

მდინარე ვერეს 13.06.2015 წლის წყალმოვარდნა და დახურული  
კალაპოტის ჰიდროდინამიკური პრობლემა

1კერესელიძე ზ., 2შერგილაშვილი გ.

*ი.ჯავახიშვილის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მ.ნოდიას  
გეოფიზიკის ინსტიტუტი  
2შპს ორიონი სტუდია*

**შესავალი.** ნებისმიერი ჰიდროტექნიკური ნაგებობის პროექტი აუცილებლად უნდა შეიცავდეს ობიექტის ექსპლოატაციის სპეციფიკითა და ბუნებრივი გარემო პირობების ცვლილებით გამოწვეული ნეგატიური ჰიდროდინამიკური ეფექტების სრულფასოვან ანალიზს. ცხადია, რომ ამ თვალსაზრისით არ შეიძლება გამონაკლისი ყოფილიყო ვერეს ხეობაში რეალიზებული ჩქაროსნული საავტომობილო მაგისტრალის პროექტი. ამ მშენებლობამ მოითხოვა ხეობის ქვედა ნაწილში მდინარის ბუნებრივი ღია კალაპოტის ცვლილება ხელოვნური დახურული კალაპოტით, რომელიც წარმოადგენს ადრე არსებული ორი გვირაბისა და შვიდი ახალი ერთობლიობას საერთო სიგრძით 2100 მ. ყველა გვირაბი წარმოადგენდა გოფირებული ფოლადისა მილებისა და და რკინაბეტონის ნახევარწრიული თაღების კომბინაციას. ამის შედეგად შეიცვალა ვერეს ბუნებრივი კალაპოტის გეომეტრია და დროთა განმავლობაში წყლმოვარდნების პროცესში ჩამოყალიბებული პოტენციური განივი კვეთი. პროექტის დასრულების შემდეგ დახურული კალაპოტი წარმოადგენდა კომბინირებულ ნაგებობას. კერძოდ, განხრციელდა ძველი გვირაბების მოდერნიზაცია მათი გადაბმით ახალ გვირაბებზე. ამის შედეგად თამარაშვილის მაგისტრალის ქვეშ გამავალი გვირაბის სიგრძემ, საწყისი 108 მეტრის მაგიერ, შეადგინა  $\approx 360$  მ. ასევე, გმირთა მოედნის ქვეშ მტკვრისაკენ გამავალი 700 მეტრი საწყისი სიგრძის მქონე გვირაბი დაგრძელდა  $\approx 500$  მეტრით.

მდინარეებისა და სხვადასხვა დანიშნულების მქონე ჰიდროტექნიკური ობიექტების მსგავსად, ვერეს დახურული კალაპოტის ჰიდროავლიკური პარამეტრების შეფასებისათვის და წყლის ხარჯის დასადგენად საჭიროა გამოვიყენოთ წყალგამტარის კალაპოტის აპროქსიმაცია წრიული კვეთის მქონე მილით. ასეთი მეთოდი იძლევა ჰიდროდინამიკური მსგავსების პრინციპის გამოყენების საშუალებას, რაც განსაკუთრებით მოსახერხებელია რადიალური სიმეტრიის მიახლოებაში. ცნობილია, რომ მილის დიამეტრის ზრდასთან ერთად ჰიდროდინამიკური მსგავსების პრინციპი შეიძლება

დაირღვეს. მაგრამ, თეორიულად შეუძლებელია წრიული მილის დიამეტრის (რადიუსის) კრიტიკული ზომის დადგენა, რადგანაც უცნობია რაოდენობრივი ცვლილების თვისობრივში გადასვლის ზუსტი ჰიდროდინამიკური კრიტერიუმი. თუმცა, ფიზიკური მოსაზრებით, აშკარაა, რომ მილის დიამეტრის ზრდასთან დაკავშირებული ცთომილება შეიძლება გამოწვეული იყოს რამდენიმე მიზეზით. პირველ რიგში, ეს შეიძლება გამოიწვიოს კრიტიკულ მნიშვნელობაზე გაცილებით უფრო დაბალმა წყლის ხარჯმა, ანუ მილის არასრულმა დატვირთვამ. ასეთ შემთხვევაში მილის განივი კვეთის მხოლოდ ქვედა ნაწილში ყალიბდება სასაზღვრო ფენა, რომლის პარამეტრები (სისქე, წყლის სიჩქარის განაწილების პროფილი) ნაკლებად შეესაბამება მილის კვეთის მთელი პერიმეტრის შესაბამისი მრუდი ზედაპირის გარსდენას. ამიტომ, რადიალური სიმეტრია დაირღვევა და მილში დინება დაემსგავსება დინებას ბრტყელი ფუძის მქონე არხში. ეს ეფექტი აუცილებლად არის დაკავშირებული ლამინარული დინების ტურბულენტურში გადასვლის მომენტის მახასიათებელი განუზომელი კრიტერიუმის, რეინოლდსის რიცხვის, სიდიდის ცვლილებასთან. სწორედ ეს რიცხვი წარმოადგენს ჰიდროდინამიკური მსგავსების მთავარ პარამეტრს. თუმცა, მილის არასრული დატვირთვის შემთხვევაში, წყლის ხარჯი იმდენად დაბალი შეიძლება იყოს, რომ ჰიდროდინამიკური მსგავსების პრინციპის დარღვევა საგრძნობი არც აღმოჩნდეს. პრაქტიკაში ხშირად არსებობს წყლის ხარჯის მართვის შესაძლებლობა, მაგალითად, მარეგულირებელი წყალსაცავის საშუალებით, რაც რეალურად ტურბულენტობის დონის რეგულაციის საშუალებას იძლევა. ასეთ შემთხვევაში ჰიდროდინამიკური მსგავსების პრინციპი შეიძლება არც კი დაირღვეს. მაგრამ, მდინარე ვერეს დახურული კალაპოტი წარმოადგენდა არარეგულირებად ჰიდროტექნიკურ ობიექტს. ამიტომ, დახურული კალაპოტის კონსტრუქციის სპეციფიკასთან დაკავშირებული ჰიდრავლიკური რისკების შეფასება მკაცრი თვისობრივ-რაოდენობრივი ანალიზის საშუალებით, სრულიად ბუნებრივი მოთხოვნა იყო. მით უმეტეს, რომ, ვერეს წყალშემკრები აუზის ჰიდროლოგიურ პარამეტრებზე მრავალწლიანი დაკვირვებების მონაცემებიდან გამომდინარე, არსებობდა ძლიერი წყალმოვარდნის პერმანენტური მოლოდინი. ამ შემთხვევაში რთული წარმოსადგენი არ უნდა ყოფილიყო, რომ დახურულ კალაპოტს ექსტრემალურ პირობებში გარდაუვლად მოუწევდა მუშაობა სრული დატვირთვით. ამავე დროს ცნობილია, რომ განვითარებული ტურბულენტობის რეჟიმში მილის სრული დატვირთვა სულაც არ ნიშნავს მის მაქსიმალურ გამტარუნარიანობას. სწორედ ამის დადასტურებას ემსახურება 2015 წლის 13 ივნისის კატასტროფული წყალმოვარდნის ჩვენს მიერ წარმოდგენილი ანალიზი.

