიშნულს შორის, ე.ი. წყლის დონის ნიშნულის ტოლია:

$$H = h_{\text{ლარტყ}} + h_{\text{მამყ.}}$$



ნახ. 3.5. მდინარის განივკვეთი

ლარტყის ჩვენებას ავითვლით ადგილზე, ხოლო მიმყვანის $\left(h_{\text{მამყ.}}\right)$ მნიშვნელობას ამოვიწერთ წყალსაზომი საგუშაგოს ჟურნალიდან. განივკვეთის მარცხენა მხარეს ნახაზზე დაგვაქვს ვერტიკალური მასშტაბი. გრაფიკის ქვემოთ ვათავსებთ ცხრილს, განივკვეთის აგების შემდეგ პლანიმეტრით ვზომავთ მის ფართობს (F). მიღებულ მნიშვნელობას ვწერთ განივკვეთის ნახაზზე მარცხენა ზედა კუთხეში მოთავსებულ ცხრილში. შემდეგ გამოვთვლით მდინარის ძირითად მორფომეტრულ და ჰიდრავლიკურ მაჩვენებლებს:

1. მდინარის სიგანე გამოითვლება, როგორც მარჯვენა და მარცხენა ნაპირების საწყისი წერტილიდან დაშორების სხვაობა
$$B = h_{\text{მარჯ.}} - h_{\text{მარც.}} .$$
2. მდინარის საშუალო სიღრმე გამოითვლება განივკვეთის ფართობისა და მდინარის სიგანის ფარდობით
$$h_{\text{საშ.}} = \frac{F}{B} .$$
3. სიღრმეების გაზომვის შედეგების ცხრილიდან აიღება სიღრმის მაქსიმალური მნიშვნელობა.
4. სველი პერიმეტრი გამოითვლება, როგორც მართკუთხა სამკუთხედების ჰიპოტენუზების ჯამი

$$\chi = \sqrt{b_1^2 + b_1^2} + \sqrt{b_2^2 + (h_2 - h_1)^2} + \ldots + \sqrt{b_{n+1}^2 + b_n^2} .$$

5. ჰიდრავლიკური რადიუსი, როგორც ვიცით, ტოლია:

$$R = \frac{F}{\chi} .$$

მიღებული შედეგები შეგვაქვს 3.4 ნახ-ის მარცხენა ზედა კუთხეში მოთავსებულ ცხრილში.

სიზუსტისათვის საჭიროა ფართობის გამოთვლაში დაშვებული ცდომილების განსაზღვრა. ცდომილება გამოითვლება გ.ვ. ჟელეზნიაკოვის ფორმულით:

$$\Delta F = B \cdot \Delta h + \Delta h \sum_{i=1}^{n} h_i ,$$

სადაც Δh არის სიღრმის გამოთვლაში დაშვებული ცდომილება. ჰიდრომეტრიული შტანგით გაზომვის შემთხვევაში მიღებულია, რომ $\Delta h + 0.02$მ; Δh სიგანის გამოთვლაში დაშვებული ცდომილებაა. მიღებულია, რომ $\Delta h + 0.01$მ-ს. სიგანე იზომება ფოლადის რულეტით.

თავი IV. მდინარის სიჩქარის გაზომვის მეთოდები და სიჩქარის საზომი ხელსაწყოები

§ 4.1. სიჩქარის განაწილება მდინარეებში

მდინარეებში, არხებსა და წყალდენებში, როგორც წესი, წყლის მოძრაობა ტურბულენტურია, ამიტომ სიჩქარე ნაკადის ყოველ წერტილში იცვლება დროში როგორც სიდიდით, ისე მიმართულებით, ე.ი. განიცდის პულსაციას. განასხვავებენ მყის და გასაშუალებულ სიჩქარეს. მყისი ეწოდება სიჩქარეს, გაზომილს ნაკადის აღებულ წერტილში დროის რაღაც მომენტში. სიჩქარის საზომი თანამედროვე აპარატურა საშუალებას გვაძლევს გავზომოთ სიჩქარის პულსაციური ცვალებადობა დროში. ჰიდრომეტრიაში, ჩვეულებრივ, განიხილავენ არა მყისი სიჩქარის ვექტორს, არამედ მის კომპონენტებს კოორდინატთა მართკუთხა სისტემაში. ამასთან, კოორდინატთა ერთ ღერძს მიმართავენ ჰორიზონტალურად, ნაკადის გრძივი ღერძის მიმართულებით. მყისი სიჩქარის ვექტორის პროექციას ამ ღერძზე სიჩქარის გრძივ შემდგენს ან უბრალოდ გრძივ სიჩქარეს უწოდებენ. სიჩქარის ვექტორის გეგმილს ვერტიკალურ ღერძზე – ვერტიკალურ შემდ-

გენს ან ვერტიკალურ სიჩქარეს უწოდებენ. ჰიდრომეტრიულ პრაქტიკაში იყენებენ ე.წ. გასაშუალებულ სიჩქარეს. სიჩქარეს ნაკადის წერტილში, რომელიც გასაშუალებულია დროის ხანგრძლივ პერიოდში გასაშუალებული ადგილობრივი სიჩქარე ეწოდება (იგი აღინიშნება $\overline{U}$-ით). როგორც დაკვირვებებმა გვიჩვენა, შეიძლება ავიღოთ დროის ისეთი ინტერვალი T, რომელიც აღებული წერტილისათვის დააკმაყოფილებს პირობას:

$$\overline{U_1} = \overline{U_2} = \overline{U_3} = \ldots = Const .$$

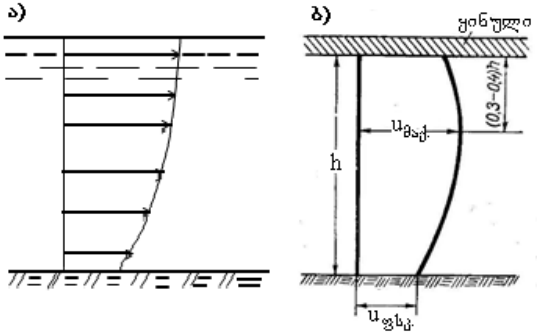
დროის ამ ინტერვალს (პერიოდს) გასაშუალების პერიოდი ეწოდება. გასაშუალების პერიოდის ხანგრძლივობა დამოკიდებულია ტურბულენტურობის ინტენსიურობაზე. რაც უფრო მეტია ტურბულენტურობის ინტენსიურობა, მით უფრო მეტი უნდა ავიღოთ გასაშუალების პერიოდი. როგორც ცნობილია, ტურბულენტურობის ინტენსიურობა იცვლება ნაკადში როგორც ვერტიკალზე, ისე განივკვეთში, კერძოდ, იზრდება თავისუფალი ზედაპირიდან ფსკერისაკენ. ამიტომ, თუ მკაცრად ვიმსჯელებთ, სხვადასხვა წერტილში სიჩქარის გაზომვის დროს უნდა ავიღოთ გასაშუალების სხვადასხვა პერიოდი. გასაშუალების პერიოდის დადგენა თითოეული წერტილისათვის ძალიან გაართულებდა ჰიდრომეტრიულ სამუშაოებს. მრავალრიცხოვანი ავტორების ექსპერიმენტული და თეორიული გამოკვლევების შედეგად მიღებულია, რომ გასაშუალების პერიოდი იყოს 100 წამი, რაც პრაქტიკის უმრავლეს შემთხვევაში სრულიად საკმარისია. განსაკუთრებულ შემთხვევაში საჭიროა განისაზღვროს გასაშუალების პერიოდის საკმარისობა.

ჰიდრომეტრიაში, ჩვეულებრივ, განიხილავენ ადგილობრივი გრძივი გასაშუალებული სიჩქარის განაწილებას (სიმარტივისათვის ადგილობრივ სიჩქარეს აღნიშნავენ U ასოთი და არა $\overline{U}$-თი).

განვიხილოთ გრძივი სიჩქარის განაწილება ვერტიკალზე. ღია ნაკადებში მაქსიმალური სიჩქარე გვხვდება ზედაპირთან და ფსკერისკენ თანდათან მცირდება. თუ ვერტიკალის სხვადასხვა წერტილში გავზომავთ სიჩქარეს, მათ მნიშვნელობებს გადავზომავთ დინების მიმართულებით და მიღებული მონაკვეთების ბოლოებს შევაერთებთ მრუდით, მაშინ ეს მრუდი იქნება სიჩქარის პროფილი, ხოლო ფართობს, რომელიც შემოსაზღვრულია სიჩქარის პროფილით, ვერტიკალით, სითხის თავისუფალი ზედაპირითა და ფსკერით, სიჩქარის ეპიურა ეწოდება (ნახ. 41, ა).

თუ გავზომავთ სიჩქარის ეპიურას ფართობს და გავყოფთ ნაკადის სიღრმეზე, მივიღებთ სიდიდეს, რომელსაც ვერტიკალზე

საშუალო სიჩქარეს უწოდებენ და აღნიშნავენ v ასოთი. თუ მდინარე დაფარულია ყინულის საფარით, მაშინ მაქსიმალური სიჩქარე ვერტიკალზე გადაინაცვლებს ზედაპირიდან ქვემოთ 0.3–0.4 h სიღრმემდე (ნახ. 4.1, ბ).



ნახ. 4.1. ვერტიკალზე სიჩქარის ეპიურა
ა) ღია ნაკადი ბ) ყინულოვანი საფარი

§ 4.2. სიჩქარის გაზომვის მეთოდების კლასიფიკაცია

მდინარის სიჩქარის გასაზომად არსებობს მრავალი მეთოდი და ხელსაწყო, რომელთა მოქმედება ემყარება სხვადასხვა ფიზიკურ პრინციპს. შევჩერდებით იმ მეთოდებსა და ხელსაწყოებზე, რომლებიც ფართოდ გამოიყენება ჰიდრომეტრიაში.

ა) მეთოდი, რომელიც ემყარება ფრთებიანი ხრახნის ბრუნვათა რიცხვის განსაზღვრას. ამ მეთოდზე დამყარებული ხელსაწყო-ჰიდრომეტრიული ტრიალა, ყველაზე ფართოდ გავრცელებული ხელსაწყოა ჰიდრომეტრიაში.

ბ) მეთოდი, რომელიც ემყარება წყალში მცურავი სხეულის სიჩქარის გაზომვას. ამ მეთოდის დროს გამოიყენება სხვადასხვა ტიპის ტივტივა.

გ) მეთოდი, რომელიც ემყარება სიჩქარული დაწნევის გაზომვას. ამ დროს იყენებენ სხვადასხვა კონსტრუქციის ჰიდრომეტრიულ მილებს, რომლებიც ცნობილი პიტოს მილის ნაირსახეობაა.

დ) მეთოდი, რომელიც ემყარება ნაკადის სხეულზე ზემოქმედების ძალის რეგისტრაციას. ამ პრინციპზე აგებული ხელსაწყოები აღჭურვილია მგრძნობიარე ელემენტებით. ელემენტზე მოქმედი ნაკადის ძალა იზომება და იწერება სპეციალური ხელსაწყოებით. ასეთი ტიპის ხელსაწყოები საშუალებას გვაძლევს

მოვახდინოთ სიჩქარის დროში უწყვეტი ჩაწერა, ე.ი. გავზომოთ სიჩქარის პულსაცია. ისინი ძირითადად გამოიყენება კვლევითი სამუშაოების დროს.

ე) მეთოდი, რომელიც ემყარება თბოცვლის პრინციპებს. ამ მეთოდზე დამყარებული ხელსაწყოები აღჭურვილია სპეციალური ელემენტით, რომელიც გაცხელებულ მდგომარეობაში შეჰყავთ ნაკადში. ნაკადის სიჩქარე იზომება ამ ელემენტის გაცივების სიჩქარის მიხედვით.

ვ) მეთოდი, რომელიც ემყარება სპეციალურ ხელსაწყოში შესული წყლის მოცულობის გაზომვას. ამ მიზნით გამოიყენება სხვადასხვა ტიპის ბატომეტრ-ტაქომეტრები.

ზ) მეთოდი, რომელიც ემყარება ულტრაბგერის გამოყენებას.

თ) მეთოდი, რომელიც ემყარება ლაზერის სხივის გამოყენებას.

თანამედროვე პირობებში ჰიდრომეტრიული სამუშაოების შესასრულებლად როგორც მდინარეებზე, ისე წყალსაცავებსა და არხებზე, ძირითადად გამოიყენება ჰიდრომეტრიული ტრიალები, იშვიათად ტივტივები. ზემოთ ჩამოთვლილი სხვა მეთოდები უმეტესად გამოიყენება სამეცნიერო-კვლევით სამუშაოების დროს, ამიტომ დეტალურად განვიხილავთ ჰიდრომეტრიული ტრიალებითა და ტივტივებით მდინარის სიჩქარის გაზომვის მეთოდებს. პირველეს ყოვლისა, ზოგადად გავეცნოთ ამ ხელსაწყოების მოქმედების პრინციპებს.

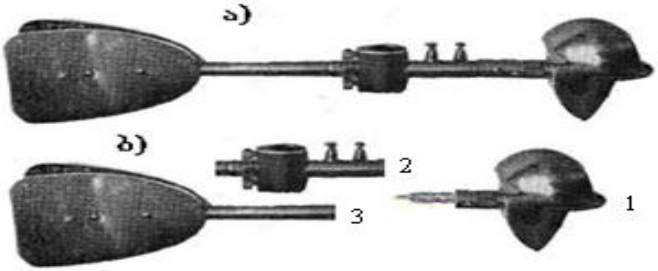
§ 4.3. ჰიდრომეტრიული ტრიალა

არსებობს სხვადასხვა ტიპისა და კონსტრუქციის მრავალი ჰიდრომეტრიული ტრიალა, ისინი შედგება ძირითადი ნაწილისაგან (ფრთებიანი ხრახნი და საკონტაქტო მოწყობილობა), კორპუსისაგან, მიმართულების სტაბილიზატორისა და სასიგნალო მოწყობილობისაგან (ნახ. 4.2). ჰიდრომეტრიული ტრიალას მუშაობა განსაზღვრულია ნაკადისა და ხელსაწყოს ურთიერთქმედებით. კერძოდ, ტრიალას ფრთების ბრუნვათა რიცხვი დამოკიდებულია ნაკადის მოძრაობის სიჩქარეზე.

სიჩქარის გაზომვისათვის გამოიყენება ტრიალას ბრუნვათა რიცხვსა და ნაკადის სიჩქარეს შორის არსებული დამოკიდებულება. ეს დამოკიდებულება იდეალურ შემთხვევაში შემდეგნაირად ჩაიწერება:

$$U = K_1 \cdot n, \tag{4.1}$$

სადაც U არის ნაკადის სიჩქარე; n – ბრუნთა რიცხვი წამში. K_1–ე.წ. ფრთებიანი ხრახნის გეომეტრიული ბიჯი, რომელიც ხრახნის ხაზის ბიჯის ტოლია.



ნახ. 4.2. ა) საერთო ხედი; ბ) ძირითადი ნაწილები: 1) ფრთები; კორპუსი; 3) მიმართულების სტაბილიზატორი

რეალურ შემთხვევაში ჰიდრავლიკური და მექანიკური წინაღობების გავლენით (4.1) გამოსახულება უფრო რთულ სახეს ღებულობს. ჰიდრავლიკური წინაღობები გამოწვეულია ჰიდრავლიკური ხახუნით სითხესა და ფრთებიანი ხრახნის ზედაპირს შორის, აგრეთვე გრიგალების წარმოქმნით და სხვა. მექანიკური წინაღობა გამოწვეულია ტრიალას მექანიზმში სხვადასხვა ნაწილს შორის არსებული ხახუნით.

ამ წინაღობების გათვალისწინებით (4.1) ტოლობა ასე ჩაიწერება:

$$U = an + \sqrt{bn^2 + C}\,,$$

სადაც a, b და c პარამეტრებია, გრაფიკულად ეს განტოლება წარმოადგენს პარაბოლას. ყველა ტრიალას აქვს ე.წ. საწყისი სიჩქარე ($U_ს$), რომლის დროსაც ნაკადის ზემოქმედების ძალა და ტრიალას წინაღობა ერთმანეთის ტოლია. ამ სიჩქარის გათვალისწინებით მივიღებთ, რომ

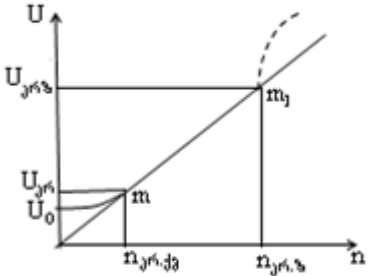
$$U = an + \sqrt{bn^2 + U_0^2}\,, \qquad (4.2)$$

სადაც $U_ს$ არის საწყისი სიჩქარე. დიდი სიჩქარის დროს შეიძლება დავუშვათ, რომ $U_ს$ ძალიან მცირეა U-სთან შედარებით, მაშინ

$$U = \left(a + \sqrt{h}\right)n = Kn\,. \qquad (4.3)$$

აქ K ითვალისწინებს როგორც მექანიკურ, ისე ჰიდრავლიკურ წინაღობას და მას ჰიდრავლიკურ ბიჯს უწოდებენ. იგი ბევრად მეტია გეომეტრიულ ბიჯზე.