**ვერეს დახურული კალაპოტის კონსტრუქციული თავისებურება.** ასეთი ტიპის დახურული კალაპოტის ძირითად მზიდ კონსტრუქციას წარმოადგენს თალი, რომლის მახასიათებელ თავისებურებას წარმოადგენს საყრდენებზე, ვერტიკალურის გარდა, თარაზული განმბჯენი ძალების გადაცემა და ძირითადად კუმშვაზე მუშაობა. კალაპოტის აგებისას გამოიყენება შემდეგი ტექნოლოგია: გოფრირებული ფოლადის მონაკვეთები ეყრდნობა რკინაბეტონის

საძირკველს, მონტაჟდება რკინაბეტონის პორტალები. შემდეგ კალაპოტი ზემოდან, საკმაოდ რთული ტექნოლოგიით, იტკეპნება სპეციალური გრუნტით. ამრიგად, სამონტაჟო სამუშაოების დამთავრების შემდეგ მკუმშავ ძალებს მთლიანად იღებს გრუნტი და გოფირებული ფოლადი მხოლოდ ლოკალური დამცველი ყალიბის ფუნქციას ასრულებს. ამ ტიპის თაღვანი გვირაბები და ხიდები, თავისი ტექნიკურ-ეკონომიკური მონაცემებით, არ ჩამოუვარდება ანალოგიური გაბარიტების ქვის, რკინაბეტონისა და ლითონის ხიდებსა და გვირაბებს. ამიტომ, მშენებლობის დაბალი ღირებულების, ნაკლები შრომატევადობის, ტექნოლოგიის სიმარტივისა და სამშენებლო-სამონტაჟო სამუშაოების წარმოების შედარებით მცირე დროის გამო, კონსტრუქციები, რომლებშიც გამოყენებულია გოფირებული ფოლადი, ნაკლებად მდიდარი ქვეყნებისათვის ზოგადად მისაღებია. გარდა ამისა, გოფირებული ფოლადის თაღვანი გვირაბებსა და ხიდებს გააჩნიათ გარკვეული უპირატესობა სეისმურად საშუალოდ აქტიურ რაიონებში, რაც განპირობებულია მათი უნარით მყისიერად არ ჩამოზღვავდნენ და საკმაოდ ნელა ჩაიშალონ (ჩაწვეწ) ძლიერი და ხანგრძლივად მოქმედი მიწისძვება ბიძგების შემთხვევაში. სამშენებლო პრაქტიკაში რღვევის ასეთი ფორმა ხშირად გადაძწყვეტ როლს თამაშობს კონსტრუქციების შერჩევისას, რადგანაც თითქმის გამორიცხავს ფატალურ შედეგს. მაგრამ, მკვეთრად უარყოფითად უნდა შეფასდეს ის ფაქტი, რომ 7-8 ბალიანი მიწისძვრის შემდეგ გოფირებული ფოლადის თაღვანი გვირაბებისა და ხიდების აღდგენა პრაქტიკულად შეუძლებელია. ამიტომ, მიუხედავად იმისა, რომ მსგავსი ტექნოლოგიით სხვადასხვა ნაგებობები საკმაოდ დიდი რაოდენობით არის აშენებული მთელს მსოფლიოში, მათი სიგრძე ჩვეულებრივ მცირეა. როგორც წესი, მათ იყენებენ მდინარეებისა და ხევების გადაკვეთისათვის და არა ბუნებრივი კალაპოტების საკმაოდ დიდ დისტანციაზე გვირაბებში მოსაქცევად.

**ვერეს დახურული კალაპოტის ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობისა და გამტარუნარიანობის მოდელირება.** როგორც უკანასკნელმა კატასტროფულმა წყალმოვარდნამ აჩვენა, ვერეს დახურული კალაპოტის კონსტრუქცია ტექნიკურად საკმარისად სრულყოფილი არ აღმოჩნდა ექსტრემალური დატვირთვის შემთხვევაში. კერძოდ, ასეთი ხარვეზი, დიდი ალბათობით, გამოიწვია კალაპოტის ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის კრიტიკულმა გაზრდამ. ამ ნეგატიური ეფექტის არსში გარკვევისათვის მოვახდინოთ მდინარის კალაპოტის აპროქსიმაცია წრიული კვეთის მქონე მილით, რაც იძლევა ექსტრემალურ პირობებში წყლის ხარჯის ცვლილების შეფასების საშუალებას.

გამოვიყენოთ ლამინარული დინების მიახლოება და მილის სიმეტრიის ღერძი გავაიგივოთ დინების ცენტრალურ დენის წირთან. ბრტყელ-პარაბოლური, ან ცენტრალური სიმეტრიის მქონე, ლამინარული დინების შემთხვევაში ნებისმიერი დენის წირის გასწვრივ სამართლიანია ბერნულის განტოლება, რომელიც ამყარებს ანალიზურ კავშირს დინების დინამიკურ და სტატიკურ პარამეტრებს შორის. ეს განტოლება მნიშვნელოვნად მარტივდება მუდმივი ჰიდროსტატიკური წნევის შემთხვევაში [1]

$$p + \frac{\rho v^2}{2} = const , \quad (1)$$

სადაც  $p$  - წნევა,  $\rho$  - წყლის სიმკვრივე.  $v$  - წყლის დინების მყისიერი სიჩქარე.

ლამინარული დინების მიახლოებაში საკმარისად მკაცრად სამართლიანია წყლის ხარჯის განმსაზღვრელი ხაგენ-პუაზეილის ფორმულა

$$Q = \frac{\pi R^4 (P_1 - P_2)}{8\eta L} , \quad (2)$$

სადაც  $R$  - მილის რადიუსია,  $\eta$  - წყლის დინამიკური სიბლანტის კოეფიციენტი.  $L$  - სიგრძე. წყლის ხარჯის გარდა, საჭიროების შემთხვევაში ამ ფორმულიდან შესაძლებელია მილის განივ კვეთაში დინების მყისიერი სიჩქარის განაწილების პროფილის განსაზღვრა.

რადგანაც ლამინარულ მიახლოებაში სითხის დინების სტრუქტურა რეგულარულია (ფენოვანი), ერთი დენის წირიდან მეორეზე გადასვლა, ან დინების საწყისი პირობების ცვლილება, ნიშნავს (1) ტოლობაში მუდმივის სიდიდის ცვლილებას. აქედან გამომდინარეობს, რომ  $\Delta p \sim \Delta \frac{\rho v^2}{2}$ , რაც საკმარისად კორექტულია ლამინარული სტრუქტურის ნაწილობრივ აღრევის შემთხვევაშიც, რასაც ადგილი აქვს ტურბულენტური დინების განვითარების საწყის ეტაპზე. თუმცა, ტურბულენტური დინების დროს სითხის მყისი სიჩქარე უნდა შეიცვლოს საშუალო ჰიდროდინამიკური სიჩქარით.