(4.2) ფორმულა და მისი შესაბამისი გრაფიკი (ნახ. 4.3) გვიჩვენებს, რომ ნაკადის სიჩქარესა და ბრუნთა რიცხვს შორის დამოკიდებულების გრაფიკზე გამოიყოფა მრუდწირული და სწორხაზოვანი უბანი. გარდატეხის m წერტილს კრიტიკულ წერტილს უწოდებენ, ხოლო მის შესაბამის სიჩქარეს (ბრუნთა რიცხვს) კრიტიკულ სიჩქარეს (ბრუნვათა რიცხვს). აქვე შევნიშნოთ, რომ სწორი ხაზი შეესაბამება (4.3) ფორმულას.



ნახ. 4.3. ***U=f(n)*-ის გრაფიკი**

სწორხაზოვანი დამოკიდებულება შენარჩუნებულია გარკვეულ ზღვარამდე (ნახ-ზე m_1 წერტილი). ეს ზღვარი სხვადასხვა ტრიალასათვის სხვადასხვაა. m_1 წერტილის შესაბამის სიჩქარეს ზედა კრიტიკულ სიჩქარეს უწოდებენ. ზედა კრიტიკული წერტილის არსებობის (ე.ი. სწორხაზოვნების დარღვევის) მიზეზად თვლიან კავიტაციას და გრიგალთა წარმოქმნას ტრიალას ფრთებთან. ამრიგად, ცხადია, რომ ტრიალას გამოყენება შეიძლება ქვედა m და ზედა m_1 კრიტიკულ წერტილებს შორის. ტრიალას ფრთების ბრუნვათა რიცხვსა და ნაკადის სიჩქარეს შორის დამოკიდებულების გრაფიკს (და მაშასადამე, კრიტიკული წერილების მნიშვნელობებს) ადგენენ ე.წ. ტარირების დროს, რომელსაც აწარმოებენ თითოეული ტრიალასთვის ინდივიდუალურად.

ჰიდრომეტრიული სამუშაოების დროს ყველაზე ფართოდ იყენებენ ჟესტოკსის ტიპის ტრიალებს (Ж-3, Ж-6) და მათ გაუმჯობესებულ მოდიფიკაციებს (ГР-21, ГР-21М). წინასწარ შევნიშნავთ, რომ ГР-21 ტიპის ტრიალასათვის საორიენტაციო კრიტიკული სიჩქარე, შესაბამისად, 0.4 მ/წმ და 8 მ/წმ-ის ტოლია.

ჰიდრომეტრიული ტრიალა უნდა ხასიათდებოდეს ერთ-ერთი ძირითადი თვისებით, გაზომოს სიჩქარის ვექტორის შემდგენი ტრიალას ღერძის მიმართ ირიბჭავლური მოძრაობის დროს. სიჩქარის გაზომვისას ტრიალას ისე ათავსებენ წყალში, რომ მისი ღერძი ჰიდრომეტრიული კვეთის ანუ ნაკადის საერთო მიმართულების მართობული იყოს. ცალკეულ ვერტიკალებსა და ცალკეულ წერტილებში ჭავლების მიმართულება შეიძლება განსხვავდებოდეს ნაკადის საერთო მნიშვნელობისაგან (ირიბჭავლური მოძრაობა). ასეთ პირობებში მოქმედ ტრიალას კომპონენტ-ტრიალას უწოდებენ. დღეს არსებული ტრიალები არ

ხასიათდება სრული კომპეტენტურობით. ასე, მაგალითად, თუ ირიბჭავლურობა არის 40°, ГР-21 ტიპის ტრიალა გვაძლევს 5% ცდომილებას. თუ კუთხე ნაკლებია, ცდომილება შესაბამისად მცირეა.

ჰიდრომეტრიული ტრიალების შემდეგი მნიშვნელოვანი თვისებაა ინერციულობა. ინერციულობა ჰქვია ტრიალას უნარს ზუსტად აჰყვეს მისი ფრთების ბრუნვა სიჩქარის ცვალებადობას (პულსაციას). რაც უფრო ნაკლებია ინერციულობა, მით უფრო სწრაფად იცვლება ბრუნთა რიცხვი სიჩქარის ცვალებადობის დროს. უნდა შევნიშნოთ, რომ ჰიდრომეტრიულ პრაქტიკაში გავრცელებული ГР-21 და ГР-21М ტიპის ტრიალები ხასიათდება შედარებით დიდი ინერციულობით, ამიტომ ისინი სიჩქარის პულსაციის რეგისტრაციისათვის არ გამოდგება და ზომავენ მხოლოდ გასაშუალებულ ადგილობრივ სიჩქარეს.

§ 4.4. ჰიდრომეტრიული ტრიალას ტარირება

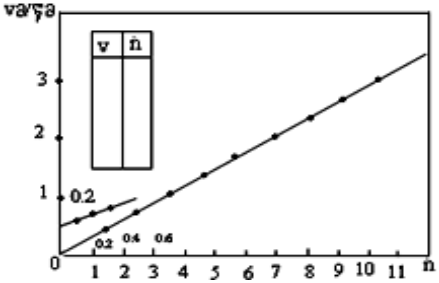
დროის ერთეულში (წამში) ტრიალას ფრთების ბრუნთა რიცხვსა და მდინარის სიჩქარეს შორის დამოკიდებულებას ტარირებას უწოდებენ. ტარირება უტარდება ყველა ახლად დამზადებულ ტრიალას. ყოველ ორ-სამ წელიწადში თითოეული ტრიალას უნდა ჩაუტარდეს განმეორებითი ტარირება.

ტარირება წარმოებს უძრავ წყალში, ე.წ. სატარირო ავზებში. ეს ავზები შეიძლება იყოს სწორხაზოვანი, წრიული და ა.შ. სწორხაზოვანი ავზის (არხის) ორივე მხარეს აწყობენ ლიანდაგებს, რომელზეც ურიკა მოძრაობს. ურიკა მოძრაობაში მოჰყავს ელექტროძრავას, რაც უზრუნველყოფს ურიკის თანაბარ მოძრაობას. ტრიალა მაგრდება ურიკაზე. იზომება ურიკის (ტრიალას) მიერ გავლილი მანძილი, დრო და ტრიალას ფრთების ბრუნთა რიცხვი ამ დროის მანძილზე. მონაცემები ავტომატურად ჩაიწერება ქრონოგრაფზე. ტრიალა და მისი საკონტაქტო ნაწილი ისეა მოწყობილი, რომ ფრთის ყოველი 20 შემობრუნების შემდეგ გვაძლევს სიგნალს (დაირეკება ზარი ან აინთება ნათურა). მის შესაბამისად განვსაზღვრავთ ტრიალას ბრუნვათა რიცხვს დროის ინტერვალში (t), რომელსაც ურიკა ანდომებს L სიგრძის სატარირო ავზის გავლას, შემდეგ ფორმულებით:

$$U = \frac{L}{t} \quad \text{და} \quad n = \frac{W}{t}.$$

განვსაზღვრავთ ტრიალას გადაადგილების სიჩქარეს (U) და ტრიალას ბრუნთა რიცხვს წამში (n). ჩვეულებრივ, თითოეული

ტრიალასათვის ვატარებთ 12–15 ცდას, რომელთათვისაც რეკომენდებულია შემდეგი სიჩქარეები: 0,06; 0.08; 0.1; 0.15; 0.20; 0,.25; 0,50; 1,0; 1,50; 2.0; 2,50; 5,0 მ/წმ. ტარირების მონაცემებით აგებენ $U = f(n)$ დამოკიდებულების მრუდს. ამისათვის აბსცისთა ღერძზე ალაგებენ ტრიალას ბრუნვათა რიცხვს წამებში n, ხოლო ორდინატთა ღერძზე შესაბამის სიჩქარეს. თუ ტარირება სწორადაა ჩატარებული ყველა წერტილი უნდა დალაგდეს სწორ ხაზზე. ექსპერიმენტული წერტილების გაბნევა იმას მიუთითებს, რომ ტარირებაა არასწორად ჩატარებული ან ხელსაწყოა ცუდად დამზადებული. ტარირების მრუდზე გამოსახულია მხოლოდ მისი სწორხაზოვანი უბანი.



ნახ. 4.4. ტრიალას ტარირების მრუდი

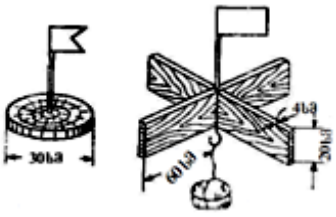
ხშირად ამ სწორხაზოვან უბანს გამოსახავენ ანალიზური სახით:

$$U = Kn\,.$$

ცხადია, კოეფიციენტი K (ჰიდრავლიკური ბიჯი) თითოეულ ტრიალას განსხვავებული ექნება. იმავე ნახ-ზე მსხვილ მასშტაბში დააქვთ მცირე სიჩქარეების შესაბამისი მრუდი (ნახ. 4.4).

§ 4.5. ჰიდრომეტრიული ტივტივები

ტივტივებით სიჩქარის გაზომვისას მიღებულია ძირითადი დაშვება, რომ ტივტივას გადაადგილება წყლის ზედაპირზე ან სიღრმეში იგივე სიჩქარით ხდება, როგორითაც მოძრაობს მისი გარემომცველი სითხე. თუმცა ექსპერიმენტულად და თეორიულადაც დამტკიცებულია, რომ წყალში მოთავსებული სხეული უფრო ჩქარა მოძრაობს, ვიდრე გარემომცველი სითხე. სიჩქარის გასაზომად იყენებენ ე.წ. ზედაპირულ და სიღრმისეულ ტივტივებს და ტივტივა-ინტეგრატორებს.


ნახ. 4.5. ზედაპირული ტივტივები

ზედაპირული ტივტივა გამოიყენება დინების მიმართულებისა და სიჩქარის გასაზომად მდინარის ზედაპირზე. 100მ სიგანის

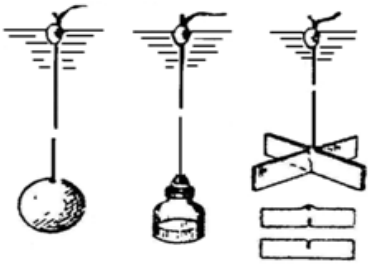
მდინარეებისათვის ზედაპირულ ტივტივებს ამზადებენ გამომშრალი ხის ძელისაგან, რომელთა დიამეტრია 15–25სმ. ტივტივების სისქეს იღებენ 3–5სმ. უფრო განიერი მდინარეებისათვის (100–300მ) ზედაპირულ ტივტივებს ამზადებენ ფიცრებისაგან, რომლებსაც ამაგრებენ ჯვარედინად. ფიცრების ზომები ნაჩვენებია 4.5 ნახ-ზე. ხილვადობის გაუმჯობესის მიზნით ტივტივებზე ხშირად ამაგრებენ დროშებს. ქვემოთ დეტალურადაა მოცემული, ზედაპირული ტივტივას საშუალებით, სიჩქარის გაზომვის მეთოდიკა.

სიღრმისეული ტივტივა გამოიყენება გარკვეულ სიღრმეზე სიჩქარის გასაზომად. იგი შედგება ორი ტივტივასაგან, რომლებიც ვიწრო ბაწრით ან ბაგირითაა ერთმანეთთან დაკავშირებული (ნახ. 4.6).

ზედა ტივტივა მოთავსებულია მდინარის ზედაპირზე, ხოლო ქვედა – საანგარიშო სიღრმეზე. სიღრმისეული ტივტივები გამოიყენება მცირე სიჩქარეების (U<0.15მ/წმ) გასაზომად. ზედა ტივტივას ამზადებენ საცობისაგან, ქვედა ტივტივა წყალზე ოდნავ მძიმე უნდა იყოს და ამზადებენ ზეთით გაჟღენთილი 4–5სმ დიამეტრის ხის ბურთულისაგან ან ნაწილობრივ წყლით შევსებული შუშის ბურთულისაგან, ან ჯვარედინად შეერთებული პლასტმასის ფირფიტებისაგან.

სიჩქარე h სიღრმეზე გამოითვლება ფორმულით:

$$U_h = 2U_{\text{სისტ.}} - U_{\text{ზედ.}},$$



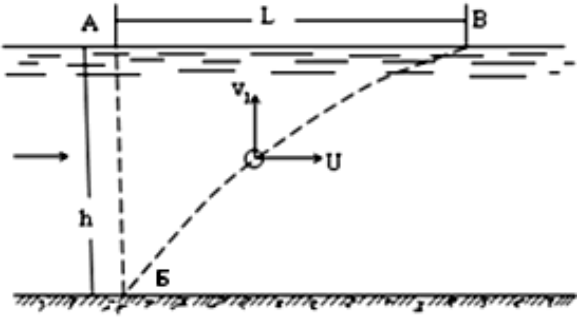
ნახ. 4.6. სიღრმული ტივტივები

სადაც U_h არის სიჩქარე, h – სიღრმეზე; $U_{\text{სისტ.}}$ – ზედა და სიღრმის ტივტივებისგან შემდგარი სისტემის მოძრაობის სიჩქარე: $U_{\text{ზედ.}}$ –ზედაპირული სიჩქარე.

ამრიგად, სიღრმის ტივტივას საშუალებით სიჩქარის გაზომვისათვის ჯერ უნდა გაიზომოს ტივტივათა სისტემის გადაადგილების სიჩქარე, რაც მოხდება ზედა ტივტივაზე დაკვირვების საშუალებით, შემდეგ ზედაპირული ტივტივას საშუალებით იზომება ზედაპირული სიჩქარე $U_{\text{ზედ.}}$. რადგან სიღრმის ტივტივა გამოიყენება მცირე სიჩქარეების გაზომვისათვის, ამიტომ კვეთებს შორის მანძილს 2÷4მ იღებენ და ამ მანძილის ზომავენ ზედა ტივტივას მიერ გავლის დროს.

ტივტივა-ინტეგრატორი გამოიყენება ვერტიკალზე საშუალო

სიჩქარის გასაზომად. მას აქვს სფერული ფორმა და ამზადებენ წყალზე მსუბუქი მასალისაგან (ხისაგან, პლასტმასისაგან და სხვა). ტივტივას ათავსებენ მდინარის ფსკერთან (ნახ. 4.7). გაშვების შემდეგ ამოტივტივდება ზედაპირზე გარკვეულ *dl* მანძილზე. დინების სიჩქარის გავლენით, ამოტივტივებასთან ერთად გადაადგილდება დინების მიმართულებით.



ნახ. 4.7. ტივტივა-ინტეგრატორი

4.7 ნახ-ზე ნაჩვენები სქემის თანახმად შეიძლება დაიწეროს, რომ

$$dl = Udt; dh = \omega dt,$$

სადაც U არის დინების ადგილობრივი სიჩქარე, რომელიც იცვლება სიღრმის მიხედვით; ω ტივტივას ვერტიკალური აღმასვლის (ამოტივტივების) სიჩქარე დამდგარ წყალში. იგი შეიძლება ჩაითვალოს მუდმივ სიდიდედ.

აქედან

$$l = \int_0^t U dt; \quad h = \omega.$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ $dt = \frac{dh}{\omega}$, მივიღებთ:

$$l = \int_0^h \frac{U}{\omega} dh.$$

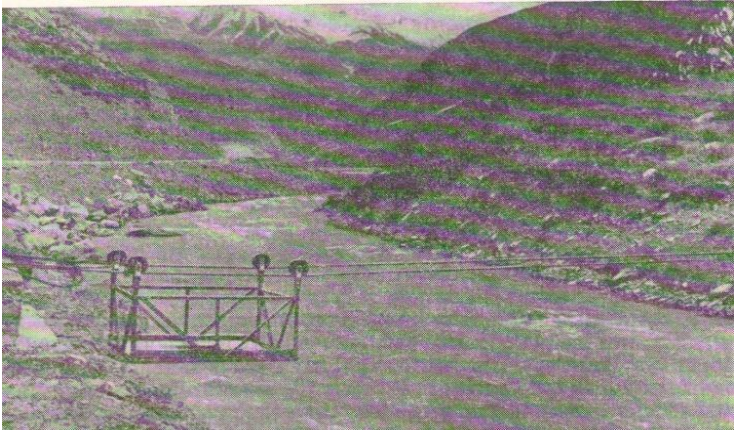
ამასთან, ცნობილია, რომ $\int_0^h U dh = vh$, სადაც v საშუალო სიჩქარეა ვერტიკალზე. საბოლოოდ მივიღებთ, რომ

$$l = \frac{vh}{\omega} \quad \text{და} \quad v = \frac{\omega}{h} l.$$

ე.ი. ვერტიკალზე საშუალო სიჩქარის გასაზომად საჭიროა გავზომოთ ნაკადის სიღრმე (h), მანძილი დინების მიმართულებით საწყისი ვერტიკალიდან ტივტივას ამოტივტივების წერტილამდე (l) და ამოტივტივების სიჩქარე (ω). ამ უკანასკნელს წინასწარ საზღვრავენ დამდგარ წყალში.

§ 4.6. სიჩქარის გაზომვა ჰიდრომეტრიული ტრიალას საშუალებით და მდინარის ხარჯის გამოთვლა

სიჩქარის გაზომვისა და ხარჯის განსაზღვრისათვის მდინარეზე უბნის შერჩევის მოთხოვნები ძირითადად ემთხვევა სიღრმის გაზომვისათვის უბნის (ჰიდრომეტრიული კვეთის) შერჩევის და მონიშვნის მეთოდებს. ეს საკითხი განხილულია § 4.1-ში. აქ შევეხებით ზოგიერთ დამატებით საკითხს, რაც აუცილებელია ტრიალას გამოყენებით ხარჯების გაზომვების ჩასატარებლად.

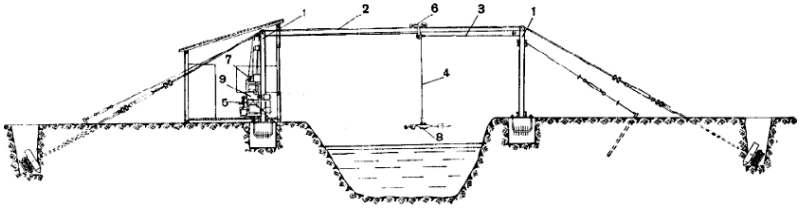


ნახ. 4.8. ჰიდრომეტრიული აკვანი

ჰიდრომეტრიულ კვეთს სიღრმეებისა და დინების სიჩქარეების გაზომვისათვის აწყობენ სხვადასხვა სახის გადასასვლელით, რაც დამოკიდებულია მდინარეების სიგანეზე, დინების სიჩქარესა და წყლის სიღრმეზე. ჰიდრომეტრიულ გადასასვლელებად იყენებენ ხიდებს, ჰიდრომეტრიულ აკვნებს, ნავებს, ბორნებს, ნავტიკებს და სხვა. ჰიდრომეტრიული ხიდები გამოიყენება პატარა მდინარეებზე. მდინარეებს, რომელთა სიგანე 50 მეტრამდეა და აქვს დიდი სიღრმე და დინების დიდი სიჩქარე აწყობენ დაკიდებულ ხიდებს.

ჰიდრომეტრიულ აკვანს აწყობენ ჩქარი დინების და მაღალნაპირიან მთის მდინარეებზე (ნახ. 4.8). აკვანში შეიძლება მოთა-

ვსდეს 1–2 თანამშრომელი საჭირო იარაღით. აკვანი შეიძლება გადაადგილებდეს ერთი ნაპირიდან მეორეზე სათანადო გვარლების საშუალებით. აკვნის გვარლები ნაპირებზე დაყრდნობილია სპეციალურ ჩარჩოზე, ხოლო გვარლების ბოლოები დამაგრებულია მიწაში მოთავსებულ ცემენტის მონოლითში ჩატანებულ ღუზებზე. აკვნის გადაადგილება ხორციელდება ჯალამბრის ან ხელის საქაჩი გვარლის საშუალებით.



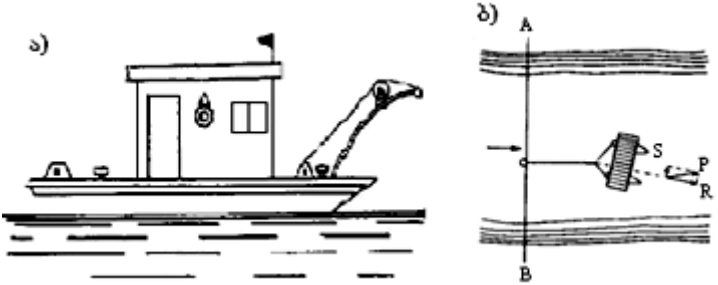
ნახ. 4.9. ჰიდრომეტრიული დისტანციური დანადგარი ГР-64 (სქემა)

ჰიდრომეტრიული დისტანციური დანადგარების დანიშნულებაა ჰიდრომეტრიული გაზომვების დისტანციური ჩატარება. იგი შედგება სანაპირო საყრდენებისა და გვარლ-ბლოკური სისტემისაგან, რომლის დახმარებითაც შეიძლება ტრიალას ან სხვა ხელსაწყოს გადაადგილება კვეთის სასურველ ვერტიკალზე და ნაკადში ჩაძირვა სასურველ სიღრმეზე. ხელსაწყოს გადაადგილებისა და ჩვენების რეგისტრაციისათვის მდინარის ნაპირზე მოწყობილია ჯიხური მართვის პულტით და მექანიზმებით. ჰიდრომეტრიული დისტანციური დანადგარი Гр-64 ელექტრული ძრავათი და ღილური მართვით საშუალებას იძლება შესრულდეს ჰიდრომეტრიული სამუშაოები დინების 5 მ/წმ სიჩქარის დროს. დანადგარი შედგება (ნახ. 4.9) სანაპირო საყრდენებისაგან (1), მასზე გადაყრილი ორი გვარლისაგან (2-4), ორდოლიანი ჯალამბრისაგან (5), ურიკისაგან (6), ამთვლელი ბლოკისაგან, სპეციალური 100კგ-იანი ტვირთისაგან (8), ოპტიკური კუთხესაზომისა და მართვის პულტისაგან (9). ურიკის გადაადგილება და ტვირთის ჩაშვება და ამოწევა ხდება ორი გვარლის დახმარებით. სიღრმეების განსაზღვრისათვის საძირავი ტვირთი აღჭურვილია ზედაპირული და ფსკერული კონტაქტებით, რომლებითაც განისაზღვრება შეხების მომენტები წყალსა და ფსკერთან. ტრიალას ფრთების ბრუნვის რეგისტრაცია ხდება იმპულსური მრიცხველით.

ჰიდრომეტრიულბაგირიანი გადამყვანი ნავი ეწყობა 150-200 მ სიგანის და წყნარი დინების მდინარეებზე, კვეთის ზევით

გაჭიმულია სასვლო გვარლი. მისი ერთი ბოლო დამაგრებულია ნაპირზე დასობილ ხიმინჯზე, ხოლო მეორე – მოპირდაპირე ნაპირზე განლაგებულ ჯალამბარზე. კვეთის გასწვრივ გაჭიმულია მეორე გვარლი, რომელზეც მონიშნულია ვერტიკალები. გაზომვები წარმოებს ნავიდან.

ჰიდრომეტრიულ პანტონს აწყობენ ძლიერი დინების დიდსა და საშუალო მდინარეზე, სადაც ხელსაწყოები წყალში უნდა ჩაუშვან მძიმე ტვირთით. იგი წარმოადგენს ორ დიდ ნავს (ნახ. 4.10), რომელიც ერთმანეთთან დაკავშირებულია მაგარი ჩარჩოთი, რომელზედაც მოწყობილია გემბანი. ნავებს შორის მანძილი 1.5–2 მ-ია. პანტონის ზედაპირზე აწყობენ ჯიხურს. წინ ნავებს შორის გაკეთებულია ისარი ჭოჭონაქით, ხელსაწყოს წყალში ჩასაშვებად. გემბანზე დგამენ ჯალამბარს. პანტონს კვეთის გასწვრივ გადაადგილებენ სასვლო გვარლზე ხელით ან წყლის ნაკადის საშუალებით. დაკვირვების ადგილზე პანტონს აჩერებენ ღუზების საშუალებით, რისთვისაც გემბანზე დგამენ ჯალამბარს.



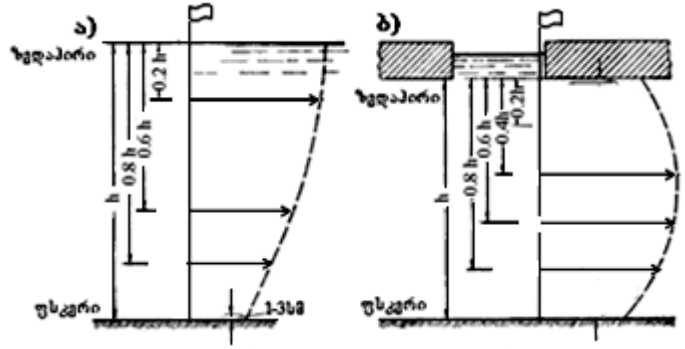
ნახ. 4.10. ჰიდრომეტრიული პანტონი
ა) საერთო ხედი, ბ) პანტომი გვარლზე ორი ღუზით

წყლის ხარჯების ტრიალათი განსაზღვრისათვის აუცილებელია დინების სიჩქარის განსაზღვრა ვერტიკალების ცალკეულ წერტილებში. ვერტიკალების რაოდენობა და მათი განაწილება სიგანეში დამოკიდებულია მდინარის სიგანეზე, ფსკერის კონფიგურაციაზე. ტრიალათი გაზომვის დროს იყენებენ დეტალურ და შემოკლებულ ხერხებს.

სიჩქარის გაზომვა საანგარიშო ვერტიკალებზე, ჩვეულებრივ, წარმოებს ერთი ტრიალას საშუალებით, რომელსაც თანამიმდევრულად გადაადგილებენ შესაბამის წერტილში. სიჩქარის გაზომვისათვის საჭიროა გაიზომოს ნაკადის სიღრმე ვერტიკალზე ანუ დადგინეს ე.წ. სამუშაო სიღრმე და გამოითვალოს თითოეულ ვერტიკალზე ტრიალას ჩაძირვის სიღრმეები.

დეტალური მეთოდის დროს, რომელიც გულისხმობს მდინარის კინემატიკის შესწავლას თავისუფალი კალაპოტის შესწავლას, მიღებულია სიჩქარე გაიზომოს ხუთ წერტილში: ზედაპირთან 0.2*h*; 0.6*h*; 0.8*h* სიღრმეზე და ფსკერთან (ნახ. 4.11, ა).

სიჩქარის გაზომვის შემოკლებული მეთოდის დროს ამცირებენ როგორც სიჩქარეთა ვერტიკალების რაოდენობას, ისე ვერტიკალზე სიჩქარეთა გასაზომი წერტილების რიცხვსაც. ამ მეთოდის დროს და აგრეთვე იმ შემთხვევაში, როდესაც სიღრმე ვერტიკალზე საკმარისი არ არის, სიჩქარეებს ზომავენ სამ წერტილში (0.2*h*, 0.6*h*, 0.8*h*) ან ორ წერტილში (0.2*h*, 0.8*h*), ან ერთ წერტილში (0.6*h*). ყინულსაფარიან და მცენარეულ კალაპოტებში სიჩქარე ვერტიკალზე იზომება ექვს წერტილში: ზედაპირიდან 0.2*h*; 0.4*h*; 0.6*h*, 0.8*h* სიღრმეებზე და ფსკერთან (ნახ. 4.11, ბ). სიჩქარის გაზომვის შემოკლებული მეთოდის დროს სიჩქარე ვერტიკალზე იზომება სამ წერტილში 0.15*h*, 0.5*h* და 0.85*h* სიღრმეზე. მცირე სიღრმეების დროს ერთ წერტილში – 0.5*h* სიღრმეზე.



ნახ. 4.11. ტრიალას მოთავსება ვერტიკალზე
ა) ღია ნაკადში, ბ) ყინულით დაფარულ ნაკადში

თითოეულ წერტილში სიჩქარის გაზომვის ხანგრძლივობა, როგორც აღვნიშნეთ, უნდა ავიღოთ არაუმცირეს 100 წამისა. მაღალი ტურბულენტურობის ნაკადისათვის საჭიროა შემოწმდეს ამ ხანგრძლივობის საკმარისობა. შემოწმება ხდება შემდეგნაირად: ვიღებთ ტრიალას სიგნალების რაოდენობას (ჩვეულებრივ, აიღება ლუწი რიცხვი) და ვზომავთ ამ სიგნალების მიღებისათვის საჭირო დროს. ერთდროულად უნდა გავზომოთ ცალ-ცალკე სიგნალთა რაოდენობის პირველი ნახევრისა და მეორე ნახევრისათვის საჭირო დრო (თუ სიგნალების საერთო რაოდენობაა 10, უნდა გავზომოთ პირველი 5 სიგნალის და

შემდგომი 5 სიგნალის მიღების დრო ცალ-ცალკე), ისინი ერთმანეთისაგან უნდა განსხვავდებოდნენ არაუმეტეს 5 წამით. თუ განსხვავება მეტია, მაშინ ვზრდით სიგნალების რაოდენობას, ე.ი., შესაბამისად, დროსაც. იმ შემთხვევაში, თუ განსხვავება 10 წამზე მეტია, საერთო 160 წმ დაკვირვების დროს, მაშინ, როგორც მრავალრიცხოვანმა დაკვირვებებმა გვიჩვენა, იგი გამოწვეულია ტრიალას გაუმართაობით და უნდა გასწორდეს.

სიჩქარის გასაშუალებისთვის საკმარი დროის ინტერვალის დაზუსტების შემდეგ ვიწყებთ სიჩქარის გაზომვას საანგარიშო ვერტიკალების ზემოთ აღნიშნულ წერტილებში. თითოეულ წერტილში სიჩქარის გაზომვის დროს რეკომენდებულია, რომ პირველი ორი სიგნალი გამოვტოვოთ და შემდეგ დავიწყოთ დროისა და სიგნალების ათვლა, ეს იმიტომ, რომ ტრიალას ფრთებმა მოასწროს იმ ბრუნვის სიჩქარის მიღება, რაც დამახასიათებელია აღებული წერტილისათვის.

ამრიგად, ვითვლით სიგნალების რაოდენობას და წამზომით ვზომავთ t დროს. რადგან ყველა ტრიალა ყოველი ოცი ბრუნვის შემდეგ გვაძლევს სიგნალს, შეგვიძლია განვსაზღვროთ ბრუნთა საერთო რიცხვი *n*, შემდეგ კი ბრუნთა რიცხვი წამში

$$n = \frac{W}{t}.$$

შემდეგ ტარირების მრუდიდან ავითვლით ამ ბრუნთა რიცხვის შესაბამის ადგილობრივ (გასაშუალებულ) სიჩქარეს. სიჩქარე შეიძლება განისაზღვროს აგრეთვე ტარირების მრუდის ანალიზური ფორმულით: $u = an \cdot a$ კოეფიციენტების მნიშვნელობა თითოეული ტრიალასათვის ინდივიდუალურია და დაწერილია ტარირების მრუდზე. ასეთი წესით გაიზომება სიჩქარე ყველა საანგარიშო ვერტიკალის შერჩეულ წერტილებში. გაზომვებისა და გამოთვლების შედეგები შეგვაქვს სტანდარტული ფორმის – КГ-5 წიგნაკის (წიგნაკი წყლის ხარჯის გაზომვის ჩანაწერებისათვის) შესაბამის ცხრილში.

სიჩქარეების გაზომვის დამთავრების შემდეგ ტრიალა უნდა დავშალოთ, მისი ყოველი ნაწილი კარგად გავამშრალოთ, საკონტაქტო და სასიგნალო ნაწილები დავზეთოთ, შემდეგ კვლავ ავაწყოთ და შევინახოთ.

ვიცით რა ადგილობრივი სიჩქარეები, ანალიზური მეთოდით განვსაზღვრავთ ვერტიკალზე საშუალო სიჩქარის მნიშვნელობას, თავისუფალი კალაპოტის შემთხვევაში, შემდეგი ფორმულებით: როდესაც სიჩქარე გაზომილია ხუთ წერტილში:

$$V_{საშ} = \frac{U_{ზედ} + 3U_{0.2h} + 3U_{0.6h} + 3U_{0.8h} + U_{ფსკ}}{10};$$

როდესაც სიჩქარე გაზომილია 3 ვერტილში

$$V_{საშ} = \frac{U_{0.2h} + 2U_{0.6h} + U_{0.8h}}{4};$$

როდესაც სიჩქარე გაზომილია ორ ვერტილში

$$V_{საშ} = \frac{U_{0.2h} + U_{0.8h}}{2};$$

როდესაც სიჩქარე გაზომილია 1 ვერტილში

$$V_{საშ} \approx U_{0.6h}.$$

მიღებული საშუალო სიჩქარეების მნიშვნელობები შეგვაქვს იგივე ვიგნაკის ცხრილში.

იმ შემთხვევაში, როდესაც კალაპოტი დაფარულია ყინულით და ვყალმცენარეებით საშუალო სიჩქარე ვერტიკალზე იქნება:

ა) ექვს ვერტილში სიჩქარის გაზომვის დროს

$$V_{საშ} = 0.1(U_{ზედ} + 2U_{0.2h} + 2U_{0.4h} + 2U_{0.6h}2U_{0.8h} + U_{ფსკ});$$

ბ) სამ ვერტილში სიჩქარის გაზომვის დროს

$$V_{საშ} = \frac{1}{3}(2U_{0.15h} + 2U_{0.5h} + 2U_{0.85h});$$

გ) ერთ ვერტილში სიჩქარეების გაზომვის დროს

$$V_{saS} \approx KU_{0.5h},$$

სადაც K=0.9.