ტურბულენტური დინებისათვის მილში წყლის ხარჯის მკაცრად განმსაზღვრელი ფორმულა არ არსებობს. ამიტომ, მიახლოებითი რაოდენობრივი შეფასებებისათვის გამოიყენება ფორმულა, რომელშიც მონაწილეობს ტურბულენტური დინების საშუალო სიჩქარე  $\bar{u}$

$$Q = \pi R^2 \bar{u} . \quad (3)$$

ერთგვაროვანი ლამინარული დინების დროს წნევათა სხვაობა მილის ერთეულოვან სიგრძეზე (წნევის გრადიენტი) მუდმივია:  $\Delta P/L$ . ეს პარამეტრი პირდაპირ უკავშირდება მხებ ძაბვას, რომელიც მოქმედებს ლამინარული სტრუქტურის შემადგენელ პარალელურად მოძრავი სითხის ფენებს შორის. ბლანტი სითხის ლამინარული დინების დროს მხები ძაბვა მაქსიმუმს აღწევს მილის კედელზე და გამოიხატება გამოსახულებით:  $\tau_0 = \frac{P_1 - P_2}{L} \frac{R}{2}$ . მხები ძაბვის ეს ფორმულა, ტურბულენტური დინების შემთხვევაში, ხაგენ-პუაზეილის ფორმულის მსგავსად, ტრანსფორმაციას განიცდის, რადგანაც ტურბულენტურ სითხეში წნევათა სხვაობის ცვლილება მილის რადიუსის გარდა, დაკავშირებულია ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის კოეფიციენტთან  $\lambda$  [1,2]

$$\frac{P_1 - P_2}{L} = \frac{\lambda \rho}{4R} \bar{u}^2 . \quad (4)$$

ამ ფორმულიდან გამომდინარეობს, რომ ტურბულენტური დინების დროს მხები ძაბვა მილის შიდა ზედაპირზე დამოკიდებულია სითხის საშუალო სიჩქარის კვადრატზე

$$\tau_0 = \frac{\lambda}{8} \rho \bar{u}^2 . \quad (5)$$

(4) ფორმულის საშუალებით შეიძლება აგრეთვე ხაგენ-პუაზილის (2) ფორმულის მოდიფიკაცია ტურბულენტური დინებისათვის

$$Q = \frac{2\pi R^3 \lambda}{\nu} \bar{u}^2 , \quad (6)$$

სადაც  $\nu = \eta/\rho$ - სითხის (წყლის) სიბლანტის კინემატიკური კოეფიციენტი.

ერთი შეხედვით, (6) ფორმულის პრაქტიკული ღირებულება, (3)-თან შედარებით, უფრო მაღალია, რადგანაც ის მილის ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის ცხადი სახით წარმოჩინების საშუალებას იძლევა. მაგრამ, როდენობრივი შეფასებებისათვის (6) გამოსახულების არაკორექტულმა გამოყენებამ შეიძლება მცდარ დასკვნამდე მიგვიყვანოს. კერძოდ, ქვემოთ მოყვანილი იქნება გამოსახულება (9), როგორც (6)-ის გამარტივებული ვარიანტი. ეს ფორმულა, თითქოს და, საკმაოდ შესაფერისია ექსტრემალურ პირობებში მილის გამტარუნარიანობის შეფასებისათვის. მაგრამ, ასეთი მოსაზრების სანდოობის დასადგენად საჭიროდ მიგვაჩნია ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის განმსაზღვრელი ცალკეული ფაქტორების მოკლე ფიზიკური ანალიზი.

მილში სითხის დინების ნებისმიერი რეჟიმის დროს რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობა განისაზღვრება მილის განივი კვეთის დიამეტრის საშუალებით:  $Re = \frac{\bar{u}D}{\nu}$ . ლამინარული დინების შემთხვევაში მილის ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობა ემორჩილება ბლაზიუსის კანონს:  $\lambda \approx 0.32 (Re)^{-1/4}$ . ასეთი დამოკიდებულება ზოგადად სამართლიანია ტურბულენტური დინების დროსაც. თუმცა, ამ შემთხვევაში შეიძლება წარმოჩინდეს დამატებითი ფიზიკური ფაქტორი, რომელს მოქმედების ეფექტურობა დამოკიდებულია მილის შიდა ზედაპირის სიგლუვის ხარისხზე. ამიტომ, გარსდენადი ზედაპირის ხაოიანობას განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება, როგორც მილის წინააღმდეგობის განმსაზღვრელ ერთერთ მნიშვნელოვან ფაქტორს. საზოგადოდ, გარსდენადი ზედაპირების ხაოიანობის ნეგატიური ეფექტის როდენობრივი შეფასება წარმოადგენს ექსპერიმენტალური ჰიდროდინამიკის საგანს. კერძოდ, მილის შიდა ზედაპირის ხაოიანობის პრობლემა საკმარისი სისრულით არის გამოკვლეული როგორც თეორიულად, ასევე პრაქტიკულად [1,2]. მაგალითად, მილების შიდა ზედაპირის ხაოიანობა შესაძლებელია განაპირობოს როგორც მასალის სპეციფიკამ, ასევე სიგლუვის ხარისხმა. შიდა ზედაპირის უხეში დამუშავების გარდა, ხაოიანობა შეიძლება გამოიწვიოს აგრეთვე სითხის მიერ ტრანსპორტირებული მყარი სუბსტანციის დალექვამ მილის კედლებზე, რომელიც შეიძლება გააძლიეროს მილის არასწორხაზოვნმა გეომეტრიამ. თეორიის თანახმად, ნებისმიერი ფორმის (ოთხკუთხა, ოვალური, მრგვალი) კვეთის მქონე მილის ხაოიანობის ხარისხს განსაზღვრავს ერთი პარამეტრი:  $\beta = k/L_0$ , სადაც  $k$  ხაოიანობის სიმაღლეა,  $L_0$  -