ტრიალას მონაცემებით ხარჯის განსაზღვრა წარმოებს როგორც ანალიზური, ისე გრაფიკული მეთოდით.

§ 4.7. ხარჯის გამოთვლის ანალიზური მეთოდი

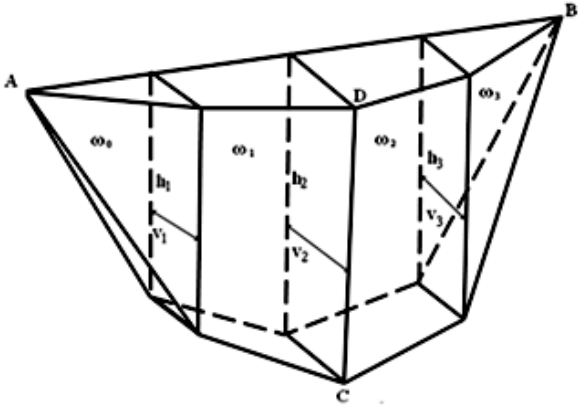
აღნიშნული მეთოდით ხარჯის მოდელის მოცულობის მიახლოებითი გამოსახვა ხდება. ამისათვის, წყლის ხარჯის მოდელი იყოფა ვერტიკალური სიბრტყეებით, რომლებიც ცოცხალი კვეთის მართობულებია. ამ სიბრტყეების რაოდენობა ემთხვევა საანგარიშო ვერტიკალების რაოდენობას, რომლებზეც გაზომილია სიჩქარე და ცნობილია სიჩქარის ეპიურები.

ამ მეთოდს ზოგჯერ უწოდებენ "სიჩქარე-ფართობი" და გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$Q = \int_{\omega} v d\omega.$$

4.11 ნახ-ზე მოცემულია ხარჯის საანგარიშო გამარტივებული მოდელი. მარტივი იმიტომ, რომ თითოეულ ვერტიკალზე სიჩ-

ქარის განაწილების რეალური ეპიურის ნაცვლად გამოთვლილია საშუალო სიჩქარე. ამ შემთხვევაში საშუალო სიჩქარის ეპიურა სწორკუთხედია, რომლის ფუძეა საშუალო სიჩქარე *v* და სიმაღლე – ნაკადის სიღრმე ვერტიკალზე, *h*.



ნახ. 4.12. წყლის ხარჯის საანგარიშო მოდელი

ასეთი აგებისას ზედაპირული და ფსკერული სიჩქარეების განაწილების ხაზები АДБ და АСБ ტეხილი ხაზებია. ამრიგად, რთული მოხაზულობის წყლის მასა – ხარჯის მოდელი შეცვლილია წესიერი გეომეტრიული ფიგურებით, რომელთა მოცულობა ადვილად და ზუსტად გამოითვლება, ე.ი. $Q = \int_{\omega} v d\omega$ ინტეგრალი აპროქსიმირდება შემდეგი ფორმულით:

$$Q = kv_1\omega_0 + \frac{v_1 + v_2}{2}\omega_1 + \ldots + \frac{v_{n-1} + v_n}{2}\omega_{n-1} + kv_n\omega_n , \qquad (4.1)$$

სადაც Q არის მთლიანი ხარჯი; v_1, v_2, v_n – საშუალო სიჩქარეები ვერტიკალზე; ω_o – ფართობი პირველ ვერტიკალსა და მდინარის მარცხენა ნაპირის მოხაზულობას შორის; $\omega_1, \omega_2 \ldots, \omega_n$ – ფართობები საანგარიშო ვერტიკალებს შორის; ω_n – ფართობი ბოლო ვერტიკალსა და მდინარის მარჯვენა ნაპირის მოხაზულობას შორის; k – კოეფიციენტი კიდური ფართობების (ω_0 და ω_n) დასაზუსტებლად. მისი მნიშვნელობა აიღება ცნობარებში მოცემული ცხრილებიდან. 4.1 ფორმულაში მოყვანილი თითოეული შესაკრები წარმოადგენს წყლის ნაწილობრივ ხარჯს. პირველი შესაკრები

არის ნაწილობრივი ხარჯი მარცხენა ნაპირსა და პირველ ვერტიკალს შორის, მეორე შესაკრები – ნაწილობრივი ხარჯი პირველ და მეორე ვერტიკალს შორის და ა.შ. თითოეული ნაწილობრივი ხარჯი გამოითვლება ცოცხალი კვეთის ფართობის ნაწილის საშუალო სიჩქარეზე ნამრავლით. ამრიგად, ხარჯის გამოანგარიშებისათვის აუცილებელია საშუალო სიჩქარე ვერტიკალზე და ცოცხალი კვეთის ნაწილობრივი ფართობები. საშუალო სიჩქარე ვერტიკალზე გამოითვლება ზემოთ ხსენებული ფორმულით, ხოლო ცოცხალი კვეთის უბნის ფართობები გასაზომი ვერტიკალების სიღრმეების მიხედვით. მდინარის მთლიანი ხარჯი მიიღება ნაწილობრივი ხარჯების შეკრებით.

§ 4.8. ხარჯის გამოთვლის გრაფიკული მეთოდი

გრაფიკული მეთოდის დროს ინტეგრირება შეცვლილია ელემენტარული ხარჯების ეპიურის ფართობის გამოთვლით. ელემენტარული ხარჯი ანალიზურად წარმოადგენს ინტეგრალს

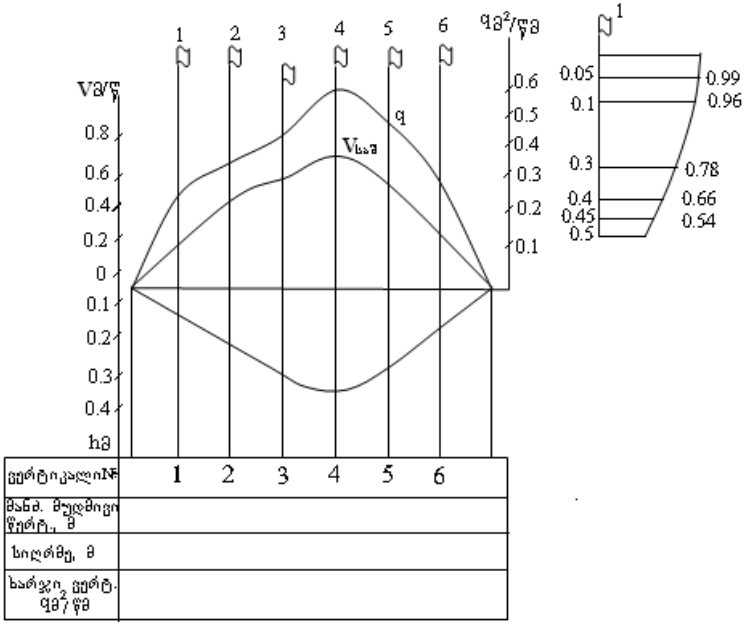
$$q = \int_{o}^{h} U dh .$$

გრაფიკულად იგი ვერტიკალზე სიჩქარის განაწილების ეპიურის ფართობის ტოლია, მდინარის სიგანეზე ელემენტარული ხარჯების განაწილების მრუდით (ეპიურით) შემოხაზული ფართობი რიცხობრივად მდინარის მთლიანი ხარჯის ტოლია. ხარჯის გამოსათვლელად სრულდება შემდეგი გრაფიკული სამუშაოები:

1. КГ-5 ჟურნალის ცხრილის მონაცემებით, სტანდარტული ზომის მილიმეტრიან ქაღალდზე ვაგებთ მდინარის განივკვეთს (ნახ. 4.12). მასშტაბები ისე შეირჩევა, რომ მაქსიმალური სიღრმე შეესაბამებოდეს 6–10 სმ-ს, ხოლო მდინარის სიგანე 12–20 სმ-ს. დაგვაქვს საანგარიშო ვერტიკალები და ვაწერთ ნომერს. მდინარის განივკვეთის ქვემოთ ცხრილის სახით ამოვწერთ საანგარიშო ვერტიკალის ნომერს, დაშორებას მუდმივი (საწყისი) წერტილიდან, წყლის სიღრმეს ვერტიკალზე და ელემენტარული ხარჯების მნიშვნელობას.

2. იგივე მილიმეტრიან ქაღალდზე განივკვეთის მარჯვნივ თითოეულ ვერტიკალზე ვაგებთ (გარდა იმ ვერტიკალებისა, სადაც სიჩქარე გაზომილია ერთი წერტილის მეთოდით) სიჩქარის განაწილების ეპიურას, მასშტაბი იგივე უნდა შევარჩიოთ, რაც განივკვეთისათვის, ჰორიზონტალურ მასშტაბს სიჩქარისათვის ავიღებთ იმ მოსაზრებით, რომ ვერტიკალზე უდიდესი სიჩქარისა და სიღრმის ფარდობა იყოს 0.7–2.0. ეპიურაზე მარჯვნივ ვწერთ

სიჩქარის მნიშვნელობას, ხოლო მარცხნივ – სიჩქარის გაზომვისათვის აღებული წერტილის ჩაძირვის სიღრმეს თავისუფალი ზედაპირიდან.



ნახ. 4.12. ხარჯის გამოთვლა გრაფიკულად

3. გამოვთვალოთ თითოეულ ვერტიკალზე საშუალო სიჩქარის მნიშვნელობა გრაფიკულად. ამისათვის პლანიმეტრით ვსაზღვრავთ ეპიურის ფართობს. ფართობი გაყოფილი ვერტიკალზე წყლის სიღრმის მნიშვნელობაზე მოგვცემს საშუალო სიჩქარეს:

$$v = \frac{\omega}{h},$$

სადაც ω ეპიურის ფართობია.

მიღებული საშუალო სიჩქარეების მნიშვნელობა (0.01 მ/წმ სიზუსტით) შეგვაქვს მდინარის განივკვეთის ქვემოთ მოთავსებულ ცხრილში.

ფართობის გაზომვისა და საშუალო სიჩქარის გამოთვლის შედეგები შეგვაქვს სტანდარტული ფორმის ე.წ. დანართში, თითოეული ვერტიკალისათვის ცალ-ცალკე. მიღებული წესის თანახმად, ფართობს ვზომავთ ორჯერ და ვიღებთ საშუალო მნიშვნელობას.

4. მდინარის განივკვეთის მარცხენა მხარეს დავიტანთ სიჩქარის მასშტაბს. თითოეულ ვერტიკალზე სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან, სიჩქარისათვის შერჩეულ მასშტაბში, გადავზომავთ ვერტიკალზე საშუალო სიჩქარეების მნიშვნელობებს. მიღებული მონაკვეთების ბოლო წერტილებს შევაერთებთ მრუდით, მივიღებთ საშუალო სიჩქარის განაწილების მრუდს. აქვე უნდა შევნიშნოთ, რომ მარცხენა ნაპირიდან პირველ ვერტიკალამდე და მარჯვენა ნაპირიდან ბოლო ვერტიკალამდე სიჩქარის განაწილების მრუდს ვატარებთ მდოვრედ, იმ მოსაზრებით, რომ ხახუნის გავლენით სანაპირო ზონაში სიჩქარე მდოვრედ მცირდება ნულამდე.

5. ვანგარიშობთ ელემენტარული ხარჯების მნიშვნელობებს თითოეული ვერტიკალისათვის

$$q - v \cdot h \text{ მ}^2/\text{წმ}.$$

ელემენტარული ხარჯების მნიშვნელობა (0.01 მ^2/წმ სიზუსტით) შეგვაქვს განივკვეთის ქვემოთ მოთავსებულ ცხრილში. განივკვეთის მარჯვენა მხარეს 4.12 ნახ-ზე დაგვაქვს ხარჯების მასშტაბი იმ მოსაზრებით, რომ მაქსიმალური ელემენტარული ხარჯი შეესაბამებოდეს 7–10 სმ-ს. შემდეგ იმავე ნახ-ზე, შერჩეულ მასშტაბებში, თითოეულ ვერტიკალზე გადავზომავთ ელემენტარული ხარჯების მნიშვნელობას და სიჩქარის განაწილების ეპიურის ანალოგიურად ვაგებთ ელემენტარული ხარჯების განაწილების ეპიურას.

6. როგორც აღვნიშნავთ, ფართობი ელემენტარული ხარჯების განაწილების მრუდსა და სითხის თავისუფალი ზედაპირს შორის რიცხობრივად უდრის ნაკადის ხარჯს, ე.ი ხარჯის განსაზღვრისათვის უნდა გავზომოთ ელემენტარული ხარჯის განაწილების ეპიურის ფართობი. ეს უკანასკნელი გაიზომება პლანიმეტრით. გაზომვას ვაწარმოებით ორჯერ და ვიღებთ საშუალო მნიშვნელობას. შედეგები შეგვაქვს ზემოხსენებული დანართში.

პლანიმეტრიის არარსებობის შემთხვევაში ფართობი მიახლოებით შეიძლება გამოითვალოს პალეტით ან გეომეტრიული წესით. ამ უკანასკნელის დროს, ფართობს ორ მეზობელ ხვედრითი ხარჯის მონაკვეთს შორის ვიღებთ ტრაპეციის ტოლად, ხოლო ფართობს მდინარის მარცხენა და მარჯვენა ნაპირებს და მათ მომიჯნავე კიდური ხვედრითი ხარჯების მონაკვეთებს შორის სამკუთხედის ტოლად. ცხადია, ამ ორი უკანასკნელი მეთოდის დროს ხარჯის განსაზღვრის სიზუსტე მცირდება. თუ მდინარის ხარჯს ვსაზღვრავთ მარტო გრაფიკული მეთოდით, მაშინ საჭიროა შეივსოს აგრეთვე „მიღებული მონაცემების”

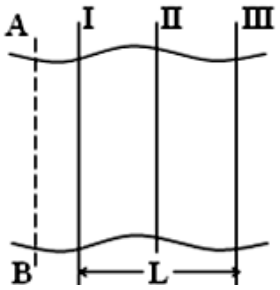
ცხრილი, ანალიზური მეთოდის ანალოგიურად. ჩვენ შემთხვევაში, რადგან ხარჯს ანალიზური მეთოდებითაც ვსაზღვრავთ, „მიღებული მონაცემების“ ცხრილს აქ აღარ გავიმეორებთ.

§ 4.9. სიჩქარის გაზომვა და ხარჯის გამოთვლა ზედაპირული ტივტივას საშუალებით

ხარჯს ვზომავთ ზედაპირული ტივტივას საშუალებით. ამ მიზნით უნდა შევასრულოთ შემდეგი სახის სამუშაოები:

1. მოვამზადოთ წიგნაკი КГ-7 ტივტივების ხარჯის გაზომვის შედეგების შესატანად.
2. გამოვთვალოთ წყლის საანგარიშო დონე.
3. მოვნიშნოთ ზედა, ქვედა და გასაშვები კვეთები.
4. ჩავატაროთ გაზომვები და დავამუშაოთ შედეგები.
5. ავაგოთ ტივტივების სვლის ხანგრძლივობის განაწილების ეპიურა.
6. გამოვიანგარიშოთ ფიქტიური ხარჯი.
7. გამოვიანგარიშოთ რეალური ხარჯი და შევავსოთ ცხრილი „მიღებული მონაცემები“.

წყლის საანგარიშო დონე გრაფიკის ნულიდან აიღება ძირითად ჰიდრომეტრიულ კვეთთან დამაგრებულ ლარტყაზე ხარჯის გაზომვის დღეს. ცნობილია რა ჰიდრომეტრიული საგუშაგოს გრაფიკის ნულის მნიშვნელობა, მათი შეკრება მოგვცემს წყლის დონის აბსოლუტურ მნიშვნელობას.



ნახ. 4.13. კვეთების განლაგება ტივტივებით გაზომვისას

ხარჯის გაზომვისათვის ძირითადი ჰიდრომეტრიული კვეთის II (ნახ. 4.13) ზევით და ქვევით მოვნიშნოთ ორ დამატებით კვეთს I და III იმ მოსაზრებით, რომ ზედა და ქვედა კვეთებს შორის ტივტივას სვლის ხანგრძლივობა იყოს არაუმცირეს 20 წამი. ზედა და ქვედა კვეთებს შორის მანძილი, ბაზისი (*L*) იზომება ფოლადის ლენტით. ზედა კვეთიდან 5–10 მეტრის დაშორებით ზევით მოვნიშნავთ საშვებ (a-b) კვეთს (ნახ. 4.13). საშვებ კვეთში თანამიმდევრობით ჩავუშვებთ ტივტივებს მდინარის მთელ სიგანეზე. ტივტივების რაოდენობა დამოკიდებულია მდინარის სიგანეზე. ზედა I და ქვედა III კვეთებში მდგომი დამკვირვებლები თითოეული ტივტივას მიერ მათთვის მინდობილი კვეთის გადაკვეთის შემთხვევაში გვაძლევს

სიგნალს. ზედა დამკვირვებლისაგან სიგნალის მიღების შემთხვევაში ჩავრთავთ წამზომს, ხოლო ქვედა დამკვირვებლის სიგნალის შემდეგ – გამოვარკვევთ.

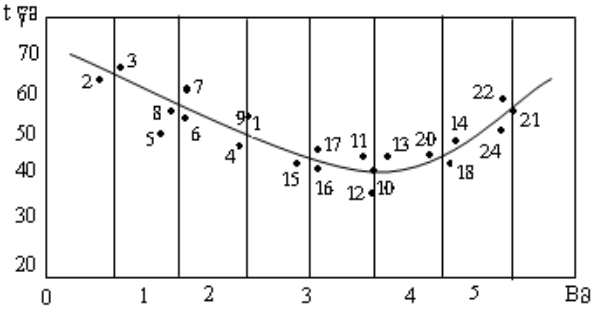
ძირითად კვეთში (II კვეთი) მონიშნული საანგარიშო ვერტიკალები განსაზღვრავს მანძილს საწყისი წერტილიდან ტივტივას მიერ ძირითადი კვეთის გადაკვეთის წერტილამდე. გაზომვის შედეგები შეგვაქვს КГ-7 წიგნაკში, ამ მონაცემების მიხედვით გამოვთვლით ტივტივას მოძრაობის სიჩქარეს.

მთის მდინარეებში, ხშირად დიდი სიჩქარეების არსებობის შემთხვევაში, ტივტივების განაწილება მდინარის მთელ სიგრძეზე შეუძლებელი ხდება, რადგან დინება მათ თავს უყრის ღერძზე. ასეთ შემთხვევაში ტივტივებს უშვებენ მხოლოდ მდინარის დინამიკურ ღერძზე, სადაც შეიმჩნევა უდიდესი სიჩქარე. ტივტივების რაოდენობა მცირდება 5–10-მდე. ყველა ამ ტივტივადან შეირჩევა სამი ტივტივა, რომელთაც ექნება ყველაზე ნაკლები სვლის დრო.

ამ მეთოდების შერჩევა მოხდება გაზომვის დღეს, ადგილობრივი პირობების მიხედვით. თუ სიჩქარეს ვზომავთ მთელ სიგანეზე განაწილებული ტივტივებით, მაშინ ხარჯს გამოვთვლით შემდეგი თანამიმდევრობით: ავაგებთ ტივტივების სვლის ხანგრძლივობის განაწილების ეპიურას. ამისათვის მილიმეტრიან ქაღალდზე აბსცისათა ღერძზე გადავზომავთ მანძილს საწყისი წერტილიდან ტივტივას მიერ ძირითადი კვეთის გადაკვეთამდე, ხოლო ორდინატთა ღერძზე ტივტივას სვლის ხანგრძლივობას (ნახ. 4.14), მიღებულ მასშტაბში დავიტანთ ტივტივების სვლის ნომრის ჩვენებით. თითოეული ჯგუფისათვის სვლის ხანგრძლივობათა სხვაობა არ უნდა აღემატებოდეს 10%-ს. ცალკეული ტივტივების ხანგრძლივობა, რომელიც ძალიან განსხვავდება საერთო ჩვენებიდან, ამოღებული იქნება ანგარიშიდან. მიღებულ წერტილებზე გავატარებთ მრუდს, ამასთან, თითოეული ჯგუფის სიმძიმის ცენტრი თვალით შეირჩევა. თუ მიღებული ეპიურა მდოვრედაა განაწილებული მთელ სიგანეზე, მაშინ მასზე დავიტანთ თანაბრად განაწილებულ ვერტიკალებს (საანგარიშო ვერტიკალები, რომლების შერჩეულია სიღრმისა და სიჩქარის ტრიალათი გასაზომად). თუ ეპიურას რთული მოხაზულობა აქვს, მაშინ დაგვაქვს დამატებითი ვერტიკალები მისი გადაღუნვის წერტილებში. ამ ეპიურიდან გრაფიკულად განვსაზღვრავთ თითოეული საანგარიშო ვერტიკალისათვის ტივტივას სვლის ხანგრძლივობას (იშვიათ შემთხვევაში შეიძლება დაემთხვეს ტივტივათა ჯგუფის ხანგრძლივობის სიმძიმის ცენტრი საანგარიშო ეპიურას),

რის საფუძველზეც $v = \frac{L}{t}$ ფორმულით განისაზღვრება ზედაპირული სიჩქარე ვერტიკალზე, სადაც L არის მანძილი I და II კვეთებს შორის; t – ტივტივას სვლის ხანგრძლივობა. შედეგები შეგვაქვს КГ-7 წიგნაკში. საანგარიშო ვერტიკალებზე სიღრმეები და ვერტიკალებს შორის მოთავსებული ფართობი განსაზღვრულია წინა პარაგრაფში. იმ შემთხვევაში, თუ საჭირო გახდა დამატებითი ვერტიკალების დანიშვნა, მაშინ დამატებით უნდა განისაზღვროს სიღრმეები და ფართობები.

საანგარიშო ვერტიკალებს შორის ხარჯი (ხვედრითი ხარჯი) გამოითვლება, როგორც სიჩქარეების ნახევარჯამისა და ფართობის ნამრავლი. მათი შეკრება მოგვცემს საერთო ფიქტიურ ხარჯს.



ნახ. 4.14. მდინარის სიგანეზე ტივტივების სვლის ხანგრძლივობის განაწილების გრაფიკი

ამგვარად, ფიქტიური ხარჯი გამოითვლება ფორმულით:

$$Q_{\text{ფიქტ}} = K_1 v_1 \omega_1 + \frac{v_1 + v_2}{2}\omega_1 + \cdots \frac{v_{n-1} + v_n}{2}\omega_{n-1} + K v_n \omega_{n+1},$$

სადაც $v_1, v_2 \cdots v_n$ არის საანგარიშო ვერტიკალებზე არსებული ზედაპირული სიჩქარეები, ω_i – საანგარიშო ვერტიკალებს შორის არსებული ფართობი; K_{1-n} – კიდური ნაწილებისათვის არსებული კოეფიციენტი, რომელიც ცხრილიდან აიღება.

რეალური ხარჯი

$$Q = Q_{\text{ფიქტ}} K_1,$$

სადაც K_1 არის ფიქტიურიდან რეალურ ხარჯზე გადამყვანი კოეფიციენტი.

არსებობს K_1-ის საანგარიშო მრავალი ემპირიული ფორმულა. მიახლოებით მისი მნიშვნელობა შეიძლება ავიღოთ ცხრილიდან.

რადგან ტრიალას საშუალებით გაზომილი ხარჯი ითვლება რეალურ ხარჯად, ამიტომ შეგვიძლია დავადგინოთ გადამყვანი კოეფიციენტის მნიშვნელობა:

$$K = \frac{Q_{ტრ}}{Q_{ტიპ}},$$

სადაც $Q_{ტრ}$ არის ტრიალას საშუალებით ანალიზური მეთოდით გამოზომილი ხარჯი.

თუ სიჩქარე გაზომილია მხოლოდ მდინარის ღერძის გასწვრივ გაშვებული ტივტივებით, მაშინ ხარჯი გამოითვლება შემდეგი მეთოდით:

1) განვსაზღვრავთ უდიდეს ზედაპირულ სიჩქარეს, როგორც სამი უმცირესი სვლის ხანგრძლივობის საშუალო არითმეტიკულს;

2) ვიცით რა მდინარის ცოცხალი კვეთის ფართობი, გამოვთვლით ფიქტიურ ხარჯს

$$Q_{ფიქტ.} = v_{ზედ}^{საშ} \omega,$$

რეალური ხარჯი

$$Q = Q_{ფიქტ.} K_2.$$

K_2 გადამყვანი კოეფიციენტის მნიშვნელობა მიახლოებით შეიძლება ავიღოთ ცხრილიდან.

თავი V. ტივტივა ნატანის ხარჯის განსაზღვრა

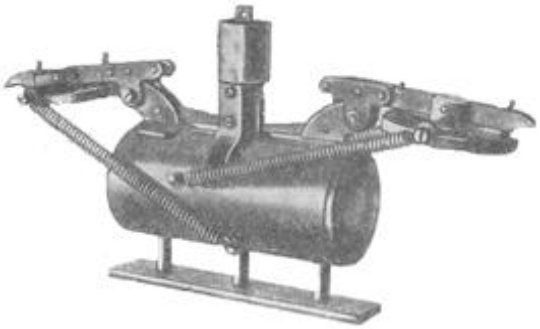
მდინარის წყალი ყოველთვის შეიცავს ამა თუ იმ რაოდენობით მყარ ნაწილაკებს და წყალში გახსნილ ნივთიერებებს. დროის გარკვეულ პერიოდში (ვთქვათ, წელიწადში) წყლის მიერ გადატანილი მყარი ნაწილაკების და წყალში გახსნილი ნივთიერებების რაოდენობას მყარი ჩამონადენი ეწოდება, ხოლო მყარ ნაწილაკებს, რომლებიც წყალს გადააქვს, ნატანს უწოდებენ. ნატანი, თავის მხრივ, იყოფა ტივტივა ნატანად (რომელიც წყალს გადააქვს შეწონილ მდგომარეობაში) და ფსკერულ ნატანად (რომელსაც წყლის ნაკადი გადაადგილებს მდინარის ფსკერზე). ჰიდრომეტრიული სამუშაოების დროს ცალ-ცალკე განსაზღვრავენ ტივტივა ნატანის ხარჯს R(კგ/წმ), ფსკერული ნატანის ხარჯს G (კგ/წმ) და წყალში გახსნილი ნივთიერებების ხარჯს S(კგ/წმ).

ტივტივა ნატანის ხარჯის განსაზღვრა ემყარება წყლის სიმღვრივის განსაზღვრას:

$$\rho = \frac{P_6 \cdot 10^6}{V},$$

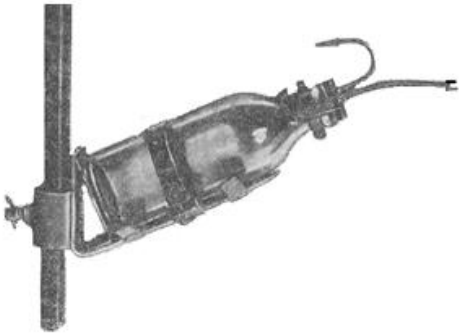
სადაც ρ არის სიმღვრივე, გ/მ³; P_6 – ტივტივა ნატანის წონა სინჯში, კგ; V – წყლის სინჯის მოცულობა, მ³; 10^6 – გადამყვანი კოეფიციენტი.

როგორც ვხედავთ, ტივტივა ნატანის ხარჯის განსაზღვრისათვის საჭიროა ავიღოთ წყლის სინჯი. ხელსაწყოს, რომლის საშუალებითაც ხდება წყლის სინჯის აღება, ბატომეტრი ეწოდება. არსებობს მყისი და ხანგრძლივი მოქმედების ბატომეტრები. თანამედროვე პირობებში გამოიყენება ხანგრძლივი მოქმედების ბატომეტრები. მყისი მოქმედების ბატომეტრებიდან ყველაზე ცნობილია ნ.ჟუკოვსკის ბატომეტრი (ნახ. 5.1) ნაკლოვანებების გამო მას ჰიდრომეტრიაში არ იყენებენ. ხანგრძლივი მოქმედების ბატომეტრებიდან გამოიყენება ბატომეტრ-ბოთლი და ვაკუუმური ბატომეტრი.



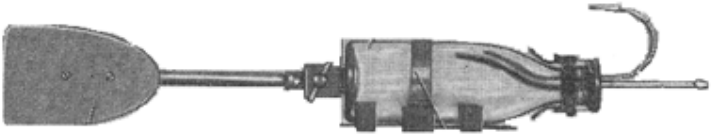
ნახ. 5.1. ჟუკოვსკის ბატომეტრი

ბატომეტრ-ბოთლი შტანგაზე (ნახ. 5.2) 1 ლიტრი მოცულობის ფართოყელიანი ბოთლია, რომელსაც ამაგრებენ შტანგაზე. როდესაც შტანგა ვერტიკალურ მდგომარეობაშია, ბოთლი ჰორიზონტთან ადგენს 30° კუთხეს. ბოთლს უკეთდება ლითონის სახურავი, რომელშიც გადის წყალმიმღები და ჰაერის გამომყვანი მილები. ამ მილებს უკეთდება თავები (ნაცმები), რომელთა დიამეტრი შეირჩევა წყლის მოძრაობის სიჩქარის მიხედვით. წყალმიმღები მილით ბოთლში შედის წყალი და ბოლომოხრილი მილით ბოთლიდან გამოდის ჰაერი. ბოთლით აიღება სინჯი ფსკერიდან 20 სმ სიღრმეზე. წყლის ქვედა ფენებიდან სინჯი არ აიღება. ეს გავლენას ახდენს სიმღვრივის გაზომვის სიზუსტეზე.



ნახ. 5.2. ბატომეტრ-ბოთლი შტანგაზე
1. გამშვები მილაკი; 2. წყალმიმღები მილაკი; 3. სათავისი

მოდერნიზებული ბატომეტრ-ბოთლი (ნახ. 5.3) განსხვავდება სტაბილიზატორის არსებობით, რომლის საშუალებითაც ბატომეტრ-ბოთლი დადგება დინების მიმართულებით. გარდა ამისა მისი ჰორიზონტალური მდებარეობა საშუალებას გვაძლევს ავიღოთ სინჯი ფსკერის სიახლოვეს (10 სმ სიმაღლეზე), მაგრამ წყლის მოძრაობის პატარა სიჩქარის დროს (0.5 მ/წმ) უკეთეს შედეგს გვაძლევს ძველი ბატომეტრი, რადგანაც მოდერნიზებული ბოთლის წყლით შევსება ამ დროს გართულებულია.

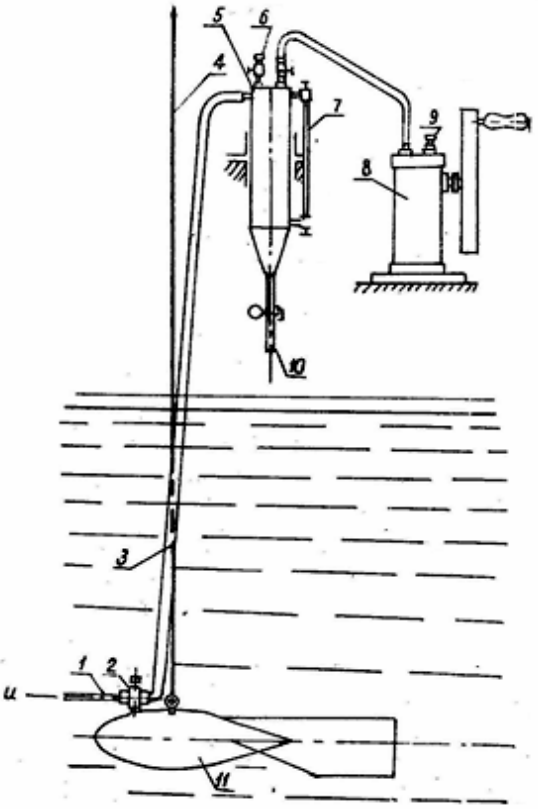


ნახ. 5.3. მოდერნიზებული ბატომეტრი

ვაკუუმური ბატომეტრის (ნახ. 5.4) მოქმედების პრინციპი ემყარება ბატომეტრის კამერაში ვაკუუმის შექმნას, რომლის გავლენით წყალი რეზინის მილის საშუალებით შეიწოვება კამერაში. კამერის მოცულობა 3 ლიტრია. ბატომეტრი ასევე აღჭურვილია სამკაპა ონკანით და ხელის ტუმბოთი, რომლის საშუალებითაც შეიქმნება ვაკუუმი. ვაკუუმის სიდიდე იზომება ვაკუუმმეტრით. საჭირო ვაკუუმი განისაზღვრება წყლის დონიდან კამერის აწევის სიმაღლით. ყველა ხელსაწყოს ახლავს ცხრილი, სადაც აღნიშნულია ვაკუუმის საჭირო მნიშვნელობა კამერის აწევის სიმაღლესა და წყალმიმღებ მილზე წამოცმული ნაცმის მიხედვით. ვაკუუმური ბატომეტრი გამოიყენება 0,2–3,5 მ/წმ სიჩქარის დიაპაზონში. კამერის აწევის სიმაღლე 4მ არ უნდა

აღმატებოდეს. ხელსაწყო კარგ შედეგს გვაძლევს მხოლოდ ღრმა მდინარეებში (2 მეტრი და მეტი), სადაც წყალმიმღები მილი ჩაიშვება სპეციალური შლანგით ან ტვირთით.

-



ნახ. 5.4. ვაკუუმური ბატომეტრი
1–წყალმიმღები მილაკი; 2–შემაკავებელი; 3–რეზინის მილი; 4–გვარლი; 5–ვაკუუმური კამერა; 6–ჰაერის გამოსაშვები ონკანი; 7–წყალსაზომი მინა; 8-ტუმბო; 9–საჰაერო ნახვრეტი; 10–წყლის გამოსაშვები მილაკი; 11–ჰიდრომეტრიული ტვირთი

სიმღვრივის გასაზომად წყლის სინჯის აღებისას იყენებენ წერტილოვან, ჯამურ და ინტეგრაციულ მეთოდებს.