მილის განივი კვეთის მახასიათებელი ზომა. ცხადია, რომ წრიული კვეთის მქონე მილის შემთხვევაში ეს პარამეტრი მილის რადიუსის ტოლია. ნებისმიერი სხვა ფორმის კვეთის მქონე წყალსადინარის შემთხვევაში მისი მახასიათებელი ხაზოვანი ზომა იქნება ე.წ. ჰიდრავლიკური რადიუსი:  $R_h$ . პრაქტიკაში არსებობს სხვადასხვა ტიპის ხაოიანობა. მაგალითად, ხაოიანობის განსაკუთრებით გავრცელებულ ფორმას წარმოადგენს ქვიშის არაერთგვაროვანი ნალექი მილის კედლებზე. ასეთი ტიპის ხაოიანობა შესაძლებელია დროთა განმავლობაში წარმოიქმნას თავდაპირველად საკმაოდ გლუვი მილის ექსპლუატაციის პროცესში. საზოგადოდ, ნებისმიერ ჰიდროტექნიკურ ობიექტზე, პრაქტიკულად ყველგან, მეტ-ნაკლებად მოქმედებს ხელოვნური ხაოიანობის ფაქტორი, გამოწვეული გარსდენადი ზედაპირების სიგლუვის დაბალი ხარისხით. ასეთმა ტექნიკურმა დეფექტმა, ნალექთან კომბინაციაში, შეიძლება გამოიწვიოს, მაგალითად, მილების შიდა ზედაპირის ტალღისებურობა. ამ ტიპის ხაოიანობის ფაქტორის ნეგატიურ ეფექტს ცხადად წარმოაჩენს ამონარდი გ.შლიხტინგის კლასიკური მონოგრაფიიდან [1, გვ. 564] “ მიუხედავად იმისა, რომ ქვიშა ითვლებოდა ყველაზე უფრო მისაღებად სხვადასხვა ტიპის ხაოიანობის მოდელირებისათვის, ზოგ შემთხვევაში შეუძლებელი აღმოჩნდა ტექნიკური ხაოიანობის შედარება ქვიშოვან ხაოიანობასთან, რომელიც გამოიყენებოდა ლაბორატორიული ექსპერიმენტების დროს. კერძოდ, ქალაქ ეკერტალის წყალმომარაგების მილებში აღმოჩენილი იქნა სპეციფიკური ხაოიანობა, რომელმაც გამოიწვია მილის წინააღმდეგობის განსაკუთრებული ზრდა. ამ ხაოიანობის მიზეზით 500 მმ დიამეტრის მქონე მილებში წყლის ხარჯი 50% მეტად შემცირდა. როგორც გამოკვლევამ აჩვენა, თავდაპირველად გლუვი მილების შიდა კედლებზე წარმოიქმნა ტალღისებური დანალექი ფენა, რომლის რგოლები განლაგებული იყო დინების პერპენდიკულარული მიმართულებით. ამ რგოლების სიმაღლე იყო:  $k = 0.5$  მმ, ანუ გეომეტრიულმა ხაოიანობამ შეადგინა:  $k/R = 10^{-3}$ . ასეთივე ეფექტის მისაღებად, ანუ, ქვიშისებური ხაოიანობის შემთხვევაში, წყლის ხარჯის 50%-ით შემცირებისათვის აუცილებელი წინააღმდეგობის უზრუნველსაყოფად, საკმარისი იყო გეომეტრიული ხაოიანობის ზომა ყოფილიყო ინტერვალში:  $1/40 \leq k/R \leq 1/20$ . ეს შემთხვევა გვიჩვენებს რომ, ტალღისებური ხაოიანობა იწვევს მილის წინააღმდეგობის გაცილებით უფრო დიდ ზრდას, ვიდრე იგივე სიმაღლის მქონე ქვიშისებური ხაოიანობა”. საინჟინერო პრაქტიკაში ფარდობითი ხაოიანობა მერყეობს 0.2%-7% ინტერვალში. ამიტომ, რადგანაც ვერეს დახურული კალაპოტის ექვივალენტური მილის დიამეტრია:  $D \approx 8 * 10^3$  მმ, მისი გვირაბებისათვის შესაძლებელია კრიტიკული ყოფილიყო  $\approx 20$  მმ აბსოლუტური ზომის (სიმაღლის) ხაოიანობა. მაგრამ, ასეთი მახასიათებელი ზომა გაცილებით უფრო ნაკლებია, ვიდრე გვირაბების კონსტრუქციაში გამოყენებული ფოლადის ზედაპირის გოფრირების სიმაღლე:  $k=150$  მმ. ამიტომ, ასეთი პარამეტრების მქონე გოფრირებული ზედაპირი, როგორც თვისობრივად, ასევე რაოდენობრივად, წარმოადგენს ხელოვნური ხაოიანობის თვალსაჩინო მაგალითს.

საზოგადოდ, მილის შიდა ზედაპირის ხაოიანობის ნეგატიური ეფექტის რაოდენობრივი შეფასებისათვის უნდა არსებობდეს დინებისა და მილის პარამეტრების ხაოიანობასთან

დამაკავშირებელი ფორმულა. ასეთი კავშირის ანალიზურად განსაზღვრა საკმარისად რთული აღმოჩნდა. ამიტომ, ამ პრობლემის გადაწყვეტა მოხერხდა მხოლოდ ემპირიულ დონეზე, ლაბორატორიული მოდელების გზით, რაშიც განსაკუთრებული წვლილი მიუძღვის ქართველ ფიზიკოს-ექსპერიმენტატორს ი. ნიკურაძეს. მის მიერ ჩატარებულმა, კლასიკურად მიჩნეულმა, ექსპერიმენტებმა დაადასტურეს, რომ ლამინარული დინების რეჟიმში (ხაგენ-პუაზეილის დინება) გარსდენად ზედაპირზე აუცილებლად წარმოიქმნება ლამინარული სასაზღვრო ფენა. ასეთ შემთხვევაში ხაოიანობა პრაქტიკულად არ ახდენს გავლენას დინებაზე. ეს ნიშნავს, რომ ხაოიანი მილის ჰიდრაავიკური წინააღმდეგობა ისეთივეა, როგორც გლუვის. ცნობილია, რომ გარკვეული სისქის ლამინარული სასაზღვრო ფენა ყალიბდება აგრეთვე ტურბულენტური დინების შემთხვევაშიც. ამიტომ, ზოგჯერ, ხაოიანი მილი შეიძლება ტურბულენტური დინებისათვისაც ჰიდრაავიკურად გლუვი აღმოჩნდეს. ამისათვის საკმარისია, რომ მილის შიდა ზედაპირზე წარმოქმნილი ლამინარული სასაზღვრო ფენის სისქე აღემატებოდეს ხაოიანობის სიმაღლეს. ტურბულენტური დინების შემთხვევაში ლამინარული სასაზღვრო ფენის სისქე დამოკიდებულია სითხის კინემატიკურ სიბლანტეზე და ზედაპირული წინააღმდეგობის ძაბვასთან დაკავშირებულ პარამეტრზე, ე.წ დინამიკურ სიჩქარეზე:  $v_*$ . ამიტომ, ამ შემთხვევაში, ჩვეულებრივ რეინოლდსის რიცხვთან ერთად, აგრეთვე შემოდის ხაოიანობის ეფექტის განმსაზღვრელი მეორე უგანზომილებო პარამეტრი:  $Re_* = \frac{kV_*}{\nu} \sim \frac{k}{\delta_l}$ . დადგენილია, რომ არსებობს რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობათა გარკვეული დიაპაზონი, რომლისთვისაც ტურბულენტური დინების შემთხვევაშიც კი ხაოიანი მილი ისევე იქცევა, როგორც ჰიდრაავიკურად გლუვი. როგორც აღვნიშნეთ, ამ დროს მილის წინააღმდეგობა  $\lambda$  არის მხოლოდ  $Re$ -ს ფუნქცია. დაწყებული რეინოლდსის რიცხვის რაღაც მნიშვნელობიდან, რომელიც მცირდება გეომეტრიული ხაოიანობის ზრდისას, ხაოიანი მილის წინააღმდეგობა იზრდება. ამ დროს ტურბულენტობის ხარისხი მალდება და, შესაბამისად, ყალიბდება დინების ახალი რეჟიმი, რომლის პირობებში ლამინარული სასაზღვრო ფენა მხოლოდ ნაწილობრივ ფარავს ხაოებს მილის ზედაპირზე. ამის გამო  $\lambda$  დამოკიდებული ხდება როგორც  $Re$ -ზე, ასევე  $Re_*$ -ზე. ამ პროცესის განვითარების შედეგად, საბოლოოდ,  $\lambda$  გახდება მხოლოდ  $Re_*$ -ს ფუნქცია, რომელიც ასახავს ჰიდრაავიკური წინააღმდეგობის კოეფიციენტის არაწრფივ (კვადრატულ) დამოკიდებულებას გეომეტრიულ ხაოიანობაზე.