წერტილოვან მეთოდი გულისხმობს სინჯის აღებას საანგარიშო ვერტიკალების გარკვეულ წერტილებში. დეტალური მეთო-

დის დროს სინჯს ვიღებთ (სიჩქარის გაზომვის ანალოგიურად) ხუთ წერტილში ზედაპირთან, 0.2*h*, 0.6*h*, 0,8*h* სიღრმეებზე და ფსკერთან. მცირე სიღრმეების დროს (1მ-ზე ნაკლები) წერტილების რიცხვს ვამცირებთ და ვიყენებთ სამი წერტილის მეთოდს (0,2*h*, 0.6*h* და 0.8*h*), როცა სიღრმე 0.3 მ-ზე ნაკლებია ვიყენებთ ერთი წერტილის (0.6*h*) მეთოდს.

ჯამური მეთოდი მდგომარეობს შემდეგში: წყლის სინჯს ვიღებთ ორ წერტილში (0.2*h* და 0,8*h*), შემდეგ ორივე სინჯს ვათავსებთ ერთ ჭურჭელში და განვსაზღვრავთ ჯამური სინჯის სიმღვრივეს. ეს მეთოდი გამოიყენება მცირე სიმღვრივის დროს (50გ/მ^3). თუ სიმღვრივე 20გ/მ^3 ნაკლებია, მაშინ ცოცხალ კვეთში აღებული ყველა სინჯი ერთ ჭურჭელში ერთიანდება.

ინტეგრაციული მეთოდის დროს წყლის სინჯს ვიღებთ ბატომეტრის ვერტიკალის მთელ სიღრმეზე თანაბარი ჩაშვებითა და აწევით. მისი გამოყენება მიზანშეწონილია წყლის ნაკადის არამდგრადი მოძრაობის დროს, როდესაც ნაკადის ჰიდრავლიკური ელემენტები სწრაფად იცვლება. ამ დროს გაზომვები უნდა ჩატარდეს სწრაფად, რაც მიიღწევა ინტეგრალური მეთოდით. მდინარეში 50 გ/მ^3 ნაკლები სიმღვრივის დროს დასაშვებია ცალკეულ ვერტიკალზე ინტეგრაციის მეთოდით აღებული სინჯების გაერთიანება ერთ ჭურჭელში.

სინჯები ბატომეტრების საშუალებით აიღება შესაბამის წერტილებში სიჩქარის გაზომვის ერთდროულად. სინჯები მიგვაქვს ლაბორატორიაში და განვსაზღვრავთ სიმღვრივეს ფილტრების მეთოდით შემდეგი თანამიმდევრობით: ვიღებთ ქაღალდის ფილტრს, ვაშრობთ და ვწონით ანალიზურ სასწორზე. შემდეგ ვასველებთ სუფთა წყლით და ვაფენთ ძაბრში. ფილტრში ვატარებთ აღებულ სინჯს. ფილტრი და მასზე დალექილი ტივტივა ნაწილაკები შეგვაქვს სპეციალურ ღუმელში და ვაშრობთ 105°C-ზე. მშრალ ფილტრსა და მასზე დარჩენილ ნალექებს ვწონით ანალიზურ სასწორზე. წონათა სხვაობა იძლევა ნატანის წონას, ნატანის წონის და სინჯის მოცულობის ფარდობა კი – სიმღვრივეს. სიმღვრივის გაანგარიშების შედეგები შეგვაქვს ცხრილში, აქვე შეგვაქვს წყლის ხარჯი, ტრიალას საშუალებით ადგილობრივ და ვერტიკალზე გაზომილი საშუალო სიჩქარეთა მნიშვნელობები. სიმღვრივის განსაზღვრის შემდეგ განვსაზღვრავთ ტივტივა ნატანის ხარჯს როგორც ანალიზური, ისე გრაფიკული მეთოდით.

გრაფიკული მეთოდი. ამ მეთოდით შეტივტივებული ნატანის ხარჯის გამოანგარიშებისათვის იყენებენ ცოცხალი კვეთის სიჩქარეთა ვერტიკალების თითოეულ წერტილში აღებული სინჯის

ლაბორატორიული წესით გამოანგარიშებულ წონით მონაცემებს და თითოეული წერტილისათვის გამოითვლიან წყლის სიმღვრივეს შემდეგი ფორმულით:

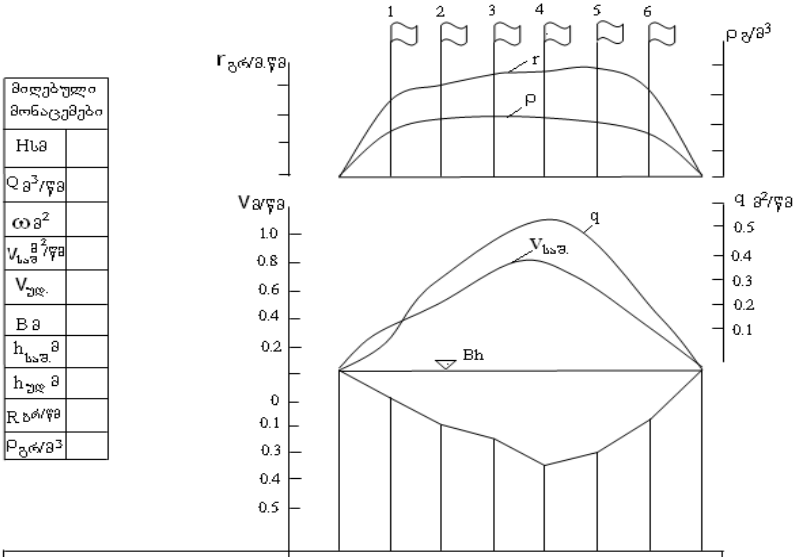
$$\rho = \frac{P_{წ}\, 10^6}{v}\ \text{გ/მ}^3,$$

სადაც $P_{წ}$ არის ნატანი მასალის წონა, გ, v – სინჯის მოცულობა, მლ, 10^6 – მილილიტრების რიცხვი 1მ^3.

ამ ფორმულის მიხედვით ანგარიშობენ ყველა სინჯის სიმღვრივეს, რომლებიც აღებული იყო როგორც წერტილობრივი, ისე ჯამურ და ინტეგრაციული მეთოდით.

შეტივტივებული ნატანი მასალის ხარჯის გრაფიკული მეთოდით გამოანგარიშება წარმოებს იმავე ნახაზზე, რომელზეც წყლის ხარჯი იყო გამოანგარიშებული გრაფიკული ხერხით. ასეთი გამოანგარიშების ხერხი მოყვანილია 5.5 ნახ-ზე. ხარჯის გამოანგარიშება სრულდება შემდეგი თანამიმდევრობით:

1) აგებენ სიმღვრივის ეპიურებს. ამისათვის სიჩქარეთა განაწილების ეპიურაზე გადაზომავენ სიმღვრივეებს. ეპიურაზე მკვეთრად განსხვავებულ წერტილებს მხედველობაში არ იღებენ.
2) ანგარიშობენ ტივტივა ნატანის α გ/მ^{2}წმ ერთეულოვან ხარჯებს. ამისათვის შესაბამის წერტილებში პოულობენ სიჩქარისა და სიმღვრივის ნამრავლს:
$$\alpha = v\rho$$
3) აგებენ ტივტივა ნატანის ერთეულოვანი ხარჯების ეპიურებს.
4) განსაზღვრავენ r გ/მწმ ტივტივა ნატანის ელემენტარულ ხარჯებს. იგი რიცხობრივად ერთეულოვანი ხარჯების ეპიურის ფართობის ტოლია. ფართობს ზომავენ პლანიმეტრებით ან პალეტით მასშტაბების გათვალისწინებით.
5) განსაზღვრავენ r მ^3/წმ ტივტივა ნატანის ერთეულოვანი ხარჯების საშუალო მნიშვნელობებს ვერტიკალებზე. ამისათვის ელემენტარული ხარჯების მნიშვნელობებს ყოფენ ვერტიკალზე წყლის სიღრმეში
$$\alpha_{საშ} = \frac{r}{h}.$$
6) აგებებენ საშუალო ერთეულოვანი ხარჯების ეპიურებს. ამისათვის $\alpha_{საშ}$ მნიშვნელობებს გადაზომავენ სითხის თავისუფალი ზედაპირიდან ყოველ ვერტიკალზე იგივე მასშტაბში, რომლითაც აგებულია α-ს ეპიურები, ყოველი ვერტიკალისათვის მათ მნიშვნელობებს ჩაწერენ ნახაზის ქვემოთ მოთავსებულ ცხრილში.



მიღებული მონაცემები	
Hსმ	
Q მ3/წმ	
ω მ2	
$V_{საშ}$ მ2/წმ	
$V_{უდ.}$	
B მ	
$h_{საშ.}$ მ	
$h_{უდ.}$ მ	
R ხრ/წმ	
ρგრ/მ3	

ვერტიკალის №	
მანძილი საწყისი წერტილიდან, მ	
სიღრმე, მ	
საშუალო სიჩქარე ვერტიკალზე, მ/წმ	
წყლის ხარჯი ვერტიკალზე, მ2/წმ	
ტივტივა ნატანის ერთეული ხარჯი ვერტიკალზე $\alpha=\rho v$	
ტივტივა ნატანის ხარჯი ვერტიკალზე $r=\rho v h$	
სიმღვრიეე ρ, გ/მ3	

ნახ. 5.5. ტივტივა ნატანის ხარჯის გამოთვლა გრაფიკულად

7) აგებენ ელემენტარული ხარჯების ეპიურას. ამისათვის წყლის თავისუფალი ზედაპირის ხაზიდან გადაზომავენ ელემენტარული ხარჯების მნიშვნელობებს. ამ უკანასკნელს ანგარიშობენ $\alpha_{საშ}$ საშუალო ერთეულოვანი ხარჯების გამრავლებით ვერტიკალზე წყლის სიღრმეში, $r = dh\, r$ მნიშვნელობებს ჩაწერენ ნახაზის ქვემოთ მოთავსებულ ცხრილში.
8) განსაზღვრავენ ტივტივა ნატანის ხარჯს, რომელიც რიცხობრივად ელემენტარული ხარჯების განაწილების ეპიურის ფართობის ტოლია. ფართობს ზომავენ პლანიმეტრიით ან პალეტით. ხარჯი იზომება კგ/წმ-ობით.

$$\rho_{\text{საშ}} = \frac{R \cdot 1000}{Q}$$

ფორმულით ანგარიშობენ მდინარეში წყლის საშუალო სიმღვრიავეს.

სადაც R ტივტივა ნატანის ხარჯიაა კგ/წმ;

Q – წყლის ხარჯი, მ^3/წმ;

ρ - გამოისახება გ/მ^3-ებით.

გარდა ამისა, გამოთვლიან თითოეული ვერტიკალისთვის საშუალო სიმღვრიავეს:

$$\rho_{\text{საშ}} = \frac{r}{q},$$

სადაც q წყლის ხვედრითი ხარჯია თითოეულ ვერტიკალზე.

ანალიზური მეთოდი. ტივტივა ნატანის ხარჯი ანალიზურად გამოითვლება სიმღვრივის გასაზომად წყლის სინჯის აღების მეთოდზე დამოკიდებულებით.

სინჯის აღების წერტილოვანი მეთოდის დროს საჭიროა თითოეულ ვერტიკალზე წინასწარ გამოითვალოს ტივტივა ნატანის ერთეულოვანი ხარჯები. ამისათვის, გამოიყენება ვერტიკალზე წყლის საშუალო სიჩქარის საანგარიშო ანალოგიური ფორმულები. ორი წერტილოვანი მეთოდის დროს საშუალო ერთეულოვანი ხარჯი ვერტიკალზე ტოლია:

$$\alpha_{\text{საშ}} = \frac{\alpha_{0.2h} + \alpha_{0.8h}}{2},$$

სადაც $\alpha_{0.2h} = U_{0.2h}\rho_{0.2h}$ და $\alpha_{0.8h} = U_{0.8h}\rho_{0.8h}$.

ერთწერტილოვანი მეთოდის დროს

$$\alpha_{\text{საშ}} = \alpha_{0.6h},$$

სადაც $\boldsymbol{\alpha_{0.6h} = U_{0.6h}\rho_{0.62h}}$.

დეტალური მეთოდის დროს სინჯები აიღება ხუთ წერტილში და საშუალო ერთეულოვანი ხარჯი ვერტიკალზე გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$\alpha_{\text{საშ}} = 0.1\left(\alpha_{\text{ზედ}} + 3\alpha_{0.2h} + 3\alpha_{0.6h} + 2\alpha_{0.8h} + \alpha_{\text{ფსკ}}\right).$$

ტივტივა ნატანის საერთო ხარჯი

$$R = 0.001\left(K\alpha_1\omega_0 + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\omega_1 + \frac{\alpha_2 + \alpha_3}{2}\omega_2 + \frac{\alpha_{n-1} + \alpha_n}{2}\omega_{n-1} + K\alpha_n\omega_n\right).$$

K კოეფიციენტი აიღება ისე, როგორიც წყლის ხარჯის გამოანგარიშების დროს.

თუ სიმღვრივის განსაზღვრისათვის საჭირო წყლის სინჯი აიღება ჯამური ან ინტეგრალური მეთოდით, მაშინ საჭიროა

წინასწარ გამოითვალოს წყლის ნაწილობრივი ხარჯები ვერტიკალებს შორის და ნაწილობრივი ხარჯები პირველ და ბოლო ვერტიკალსა და მდინარის ნაპირებს შორის მოთავსებულ ფართობებში და შემდეგ გამოვთვალოთ ნატანის სრული ხარჯი:

$$R = 0.001\left(\rho_1 Q_0 + \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} Q_1 + \frac{\rho_{n-1} + \rho_n}{2} Q_{n-1} + \rho_n Q_n\right),$$

სადაც ρ_1, ρ_2, ρ_n საშუალო სიმღვრივეა ვერტიკალზე;

Q_0 და Q_n – ნაწილობრივი ხარჯები, შესაბამისად, მარცხენა ნაპირსა და პირველ ვერტიკალს შორის და მოპირდაპირე ნაპირსა და ბოლო ვერტიკალს შორის;

$Q_1 - Q_{n-1}$ – ნაწილობრივი ხარჯები ვერტიკალებს შორის.

ტივტივა ნატანის ხარჯის ფორმულაში საშუალო სიმღვრივის მნიშვნელობებს იღებენ გ/მ^3, ხოლო ნაწილობრივ ხარჯებს მ^3/წმ. ტივტივა ნატანის ხარჯი მიიღება კგ/წმ-ში.

როგორც აღვნიშნეთ, მდინარის საშუალო სიმღვრივე 50 გ/მ^3 ნაკლებია ცალკეულ ვერტიკალებზე. ჯამური ან ინტეგრაციული მეთოდით აღებული სინჯები გავაერთიანოთ ერთ სინჯში, რომელიც ახასიათებს ნაკადის საშუალო სიმღვრივეს, მაშინ ტივტივა ნატანის ხარჯი

$$R = 0.001\rho_{\text{სშ}} \cdot Q.$$

სადაც $\rho_{\text{სშ}}$ ჯამური სინჯის სიმღვრივეა, გ/მ^3; Q – წყლის ხარჯი გ/მ^{3}წმ; R –კგ/წმ.

თავი VI. ფსკერული ნატანის ჩამონადენის გაანგარიშება

§ 6.1. ფსკერული ნატანის სინჯის ასაღები ხელსაწყოები

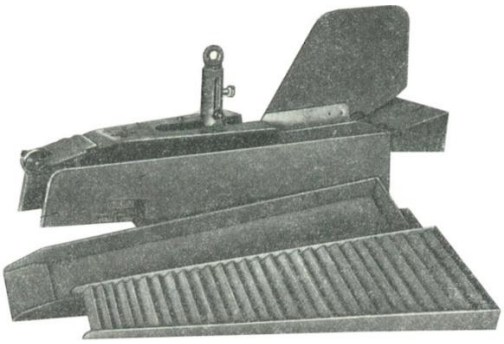
ფსკერული ნატანის ჩამონადენის შესწავლის მიზნით გამოიყენება ნატანის დამჭერი ხელსაწყოები, რომელთაც ფსკერულ ბატომეტრებს უწოდებენ. მათი მოქმედების პრინციპი იმაში გამოიხატება, რომ მათ ათავსებენ კალაპოტის ფსკერზე და გარკვეული დროის განმავლობაში ხდება ფსკერული ნატანის „დაჭერა" ხელსაწყოს შესასვლელი ხვრეტის სიგანეზე. ხელსაწყოს ამოღების შემდეგ განსაზღვრავენ სინჯის მოცულობის წონას და აკეთებენ მის ანალიზს.

ფსკერული ნატანის ბატომეტრები იყოფა ორ ჯგუფად:

1) წვრილი ფსკერული ნატანის (ქვიშა) დამჭერი;

2) მსხვილი ფსკერული ნატანის (ხვინჭკა და ხრეში) დამჭერი.