ამრიგად, ხაოიან მილებში შესაძლებელია დამყარდეს დინების სამი რეჟიმი:

1.  $\lambda = \lambda(Re)$ . დინება ხაოიანობის გამოვლინების გარეშე, ანუ როცა ხაოიანობის სიმაღლე ლამინარული სასაზღვრო ფენის სისქეზე ნაკლებია ( $\frac{k}{\delta_l} < 1$ ). ამ რეჟიმის რაოდენობრივი კრიტერიუმია:  $0 \ll Re_* = \frac{kV_*}{\nu} \leq 5$ ;
2.  $\lambda = \lambda(Re, Re_*)$ . დინების გარდამავალი რეჟიმი ( $\frac{k}{\delta_l} \approx 1$ ). კრიტერიუმი:  $5 \leq Re_* \leq 70$ ;

3.  $\lambda = \lambda(R_e)$ . ხაოიანობის სრული გამოვლინების რეჟიმი ( $\frac{k}{\delta_l} > 1$ ). ამ შემთხვევაში ხაოიანობის ყველა ელემენტი გამოდის ლამინარული სასაზღვრო ფენიდან და მილის ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობა კვადრატული კანონით იცვლება

$$\lambda = \frac{1}{(2 * l g \frac{R}{k} + 1.74)^2} . \quad (7)$$

სწორედ ეს ნახევრად ემპირიული ფორმულით განისაზღვრული დამოკიდებულება წარმოადგენს ჰიდრავლიკის ერთერთ ქვაკუთხედს.

იმ შემთხვევაში, თუ მილი მრუდწირულია, მასში აღიმკრებიან ცენტრიდანული ძალები, რომლებიც იწვევენ ლამინარული დინების დესტაბილიზაციას. ამ ეფექტის ძალა, მისი კვეთის რადიუსის გარდა, დამოკიდებულია აგრეთვე მილის სიმრუდის რადიუსზე. კერძოდ, არსებობს რადიუსის კრიტიკული სიდიდე, რომლის შემდეგ მილში მოძრავ სითხეში ლოკალურად შეიძლება განვითარდეს სპეციფიკური ტიპის არამდგრადობა. ეს ნიშნავს, რომ მილის მრუდწირულ უბანზე წარმოიქმნება მსხვილმამტაბოვანი გრიგალური სტრუქტურები, რაც წყალში უკუდინების არსებობას ნიშნავს. ამ ეფექტს გამოსახავს შესაბამისი ნახევრად ემპირიული ფორმულა [1,2]

$$\frac{\lambda_r}{\lambda_0} = 1 + 0.075 R_e^{1/4} \left(\frac{R}{r}\right)^{1/2} , \quad (8)$$

სადაც  $\lambda_0$  – გლუვი სწორხაზოვანი მილის წინააღმდეგობის კოეფიციენტი,  $r$ –მრუდწირული უბნის სიმრუდის რადიუსი.

ამრიგად, თუ მილი ხაოიანია, ხოლო მისი მრუდწირული უბანის სიმრუდე საკმარისად დიდია, დინების ტურბულენტურ რეჟიმში ერთდროულად იმუშავებს მილის ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის ზრდის ხელშემწყობი ორივე ფაქტორი. კერძოდ, მათი არსებობა ვერეს უკნასკნელი წყალმოვარდნის შემთხვევაში ჩვენში ეჭვს არ იწვევს. მათთან ერთად, ვერეს დახურულ კალაპოტში დამატებით მოქმედებდა წყლის ხარჯის შემამცირებელი კიდევ ერთი ფაქტორი, განსაკუთრებით ძლიერი ტურბულენტური ფონი.

ვერეს დახურული კალაპოტის პირველი გვირაბის სიმრუდე, მისი რეკონსტრუქციის შემდეგ, ვიზუალურად აშკარად გაიზარდა. მაგრამ, ჩვენთვის ეს სიდიდე, ჩქაროსნულ გზის უბნის პროექტთან არწვდომის გამო, ზუსტად უცნობია. ასეთი ვითარების გამო დასაშვებად მიგვაჩნია პირველი გვირაბის ჰიდრავლიკურ წინააღმდეგობაში სიმრუდის ეფექტის წვლილის მიახლოებითი შეფასება მშენებლობის მარეგლამენტირებელი ნორმატიული ნესების მოთხოვნათა საშუალებით. კერძოდ, არსებობს ნებისმიერი ჰიდროტექნიკური გვირაბებისათვის დასაშვები სიმრუდის ზღვრული მნიშვნელობა, რომელიც, გვირაბის პარამეტრების გარდა, დამოკიდებულია აგრეთვე წყლის დინების სიჩქარეზე. მაგალითად, საბჭოთა პერიოდში მოქმედი სამშენებლო ნორმების აქტუალიზირებული რედაქციის მიხედვით, როცა:  $V_{max} \approx 10$  მ/წმ, დასაშვებია მაქსიმალური ფარდობითი მრუდწირულობა:  $\frac{R}{r} \approx 0.17$ . ამასთან, გვირაბის მრუდწირული სექტორის კუთხური ზომა არ უნდა



აღმატებოდეს  $60^\circ$  [4]. გამოვიყენოთ ეს შეზღუდვა და გავითვალისწინოთ, რომ როცა ლამინარული დინების მდგრადობა თეორიულ ზღვარს აღწევს ( $R_e \sim 10^5$ ), უკვე ამიტომ სწორხაზოვანი მილის ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობა  $\lambda_0$  მნიშვნელოვნად იზრდება ( $\approx 70\%$ ) იგივე მილში მაქსიმალურად მდგრად ( $R_e \sim 10^3$ ) ლამინარულ დინებასთან შედარებით [1,2]. მაგრამ, ექსტრემალურ პირობებში ვერეს დახურული კალაპოტის მახასიათებელი რეინოლდსის რიცხვის სიდიდე ( $R_e \approx 2 * 10^7$ ) გაცილებით აღმატება სიდიდეს, რომელიც შეესაბამება ლამინარული დინების თეორიულ ზღვარს. ამრიგად, შეფასება უნდა ჩატარდეს გლუვი სწორხაზოვანი მილის ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის კოეფიციენტის მაქსიმუმისათვის. სწორედ ამ სიდიდესთან მიმართებაში (8) ფორმულიდან გამოდის, რომ, როცა  $\frac{R}{r} \approx 0.17$ , დახურული კალაპოტის მააპროქსიმირებელი მილის ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის კოეფიციენტი თითქმის 3-ჯერ უნდა გაიზარდოს მხოლოდ პირველი გვირაბის სიმრუდის გამო. მდგრადობის თეორიის თანახმად ეს ჰიდრაულიკური ეფექტი შეიძლება უფრო ძლიერიც იყოს [5,7].

შემდგომი ანალიზისათვის გამოვიყენოთ მდინარე ვერეს დაკვირვების რეტროსპექტიული მონაცემები, რომლებიც მოპოვებული იყო ი.ჯავახიშვილის უნივერსიტეტის ჰიდროლოგიურ სადგურში 1962 წლიდან. კერძოდ, განსაზღვრულია წყლის ხარჯი ბოლო ნახევარი საუკუნის პერიოდში მომხდარი ვერეს ყველა სერიოზული წყალმოვარდნის დროს. თუმცა, ინტენსივობის თვალსაზრისით დღემდე ექსტრემალურად ითვლება 1960 წლის 4 ივლისის წყალდიდობა, როცა პირდაპირი ჰიდროლოგიური დაკვირვება ვერეს ხეობაში ჯერ კიდევ არ სწარმოებდა. მიღებულია შეფასება, რომ წყლის მაქსიმალური ხარჯი აღნიშნული წყალმოვარდნის დროს დაახლოებით 2.5 საათის განმავლობაში შეადგენდა:  $Q_{max} \approx 320 \text{ მ}^3/\text{წმ}$ . თუ დავუშვებთ, რომ თამარაშვილის მაგისტრალის ქვეშ გამავალი გვირაბი (მიწისქვეშა ხიდი), რომლის კვეთის ფართობი:  $S \approx 50 \text{ მ}^2$ , ამ წყალმოვარდნის დროს პრაქტიკულად სრულად იყო დატვირთული, (3) ფორმულიდან მივიღებთ:  $V_{max} \approx 6 \text{ მ}/\text{წმ}$ . შემდგომში, არსებული მონაცემებით,  $Q \geq 100 \text{ მ}^3/\text{წმ}$  წყლის ხარჯის მქონე წყალმოვარდნა ვერეს ხეობაში კიდევ მრავალჯერ დაფიქსირდა. ცხადია, რომ, თუ ამ წყალმოვარდნის პარამეტრებს გამოვიყენებთ რომელიმე სხვა წყალმოვარდნის მოდელური ანალიზისათვის, საჭირო იქნება გარკვეული რაოდენობრივი საფუძველის არსებობა.

ბუნებრივია, რომ მდინარის კალაპოტში კატასტროფული წყალმოვარდნის შედეგად გაზრდილი წყლის ხარჯის ცვლილების მკაცრი რაოდენობრივი საზღვრის დადგენა შეუძლებელია დინების მყისერი სიჩქარის გარეშე. თუმცა, ამ პარამეტრის ცოდნის განსაკუთრებული აუცილებლობა არ არსებობს, რადგანაც უწყვეტი დაკვირვების პირობებში შესაძლებელია მყისი სიჩქარის ცვლილება საშუალო სიჩქარით. მრავალწლიანი დაკვირვებათა მონაცემების საფუძველზე დადგინდა, რომ ვერეს საშუალო წლიური ხარჯი შეადგენს:  $\bar{Q} \approx 1 \text{ მ}^3/\text{წმ}$ , ხოლო დინების საშუალო სიჩქარე მდინარის ხეობის ქვედა მონაკვეთზე:  $\bar{u} \approx 3.5 \text{ მ}/\text{წმ}$ . 1960 წლის წყალმოვარდნის დროს დინების მაქსიმალური სიჩქარის ჰიპოთეტიკური სიდიდიდან და შემდგომში მომხდარი წყალმოვარდნების შესაბამისი

მაქსიმალური წყლის ხარჯიდან გამომდინარე, შეიძლება დავუშვათ, რომ ექსტრემალურ პირობებში ვერეს დინების სიჩქარე იცვლება ინტერვალში:  $6 \text{ მ/წმ} \leq V_{max} < 10 \text{ მ/წმ}$ . ყველა ამ შემთხვევაში, როგორც წესი, მდინარის ბუნებრივი კალაპოტი ფართოვდებოდა და ვერეს ჭალა მეტ-ნაკლებად იტბორებოდა. ეს მოვლენა, რომელიც საკმარისად ხშირად მეორდებოდა სხვადასხვა მასშტაბით, მნიშვნელოვნად იყო გამოწვეული ვერეს კალაპოტის დაბალი სიმაღლით. ამიტომ, ასეთი კალაპოტიდან გადმოდინების შემდეგ, მნიშვნელოვნად იზრდებოდა წყლის ზედაპირის სარკე, რაც პირდაპირ კავშირში არ იყო გმირთა მოედნის ქვეშ გამავალი უკანასკნელი გვირაბის გამტარუნარიანობასთან.