წვრილი ფსკერული ნატანის დამჭერი ბატომეტრებიდან ძირითადად გამოიყენება „დონი” (ნახ. 6.1). იგი შედგება ორი ძირითადი ნაწილისაგან: გარსაცმი და დამჭერი. დამჭერი არის ხელსაწყოს ის ნაწილი, რომელიც იხსნება და წარმოადგენს 70სმ სიგრძის ბრტყელ ღარს (1), რომელშიც იდგმება გადამღობ-ფირფიტებიანი ჩარჩო (2). ღარის წინა ნაწილი მის შესასვლელ-თან ქმნის ტრამპლინს. ღარის გვერდების ორივე მხარეს გაკეთე-ბული აქვს ორ-ორი ყური, რომლითაც დამჭერი მიმაგრებულია გარსაცმზე (3). ხელსაწყოს წონაა 30კგ. მას უშვებენ ფსკერზე ჯალამბრის საშუალებით. იყენებენ 1.5–2,0 მ/წმ-ში სიჩქარისა და 20მ სიღრმის მდინარეებში.



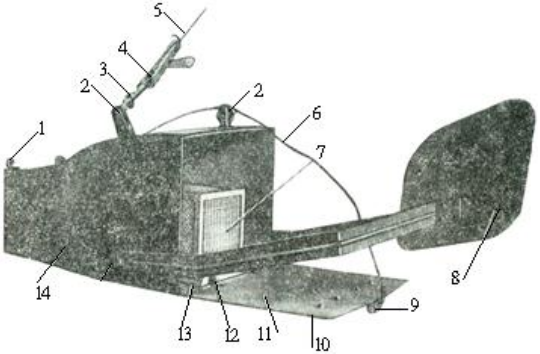
ნახ. 6.1 ბატომეტრი “დონ”

გარსაცმი კოლოფია, რომლის წინა ნაწილში მოწყობილია კარი (4), რომელიც ამოღების პროცესში იხურება. გარსაცმის უკანა კედელზე, ზევით გაკეთებული აქვს გამოსასვლელი ხვრელი, რომელიც ასევე იხურება ამოღების დროს. გარსაცმის ზედა ბრტყელ სახურავზე დამაგრებულია ტვირთი (6). გარსაცმს გაკეთებული აქვს საჭე (7), დინების მიმართულებით ხელსაწყოს დაყენების მიზნით.

ფსკერზე მოთავსების ხანგრძლივობა განისაზღვრება იმ მოსაზრებით, რომ სინჯი, რომელიც იღება გადამღობ ფირფი-ტებს შორის, ღარებში უნდა იყოს 30–500 სმ^3 (50–750გ). ხანგრძ-ლივობა არ უნდა აღემატებოდეს 10 წთ-ს, რადგან თავიდან ავიცილოთ ბატომეტრის ქვემოთ ნატანის გამორეცხვა.

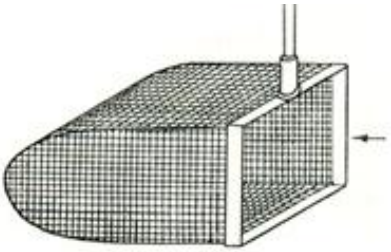
§ 6.2. მსხვილი ფსკერული ნატანის დამჭერი ხელსაწყოები

მსხვილი ფსკერული ნატანის (ხრეში, კენჭი) დამჭერი ხელსაწყოების რამდენიმე სახეობა არსებობს, თუმცა უნივერსალური ხელსაწყო არ გვაქვს. ფართო გამოყენებით სარგებლობს ე.წ. გ.შამოვის ბატომეტრი (ნახ. 6.2). იგი შედგება კორპუსისაგან, ბადიანი ყუთისაგან, გამოსასვლელი ხვრელების სახურავისაგან, საჭისა და ჩამშვებ-ამომწევი მოწყობილობებისაგან. მისი ზომებია: შესასვლელი ხვრელი 20X20 სმ; გამოსასვლელი ხვრელი 43X35 სმ; კორპუსის შიგნით ორ მიმმართველ თამასას შორის ჭანჭიკებით დამაგრებულია ბადიანი ყუთი. ბადის უჯრების სიდიდეს განსაზღვრავს დასაჭერი მასალის დიამეტრი. ბატომეტრს წყალში უშვებენ ჯალამბრისა და ბაგირის საშუალებით. ფსკერული ნატანი შედის შესასვლელი ხვრელიდან, მსხვილი ნატანის (ხრეში, კენჭი) დაჭერა ხდება ბადის საშუალებით, ხოლო ქვიშის დაჭერისათვის მოწყობილია ბადიანი ყუთის ძირში არსებული ქვიშის დამჭერი, რომელიც დახურულია დახრილი სიბრტყით და უკეთდება ჭრილები 1 სმ-ზე ნაკლები დიამეტრის ქვიშის გასატარებლად. ამ ბატომეტრის, როგორც სხვა ბატომეტრების, ნაკლია ის, რომ იგი მჭიდროდ არ იდგმება ფსკერზე რთული რელიეფის პირობებში; ამასთან, გართულებულია მისი გამოყენება იმ დროს, როცა სიჩქარე 1.5–2 მ/წმ აღემატება. რთულია დსკერზე მისი დაყოვნების დროის განსაზღვრა.



ნახ. 6.2. შამოვის ბატომეტრი
1. ასაწევი რგოლები; 2. მიმმართველი ბლოკი; 3. დამჭერი; 4. გვარლის სამაგრის დამჭერი; 5. ჯალამბრის გვარლი; 6. სახურავის გვარლი; 7. ყუთი ბადით; 8. საჭე; 9. დგარი; 10. ტვირთი; 11. გამოსასვლელი ნახვრეტის სახურავი; ბალანი ყუთის სამაგრი ჭანჭიკებით; 13. მიმმართველი; 14. კორპუსი

სახელმწიფო ჰიდროლოგიური ინსტიტუტის ბატომეტრი–ბადე



ნახ. 6.3. ბატომეტრი-ბადე

ეს ხელსაწყო (ნახ. 6.3) განკუთვნილია მსხვილი ხრეშის დაჭერისათვის. შედგება ლითონის ჩარჩოსა და მასზე გაჭიმული მავთულის ბადისაგან. ბადის უჯრედის ზომებს განსაზღვრავენ დასაჭერი ხრეშის ზომებზე დამოკიდებულებით. შესასვლელი ხვრეტის სიგანეა 0.1–0.4მ. მას წყალში უშვებენ შტანგის საშუალებით. მისი ნაკლია ის, რომ ხვრეტის ზომებზე ნაკლები დიამეტრის მასალას ვერ იჭერს.

§ 6.3. ფსკერული ნატანის ხარჯის გაანგარიშება

ფსკერული ნატანის ხარჯს გამოითვლიან ანალიზური მეთოდით, მაგრამ თვალსაჩინოებისათვის, ზოგჯერ გრაფიკული მეთოდითაც განსაზღვრავენ.

შერჩეული მეთოდის მიუხედავად, აუცილებელია წინასწარ ელემენტარული ხარჯების განსაზღვრა. თითოეული ვერტიკალისათვის ის განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$g = \frac{100P_{\text{ფსკ.}}}{tl},$$

$P_{\text{ფსკ.}}$ არის სინჯში ნატანის რაოდენობა, გ; t – ბატომეტრის წყალში ყოფნის დრო, წმ; l – ბატომეტრის შესასვლელი ნაწილის სიგანე, სმ; g – ელემენტარული ხარჯი, გ/წმ.

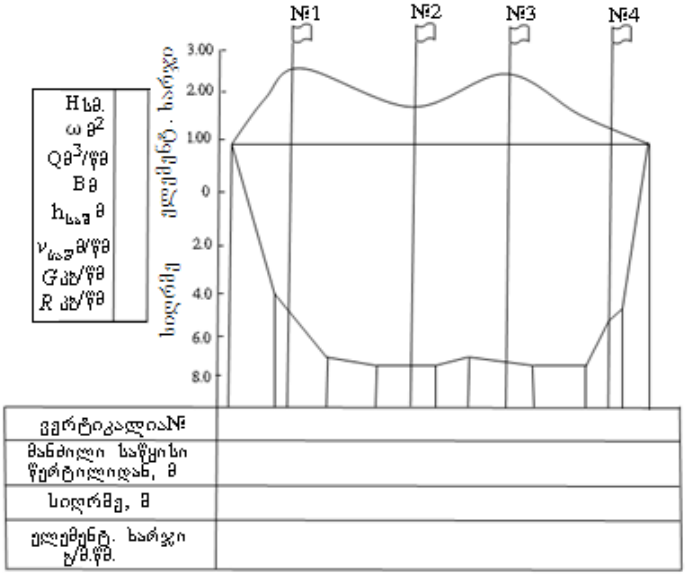
ფსკერული ნატანის მთლიანი ხარჯი გამოითვლება ფორმულით:

$$G = 0{,}001\left(\frac{g_1}{2}b_0 + \frac{g_1+g_2}{2}b_1 + \frac{g_2+g_3}{2}b_2 + \cdots + \frac{g_{n-1}-g_n}{2}b_{n-1} + \frac{g_n}{2}b_n\right),$$

სადაც $g_1 \cdots g_n$ ელემენტარული ხარჯებია ვერტიკალებზე (კალაპოტის 1მ სიგანეზე);

$b_1 \cdots b_{n-1}$ – ვერტიკალებს შორის მანძილი, მ;

b_o და b_n – კიდურა ვერტიკალებსა და წყლის ნაპირებს შორის მანძილი.



ნახ. 6.4. ფსკერული ნატანის ხარჯის გრაფიკული განსაზღვრა

გრაფიკული მეთოდის დროს მდინარის განივკვეთის პროფილზე აგებენ ფსკერული ნატანის ელემენტარული ხარჯების განაწილების ეპიურას (ნახ. 6.4). ელემენტარული ხარჯების განაწილების მრუდით შემოსაზღვრული ფართობი რიცხობრივად ფსკერული ნატანის მთლიანი ხარჯის ტოლია. ფართობი განისაზღვრება პლანიმეტრიით.

უნდა აღინიშნოს, რომ ფსკერული ნატანის ხარჯის გამოსაანგარიშებლად არსებობს მრავალი ემპირიული ფორმულა.

§ 6.4. ფსკერული ნატანის ჩამონადენის გაანგარიშება

ფსკერული ნატანის ჩამონადენის გაანგარიშების მიზნით აგებენ მდინარის ხარჯსა და ფსკერული ნატანის ხარჯს შორის დამოკიდებულების გრაფიკს, რისთვისაც მილიმეტრიან ქაღალდზე – ორდინატთა ღერძზე გადაზომავენ წყლის ხარჯებს Q, ხოლო აბსცისათა ღერძზე ფსკერული ნატანის ხარჯებს G. თუ წერტილები გრაფიკზე დალაგდება მჭიდროდ, მაშინ წერტილებს შორის თვალით გაატარებენ საშუალო მრუდს. იგი ამოზნექილი იქნება ორდინატთა ღერძის მიმართ. მიღებული მრუდიდან წყლის

საშუალო დღიური ხარჯების საშუალებით განსაზღვრავენ ტივტივა ნატანის საშუალო დღიურ ხარჯებს.

თუ წერტილები გრაფიკზე ძალიან გაბნეულია და ერთი მრუდის გატარება შეუძლებელია, მაშინ საჭიროა დატანილი წერტილების გაანალიზება. თუ ფსკერული ნატანის გაზომილი ხარჯები თანაბრადაა განაწილებული წლის განმავლობაში, შეგვიძლია გაზომილ ხარჯებს შორის ინტერპოლაციით განვსაზღვროთ ფსკერული ნატანის ყოველდღიური ხარჯები. ამ დროს საჭიროა, რომ გაზომილ ხარჯებს შორის პერიოდში ფსკერული ნატანის ხარჯი არ იცვლებოდეს.

ამა თუ იმ მეთოდით გაანგარიშებული ფსკერული ნატანის ხარჯების საშუალო დღიური მნიშვნელობები შეგვაქვს წლიურ ცხრილში, რომლითაც ანგარიშობენ წლიურ ჩამონადენს.

ლიტერატურა

1. **Агроскин** И.И., **Дмитриев** Г.Т., **Пикалов** Ф.И. Гидравлика. – М.: Л.: Энергия, 1964. – 352 с.
2. Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б., Байбаков О.В., Кирилловский Ю.Л. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. – 2-е изд. Машиностроение, 1982. – 423 с.
3. Богомолов А.И., Михайлов К.А. Гидравлика. – М.: Стройиздат, 1972. – 648 с.
4. Богомолов А.И., Константинов Н.М., Александров В.А., Петров Н.А. Примеры гидравлических расчетов. – 2-е изд. – М.: Транспорт, 1977. – 526 с.
5. ნ. დანელია. ჰიდრავლიკა (პირველი ნაწილი). თბილისი: განათლება, 1972. – 508 გვ.
6. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. – М.: Машиностроение, 1978. – 463 с.
7. Есьман И.Г., Есьман Б.И., Есьман В.И. Гидравлика и гидравлические машины. – Баку: Азнефтеиздат, 1955. – 479 с.
8. Железняков Г.В. Гидрология и гидрометрия. – М.: Высшая школа, 1981. – 264 с.
9. Киселев П.Г. Гидравлика. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.
10. Константинов Ю.М. Гидравлика. – Киев: Выща школа, 1981. 358 с.
11. Латышенков А.М., Лобачев В.Г. Гидравлика. – М.: Стройиздат, 1971. – 408 с.
12. Леви И.И. Моделирование гидравлических явлений. – 2-е изд. – М.: Л.: Энергия, 1967. – 283 с.
13. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – 5-е изд. – М.: Наука, 1978. – 736 с.
14. Мостков М.А. Гидравлика. – М.: Железнодориздат, 1958. – 347 с.
15. Патрашев А.Н., Кивако Л.А., Гожий С.И. Прикладная гидромеханика. – М.: Изд-во МО СССР, 1970. – 684 с.
16. Рабинович Е.З. Гидравлика. – М.: Недра, 1980. 278 с.
17. Рауз Х. Механика жидкости. – Пер. с англ. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 368 с.
18. Слисский С.И. Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений. – М.: Энергия, 1979. – 336 с.
19. Угинчус А.А., Чугаева Е.А. Гидравлика. – Л.: Стройиздат, 1971. 350 с.
20. ნ. ქუთათელაძე. ჰიდრავლიკის საფუძვლები. თბილისი: განათლება, 1981. – 366 გვ.
21. Чертоусов М.Д. Специальный курс гидравлики. – М.: Л.: Энергия, 1949. – 407 с.
22. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – 4-е изд. – Л.: Энергия, 1982. – 672 с.

23. ა. პაპაშვილი. ჰიდრავლიკა. თბილისი: განათლება, 1988.
24. ზ. გედენიძე, თ. ამბროლაძე. წყლის მეურნეობა. თბილისი: სტუ, 2009.
25. გ. ჟელეზნიაკოვი. ჰიდრომეტრია. განათლება, 1978.
26. ნ. უკლება. ჰიდრომეტრია. თსუ, თბილისი: 1972.
27. Быков В.Д., Васильев А.В. Гидрометрия. Ленинград: Гидрометиздат, 1977.
28. თ. ამბროლაძე. მეთოდური მითითება სასწავლო-ჰიდრომეტრიული პრაქტიკის ჩასატარებლად სამდინარო ნაგებობებისა და ჰიდროელექტროსადგურების და ხიდების და გვირაბების მშენებლობის სპეციალობის სტუდენტებისათვის. თბილისი: სპი-ს სტამბა, 1986.