რადგანაც 2015 წლის 13 ივნისის წყლმოვარდნის ზუსტი ჰიდროლოგიური პარამეტრები არ გაგვაჩნია, შეგვიძლია დავუშვათ, რომ უკანასკნელი კატასტროფული წყალმოვარდნა 1960 წლის 4 ივლისის მოვლენის თანაზომადი იყო ინტენსივობის თვალსაზრისით. რეტრო შემთხვევაში ღვარცოფის მიერ ჩამოტანილი მასის მოცულობა, ირიბი შეფასებების თანახმად, სავარაუდოდ, უნდა ყოფილიყო:  $W = Q_{max} * T \approx 2.88 * 10^6 \text{ მ}^3$ . მიუხედავად იმისა, რომ ამ წყალმოვარდნის ასეთი მასშტაბი ჩვენ გადაჭარბებულად მიგვაჩნია, აღნიშნული სავარაუდო მოცულობა შეიძლება საორიენტაციო სიდიდედ მივიჩნიოთ იმ შემთხვევაში, თუ გადაწყდება მდინარე ვერეს ხეობაში მარეგულირებელი რეზერვუარის მშენებლობა. თუმცა, თუ ვერე დაუბრუნდება ბუნებრივ კალაპოტს, ხოლო მისი ჭალა სრულიად განთავისუფლდება ურბანისტული დატვირთვისაგან, მარეგულირებელი წყალსაცავის შექმნის გადაუდებელი საჭიროება ალბათ არ იარსებებს. ამ მოსაზრების განმამტკიცებელი მთავარი არგუმენტია ფაქტი, რომ ადრე გაკეთებულ გვირაბებს საკმარისი გამტარუნარიანობა გაჩნდათ 2015 წლამდე მომდარი ყველა მასშტაბური წყალმოვარდნის შემთხვევაში. ამიტომ, გვაქვს საფუძველი ვივარაუდოთ, რომ ძველი გვირაბებისაგან განსხვავებით, ვერეს დახურული კალაპოტის ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობა, როგორც სჩანს, სათანადოდ არ იყო შეფასებული. უნდა აღინიშნოს, რომ რთული ჰიდროდინამიკური დინების მათემატიკური მოდელირება, როგორც წესი, მოითხოვს გარკვეულ გამამარტივებელ ფიზიკურ დაშვებებს. მრავალ პარამეტრზე დამოკიდებულ ამოცანაში ასეთი დაშვებების კორექტულობა განაპირობებს თეორიული შეფასებების სანდოობას. ასეთი განცხადების საფუძვლიანობის დასადასტურებლად განვიხილოთ მოდელი, რომელიც თვისობრივად თითქოს და, სრულიად ესადაგება ექსტრემალური პარამეტრების მქონე დინებას. კერძოდ, ჰიპოთეტიური წყალმოვარდნის შემთხვევაში მაქსიმალური წყლის ხარჯის შესაბამისად (6) ფორმულის საფუძველზე დავადგინოთ ვერეს დახურული კალაპოტის მაპროქსიმირებელი მილის რადიუსის ცვლილება. ამისათვის განვიხილოთ დინების ორი რეჟიმი: ექსტრემალური და საშუალო პარამეტრების მქონე. როგორც აღნიშნეთ, წყალმოვარდნის დროს დინების სიჩქარის ზრდის გამო გარდაუვალად ხდებოდა ვერეს ბუნებრივი კალაპოტის განივი კვეთის ფართის გაზრდა. ამ ეფექტის რაოდენობრივი შეფასებისათვის შემოვიტანოთ ვერეს კალაპოტის განივი კვეთის ცვლილების ფორმ-ფაქტორი, რომელიც გამოვიყენოთ (6) ფორმულის გასამარტივებლად. თუ დავუშვებთ, რომ ექსტრემალური პირობები გავლენას არ ახდენენ მილის ჰიდრაულიკურ წინააღმდეგობაზე და წყლის სიბლანტის კინემატიკურ კოეფიციენტის

მუდმივობის გამო, წყალმოვარდნით გამოწვეული წყლის ხარჯის ფარდობითი ცვლილებას განსაზღვრავს გამოსახულება

$$\frac{Q_{max}}{Q} \approx \left(\frac{R_{max}}{R}\right)^3 \frac{V_{max}^2}{V^2} \approx \alpha \frac{V_{max}^2}{V^2} . \quad (9)$$

(9) ფორმულის თანახმად, დამხმარე პარამეტრი,  $\alpha$  ფორმ-ფაქტორი (მოცულობათა აბსტრაქტული ფარდობა), წარმოადგენს წარმოსახვითი საშუალო და ექსტრემალური დინების შესაბამისი მაპროქსიმირებელი მილების რადიუსების არაწრფივ ფარდობას. ეს განუზომელი პარამეტრი დამოკიდებულია მხოლოდ ორი ჰიდროლოგიური მახასიათებლის, წყლის ხარჯისა და დინების სიჩქარის, ფარდობით ცვლილებაზე. მაგალითად, 1960 წლის 4 ივლისის წყალმოვარდნისათვის:  $\frac{Q_{max}}{Q} \approx 300$ . ამ ექსტრემალური მოვლენის დროს დინების მაქსიმალური სიჩქარე სავარაუდოდ იცვლებოდა ინტერვალში:  $6 \text{ მ/წმ} \leq V_{max} \leq 10 \text{ მ/წმ}$ . მრავალწლიანი დაკვირვებებით, ვერეს დინების საშუალო სიჩქარე:  $\bar{V} = 3.5 \text{ მ/წმ}$ . ამრიგად, მოდელური შეფასებებისათვის გვექნება დინების სიჩქარის ფარდობითი ცვლილების ინტერვალი:  $1.7 \leq \frac{V_{max}}{\bar{V}} \leq 2.85$ . შესაბამისად, (9) ფორმულის მიხედვით, ვერეს კალაპოტის მაპროქსიმირებელი მილის განივი კვეთის ფორმ-ფაქტორის ცვლილების შუალედი იქნება:  $37 < \alpha < 104$ . ვერეს დინების მრავალწლიანი საშუალო სიჩქარეს შეესაბამება საშუალო წყლის ხარჯი:  $\bar{Q} \approx 1 \frac{\text{მ}^3}{\text{წმ}}$ . აქედან გამომდინარე, ვერეს კალაპოტის მაპროქსიმირებელი მილის საშუალო რადიუსი:  $\bar{R} \approx 0.3$  ფარდობითი სიჩქარის ცვლილების ზედა ზღვრული სიდიდეა:  $\frac{V_{max}}{\bar{V}} = 2.85$ . (9) ფორმულიდან გამომდინარეობს, რომ ამ დროს მაქსიმალური წყლის ხარჯისათვის ( $Q_{max} \approx 300 \text{ მ}^3/\text{წმ}$ ) ვერეს ბუნებრივი კალაპოტის მაპროქსიმირებელი მილის რადიუსი საკმარისია იყოს:  $R_{1max} \approx 0.98 \text{ მ}$ . ქვედა ზღვრული სიდიდისათვის, ანუ როცა  $\frac{V_{max}}{\bar{V}} = 1.7$ , შესაბამისად გვექნება:  $R_{2max} \approx 1,9 \text{ მ}$ . ამრიგად, თუ დავუშვებთ, რომ 2015 წლის 13 ივნისის წყალმოვარდნის დროს წყლის ხარჯი:  $Q_{max} \approx 300 \text{ მ}^3/\text{წმ}$  ტოლი იყო, (9) ფორმულის თანახმად ვერეს დახურული კალაპოტის კვეთის ფართი სრულიად საკმარისი უნდა ყოფილიყო ღვარცოფული ნაკადის გასატარებლად. თუმცა, ამ კატასტროფული მოვლენის განვითარების სურათიდან გამომდინარე, აშკარაა, რომ ასეთი დასკვნა მცდარია, ხოლო განხილული მოდელი-რეალური მოვლენის არაადექვატური. გამოდის, რომ ის დაშვებები, რომლებიც საფუძვლად უდევს ამ მოდელს, ფიზიკურად გაუმართლებელია. ამიტომ, განვიხილოთ მეორე, უფრო კორექტული მოდელი, რომელიც, ჩვენი შეხედულებით, პირველ მოდელთან შედარებით გაცილებით უფრო ახლოს არის რეალობასთან. კერძოდ, ამ მოდელში ცხადი სახით მონაწილეობს ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობა, რომლის სიდიდე პირდაპირ არის დამოკიდებული დახურული კალაპოტის დატვირთვის დონეზე. ვერეს ნორმალური დინების დროს, ანუ ნაკლებად დატვირთული დახურული კალაპოტის შემთხვევაში, დინება მის გვირაბებში ბრტყელი ზედაპირის გარსდენის მსგავსია. ასეთი დინების დროს დახურული კალაპოტის ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის გამომწვევი