შინაარსი

თავი I. ჰიდრავლიკის, ჰიდროლოგიისა და ჰიდრომეტრიის საგანი 3
თავი II. საგნის განვითარების მოკლე მიმოხილვა 6

პირველი განყოფილება. ჰიდრავლიკა

თავი III. ჰიდრავლიკა. ზოგადი ცნობები სითხეების შესახებ
§ 3.1. სითხის უმთავრესი ფიზიკური თვისებები 9
§ 3.2. სითხის განსაკუთრებული მდგომარეობა 14
§ 3.3 სითხეზე მოქმედი ძალები 15
§ 3.4. იდეალური და რეალური სითხეები 16

თავი IV. ჰიდროსტატიკა
§ 4.1. ჰიდროსტატიკური წნევა და მისი თვისებები 16
§ 4.2. სითხის წონასწორობის დიფერენციალური განტოლებები (ლ. ეილერის განტოლებები) 20
§ 4.3. სითხის წონასწორობის დიფერენციალურ განტოლებათა ინტეგრირება 22
§ 4.4. თანაბარი წნევის ზედაპირი 25
§ 4.5. ჰიდროსტატიკის ძირითადი განტოლება 25
§ 4.6. მანომეტრული (ჭარბი) წნევა. პიეზომეტრიული სიმაღლე. ვაკუუმი. ჰიდროსტატიკური დაწნევა. ჰიდროსტატიკის ძირითადი განტოლების გეომეტრიული და ენერგეტიკული არსი 26
§ 4.7. სითხის დონის ზედაპირი 30
§ 4.8. ნებისმიერად ორიენტირებულ ბრტყელ ზედაპირზე მოქმედი სითხის წნევის ძალა. წნევის ცენტრი 33
§ 4.9. ჰიდროსტატიკური წნევის ეპიურა 35
§ 4.10. სითხის წნევის ძალის განსაზღვრა მრუდწირულ (ცილინდრულ) ზედაპირებზე 37
თავი V. ჰიდროდინამიკის საფუძვლები
§ 5.1. ჰიდროდინამიკის საგანი 40
§ 5.2. სითხის მოძრაობის აღწერის მეთოდები 42
§ 5.3. სითხის უსასრულოდ მცირე ნაწილაკის მოძრაობა. ცნება გრიგალური და არაგრიგალური მოძრაობის შესახებ 44
§ 5.4. დენის წირი. დენის მილაკი. ელემენტარული ჭავლი 49
§ 5.5. სითხის ნაკადი, ცოცხალი კვეთი, ხარჯი 52
§ 5.6. მოძრავი სითხის უწყვეტობის დიფერენციალური განტოლება 55

§ 5.7. გრიგალური მოძრაობა 58
§ 5.8. პოტენციური (არაგრიგალური) მოძრაობა 60
§ 5.9. იდეალური სითხის მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებები (ლ. ეილერის განტოლებები) 61
§ 5.10. ეილერ-გრომეკას განტოლებები 65
§ 5.11. ბერნულის განტოლება იდეალური სითხის ელემენტარული ჭავლისათვის დამყარებული მოძრაობის შემთხვევაში. მისი გეომეტრიული და ენერგეტიკული ინტერპრეტაცია 67
§ 5.12. რეალური (ბლანტი) სითხის მოძრაობის დიფერენციალური განტოლებები (ნავიე-სტოქსის განტოლებები) 73
§ 5.13. ბერნულის განტოლება რეალური სითხის ელემენტარული ჭავლისათვის დამყარებული მოძრაობის შემთხვევაში 76
§ 5.14. ჰიდროდინამიკური წნევის განაწილება სითხის დამყარებული მდოვრედ ცვალებადი მოძრაობის შემთხვევაში 77
§ 5.15. კინეტიკური ენერგიისა და მოძრაობის რაოდენობის კოეფიციენტები რეალური სითხის ნაკადისათვის 79
§ 5.16. ბერნულის განტოლება რეალური სითხის დამყარებული მდოვრედ ცვალებადი ნაკადისათვის. ჰიდრავლიკური და პიეზომეტრული ქანობი 83
თავი VI. ჰიდრავლიკური წინაღობები
§ 6.1. ზოგადი ცნობები ჰიდრავლიკური წინაღობებისა და დაწნევის დანაკარგების შესახებ 87
§ 6.2. თანაბარი მოძრაობის ძირითადი განტოლება. დაწნევის დანაკარგის ზოგადი დამოკიდებულება თანაბარი მოძრაობისას 88
§ 6.3. რეალური სითხის მოძრაობის რეჟიმები. რეინოლდსის რიცხვითი და მისი კრიტიკული მნიშვნელობა 94
§ 6.4. სითხის მოძრაობის ლამინარული რეჟიმი წრიული კვეთის ცილინდრულ მილსადენში 99
§ 6.5. სითხის ტურბულენტური მოძრაობა. სიჩქარის პულსაცია. მყისი და გასაშუალებული ადგილობრივი სიჩქარეები 103
§ 6.6. მხები ძაბვების ზოგადი გამოსახულება გასაშუალებული ტურბულენტური ნაკადისათვის 106
§ 6.7. ტურბულენტური ნაკადის სტრუქტურა. ჰიდრავლიკურად გლუვი და ხორკლიანი კალაპოტები 109

§ 6.8. გასაშუალებულ სიჩქარეთა განაწილება მილსადენის ცოცხალ კვეთში სითხის ტურბულენტური მოძრაობისას 113
§ 6.9. დაწნევის სიგრძეზე დანაკარგის განსაზღვრა თანაბარი ტურბულენტური მოძრაობისას. ი. ნიკურაძის გრაფიკი 117
§ 6.10. ადგილობრივი წინაღობები. დაწნევის ადგილობრივი დანაკარგების განსაზღვრა ტურბულენტური მოძრაობისას 125
თავი VII. სითხის დამყარებული მოძრაობა სადაწნეო მილსადენებში
§ 7.1. მილსადენებში დაწნევის დანაკარგების გამოსათვლელი საანგარიშო დამოკიდებულებები 130
§ 7.2. დაწნევის დანაკარგების შეკრება. წინაღობის სრული კოეფიციენტები. მოკლე და გრძელი მილსადენების შესახებ 134
§ 7.3. მოკლე მილსადენები 134
§ 7.4. გრძელი მილსადენები 140
თავი VIII. სითხის დამყარებული თანაბარი მოძრაობა ღია კალაპოტებში (არხებში)
§ 8.1. ღია კალაპოტებში სითხის თანაბარი მოძრაობის თავისებურებანი. ძირითადი საანგარიშო დამოკიდებულებები 151
§ 8.2. არხის ცოცხალი კვეთის გეომეტრიული და ჰიდრავლიკური ელემენტები 154
§ 8.3. არხის ჰიდრავლიკურად ხელსაყრელი კვეთი 156
§ 8.4. ტრაპეციული არხების ჰიდრავლიკური გაანგარიშების ძირითადი ამოცანები თანაბარი მოძრაობის შემთხვევაში 159
§ 8.5. არხში წყლის მოძრაობის მინიმალური და მაქსიმალური დასაშვები სიჩქარეები. სიჩქარეთა განაწილება ნაკადის ცოცხალ კვეთში 162
§ 8.6. ჩაკეტილი განივკვეთის კალაპოტების (უდაწნეო მილების) ჰიდრავლიკური გაანგარიშება 165
§ 8.7. ბუნებრივი კალაპოტების გაანგარიშება თანაბარი მოძრაობისას 169
თავი IX. სითხის დამყარებული არათანაბარი მოძრაობა ღია კალაპოტებში
§ 9.1. ზოგადი ცნობები 170
§ 9.2. წყლის არათანაბარი მოძრაობის ძირითადი დიფერენციალური განტოლება 171

§ 9.3. კინეტიკურობის პარამეტრი 175
§ 9.4. პრიზმულ კალაპოტებში წყლის არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლება 176
§ 9.5. კვეთის კუთრი ენერგია. კრიტიკული სიღრმე. კრიტიკული ქანობი 179
§ 9.6. ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ფორმები პირდაპირი ქანობის ($i > 0$) პრიზმულ კალაპოტებში 186
§ 9.7. ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ფორმები ნულოვანი და უარყოფითი ქანობის ($i = 0; i < 0$) პრიზმულ კალაპოტებში 192
§ 9.8. მაჩვენებლიანი დამოკიდებულება ხარჯის მოდულების ფარდობისათვის. კალაპოტის ჰიდრავლიკური მაჩვენებელი 194
§ 9.9. პრიზმულ კალაპოტებში წყლის არათანაბარი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლების ინტეგრირება (ბ. ბახმეტევის მეთოდი) 195
§ 9.10. წყლის მდოვრედ ცვალებადი არათანაბარი მოძრაობა არაპრიზმულ ხელოვნურ კალაპოტებში (არხებში). ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის წირის აგება ბერნულის განტოლებით (ვ. ჩარნიმსკის მეთოდი) 200
§ 9.11. წყლის მოძრაობა ბუნებრივ კალაპოტებში. ზოგადი ცნობები 203
თავი X. ჰიდრავლიკური ნახტომი
§ 10.1. ზოგადი ცნობები. ჰიდრავლიკური ნახტომის კლასიფიკაცია 210
§ 10.2. ჰიდრავლიკური ნახტომის ძირითადი განტოლება 215
§ 10.3. ნახტომის ფუნქცია. შეუღლებული სიღრმეების განსაზღვრა 217
§ 10.4. ჰიდრავლიკური ნახტომისა და ნახტომის მომდევნო უბნის სიგრძე. ენერგიის დანაკარგი ნახტომში 221
§ 10.5. ტალღოვანი ნახტომი (ნახტომი-ტალღა) 222
თავი XI. სითხის გამოდინება ნახვრეტებსა და ნაცმებიდან
§ 11.1. სითხის გამოდინება თხელკედლიანი მცირე ნახვრეტიდან მუდმივი დაწნევისას 223
§ 11.2. სითხის გამოდინება ნაცმებიდან მუდმივი დაწნევისას 231

§ 11.3. სითხის გამოდინება ცვლადი დაწნევისას 237
თავი XII. წყალსაშვები
§ 12.1. ტერმინოლოგია და წყალსაშვების კლასიფიკაცია. წყალსაშვების ძირითადი საანგარიშო ფორმულა .. 239
§ 12.2. თხელკედლიანი წყალსაშვები 245
§ 12.3. ფართოზღურბლიანი სწორკუთხა წყალსაშვები 248
§ 12.4. პრაქტიკული პროფილის სწორკუთხა წყალსაშვები 252
§ 12.5. ირიბი და გვერდითი წყალსაშვები 257
თავი XIII. ბიეფების შეუღლება და შესაუღლებელი ნაგებობები
§ 13.1. ზოგადი ცნობები. წყალსაშვებზე გადადინებული ჭავლის შეუღლება ქვედა ბიეფის ნაკადთან 258
§ 13.2. სიღრმის განსაზღვრა შეკუმშულ კვეთში 262
§ 13.3. ენერგიის ჩაქრობა. წყალსაცემი ჭისა და კედლის გაანგარიშება 263
§ 13.4. ერთსაფეხურიანი ვარდნილის გაანგარიშება 268
§ 13.5. მრავალსაფეხურიანი ვარდნილის გაანგარიშება 274
§ 13.6. სწრაფდენი 279
§ 13.7. კონსოლური წყალსაგდები (ვარდნილი) 285
თავი XIV. ბრუნტის წყლების მოძრაობა
§ 14.1. ზოგადი ცნობები 287
§ 14.2. ფილტრაციის ძირითადი კანონი 291
§ 14.3. გრუნტის წყლების თანაბარი მოძრაობა 296
§ 14.4. გრუნტის წყლების არათანაბარი მოძრაობა 296
§ 14.5. ფილტრაციული ნაკადის თავისუფალი ზედაპირის ფორმები 297
§ 14.6. არათანაბარი მდოვრედ ცვალებადი მოძრაობის დიფერენციალური განტოლების ინტეგრირება (ბრტყელი ამოცანა) 299
§ 14.7. გრუნტის წყლის მოდინება სრულყოფილ სადრენაჟო ჭასთან 301
§ 14.8. გრუნტის წყლის მოდინება სრულყოფილ არტეზიულ ჭასთან 304
§ 14.9. გრუნტის წყლის მოდინება წყალსაკრებ გალერეასთან 305
§ 14.10. ფილტრაცია მიწის კაშხლებზე (ზღუდარებში) 307
თავი XV. ჰიდრავლიკური მოდელირების საფუძვლები
§ 15.1. ზოგადი ცნობები 313
§ 15.2. ჰიდრავლიკურ მოვლენათა მექანიკური მსგავსება 314
§ 15.3. დინამიკური მსგავსების კრიტერიუმები 316

§ 15.4. მითითებები ჰიდრავლიკურ მოვლენათა მოდელირების შესახებ 320
თავი XVI. სითხის დაუმყარებელი მოძრაობა სადაწნეო მილსადენებსა და ღია კალაპოტებში
§ 16.1. ზოგადი ცნობები. სითხის დაუმყარებელი მოძრაობის უმარტივესი შემთხვევა 323
§ 16.2. სითხის დაუმყარებელი მდოვრედ ცვალებადი დაწნევითი მოძრაობა, როცა სითხის კუმშვადობასა და მილსადენის კედლების დეფორმირებას უგულებელვყოფთ 325
§ 16.3. სითხის დაუმყარებელი დაწნევითი მოძრაობა, როცა აუცილებელია სითხის კუმშვადობისა და მილსადენის კედლების დეფორმირების გათვალისწინება. ჰიდრავლიკური დარტყმა 334
§ 16.4. სითხის დაუმყარებელი მდოვრედ ცვალებადი მოძრაობა ღია კალაპოტებში 340
§ 16.5. ჰორიზონტალურ სწორკუთხა კალაპოტში სითხის დაუმყარებელი მოძრაობის უმარტივესი შემთხვევა 345
თავი XVII. ჰიდროტექნიკური ნაგებობები საავტო-მოგზილო გზებზე
§ 17.1. მცირე ზომის ხიდის ნახვრეტის ჰიდრავლიკური გაანგარიშება 348
§ 17.2. საგზაო მილსადენების ჰიდრავლიკური ანგარიში 351

მეორე განყოფილება
მდინარეებისა და წყალსაცავების ჰიდროლოგიური მახასიათებლები
თავი I. ზოგადი ჰიდროლოგია
§ 1.1. წყალბრუნვა ბუნებაში. წყლის ბალანსის განტოლება 360
§ 1.2. ჰაერის ტენიანობა 361
§ 1.3. ნალექები. აორთქლება 362
თავი II. მდინარეები
§ 2.1. მდინარის ქსელი. წყალშემკრები აუზი 364
§ 2.2. მდინარის ხეობა. მდინარის გრძივი პროფილი 366
§ 2.3. მდინარის ნაკადის კინემატიკური თავისებურება 368
§ 2.4. მდინარეთა კვება. მდინარის რეჟიმი. წყლის დონის ცვალებადობა 369
§ 2.5. მდინარის ჩამონადენის მახასიათებელი ელემენტები 371

თავი III. ჰიდროლოგიური გაანგარიშებები
§ 3.1. მდინარის ჩამონადენის ძირითადი სტატისტიკური მახასიათებლების განსაზღვრა 374
§ 3.2. კორელაცია 376
§ 3.3. უზრუნველყოფის მრუდების გამოყენება ჰიდროლოგიაში 377
§ 3.4. მაქსიმალური ხარჯების გაანგარიშება დაკვირვებათა საკმარისი მწკრივის არსებობის შემთხვევაში 381
§ 3.5. მაქსიმალური ხარჯების გაანგარიშება ჰიდრომეტრიულ დაკვირვებათა არარსებობის შემთხვევაში 385
§ 3.6. დაკვირვებათა მინიმალური ხარჯების გაანგარიშება
3.6.1. მინიმალური ხარჯების გაანგარიშება ჰიდრომეტრიულ დაკვირვებათა შედეგების არსებობის შემთხვევაში . 387
3.6.2. მინიმალური ხარჯების გაანგარიშება ჰიდრომეტრიულ დაკვირვების არარსებობის შემთხვევაში 388

მესამე განყოფილება. ჰიდრომეტრია
თავი I. ჰიდრომეტრიის საბანი და ამოცანები 390
§ 1.1. ჰიდრომეტრიული კვეთის შერჩევა და მისი აღჭურვილობა 393
თავი II. წყლის დონე
§ 2.1. წყლის დონის გასაზომი ხელსაწყოები და მოწყობილობანი 395
§ 2.2. წყალსაზომი საგუშაგოს მოწყობის პრინციპები 398
§ 2.3. წყალსაზომი საგუშაგოების ტიპები 400
§ 2.4. მოწყობილობა და ხელსაწყოები მაქსიმალური და მინიმალური დონეების რეგისტრაციისათვის 406
თავი III. სიღრმის გაზომვა 408
თავი IV. მდინარის სიჩქარის გაზომვის მეთოდები და სიჩქარის საზომი ხელსაწყოები
§ 4.1. სიჩქარის განაწილება მდინარეებში 415
§ 4.2. სიჩქარის გაზომვის მეთოდების კლასიფიკაცია 417
§ 4.3. ჰიდრომეტრიული ტრიალა 418
§ 4.4. ჰიდრომეტრიული ტრიალას ტარირება 421
§ 4.5. ჰიდრომეტრიული ტივტივები 422
§ 4.6. სიჩქარის გაზომვა ჰიდრომეტრიული ტრიალას საშუალებით და მდინარის ხარჯის გამოთვლა 425
§ 4.7. ხარჯის გამოთვლის ანალიზური მეთოდი 430
§ 4.8. ხარჯის გამოთვლის გრაფიკული მეთოდი 432
§ 4.9. სიჩქარის გაზომვა და ხარჯის გამოთვლა ზედაპირული ტივტივას საშუალებით 435

თავი V. ტივტივა ნატანის ხარჯის განსაზღვრა 438
თავი VI. ფსკერული ნატანის ჩამონადენის
გაანგარიშება
§ 6.1. ფსკერული ნატანის სინჯის ასაღები ხელსაწყოები ... 446
§ 6.2. მსხვილი ფსკერული ნატანის დამჭერი ხელსაწყოები. 448
§ 6.3. ფსკერული ნატანის ხარჯის გაანგარიშება 449
§ 6.4. ფსკერული ნატანის ჩამონადენის გაანგარიშება 450
ლიტერატურა 452