მთავარი ფაქტორია ბეტონის იატაკის ( და არა კედლების) ხაოიანობა. ეს ნიშნავს, რომ ნორმალური დინების შემთხვევაში დასაშვებია გვირაბის კედლების გოფირებული ზედაპირის ნეგატიური ეფექტის უგულვებელყოფა. ამიტომ, შეიძლება ითქვას, რომ ჩვეულებრივ პირობებში გოფირების ფაქტორს არ შეეძლო მნიშვნელოვანი გავლენა მოეხდენა გვირაბებში წყლის დინების სტრუქტურაზე. მაგრამ, სავარაუდოდ, დიამეტრალურად განსხვავებული ვითარება უნდა შეიქმნილიყო ექსტრემალურ პირობებში, როცა ვერეს დახურული კალაპოტი მაქსიმალურად სრულად დაიტვირთებოდა. ამიტომ, (6) ფორმულის მაგივრად, მეორე მოდელისათვის გამოვიყენოთ (3) ფორმულა, თანაც მხედველობაში მივიღოთ გოფირებული ზედაპირის ხაოიანობა და დახურული კალაპოტის მაპროქსიმირებელი მილის მრუდწირული გეომეტრია. ადიტიურობის პრინციპიდან გამომდინარე სავარაუდოა, რომ ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის ეფექტის ჯამური გამოვლინება დახურულ კალაპოტში სადღაც მაინც მოხდებოდა, შესაძლოა არაერთგზის. ამიტომ, მეორე მოდელის მიხედვით, მაპროქსიმირებელი მილის სრული ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის კოეფიციენტი წარმოადგენს ჯამს:  $\lambda = \lambda_r + \lambda_k$ . ჯამური ეფექტის თვალსაზრისით განსაკუთრებით ალბათურად მიგვაჩნია დახურული კალაპოტის პირველი გვირაბი. სწორედ აქ უნდა მოხდარიყო ყველა ცალკეული ნეგატიური ფაქტორის სუპერპოზიცია დინების ექსტრემალური რეჟიმისათვის დამახასიათებელი განსაკუთრებით ძლიერი ტურბულენტობის ფონზე. ყოველივე ამას არ შეიძლება არ მოეხდინა გავლენა დახურული კალაპოტის გამტარუნარიანობაზე. შეიძლება სწორედ ამიტომ გახდა გარდაუვალი ღვარცოფული ნაკადის შეგუბება მაგალითად, მეორე და უკანასკნელი გვირაბების წინ, რასაც კატასტროფული შედეგები მოჰყვა.

ამრიგად, მეორე მოდელის ანალიზურ ბაზისს წარმოადგენს წლის ხარჯის (3) ფორმულა, რომელშიც დინების საშუალო სიჩქარე წრფივად შედის. ამ პარამეტრის განსასაზღვრა შესაძლებელია შემდეგი გამოსახულების საშუალებით [6]

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{4R\Delta p}{\lambda \rho l}} \quad , \quad (10)$$

სადაც-  $\lambda = \lambda_r + \lambda_k$ .

ზემოთ მიღებული შეფასების თანახმად, ვერეს დინების ექსტრემალურ რეჟიმში სიმრუდით გამოწვეული დახურული კალაპოტის ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის კოეფიციენტის ფარდობითი ცვლილება:  $\frac{\lambda_r}{\lambda_0} \approx 3$ . როგორც ავლნიშნეთ, ეს სიდიდე შეესაბამება, მაგალითად, პირველი გვირაბის სიმრუდის ზღვრულად დასაშვებ სიდიდეს.  $\lambda_0$  წარმოადგენს გლუვი სწორხაზოვანი მილის ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის კოეფიციენტს, რომელიც განისაზღვრება ი. ნიკურადის ცნობილი ნახევრად ემპირიული ფორმულით

$$\lambda_0 = 0.0032 + \frac{0.221}{R_e^{0.237}} \quad . \quad (11)$$

რადგანაც ვერეს დახურული კალაპოტის მახასიათებელი რეინოლდსის რიცხვი:  $R_e \approx 2 * 10^7$ , (11)-დან გვექნება:  $\lambda_0 \approx 0.73 * 10^{-2}$ , ანუ, (8) ფორმულის თანახმად:  $\lambda_r \approx 0.022$ .

მრგვალი მილის შიდა ზედაპირის ხაოიანობით გამოწვეული წინააღმდეგობისათვის არსებობს ფორმულა [6]

$$\lambda_k = \frac{1.3}{\ln^2\left(\frac{R}{k}\right)} \quad (12)$$

რადგანაც ვერეს დახურული კალაპოტის გოფირებული სექციის გეომეტრიული ხაოიანობა:  $\frac{R}{k} \approx 26.6$  ( $R \approx 4\text{მ}$ ,  $k \approx 0.15\text{მ}$ ), (12)-იდან მივიღებთ:  $\lambda_k \approx 0.12$ . ამრიგად, მივიღებთ ვერეს დახურული კალაპოტის შემდეგ სრულ მოდელურ კოეფიციენტს:  $\lambda \approx 0.14$ . ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის ეფექტის სავარაუდო რაოდენობრივი შედეგის განსასაზღვრავად დავუშვათ, რომ წყლის ხარჯი ერთნაირია ორ, განსხვავებული  $R_1$  და  $R_2$  რადიუსების მქონე, გლუვ სწორხაზოვან და მრუდწირულ ხაოიან მილებში. იმ შემთხვევაში, თუ წნევის გრადიენტი ორივე მილში ერთნაირია, რისი დაშვებაც ფიზიკურად კორექტულია, (3) ფორმულიდან ,(10) გამოსახულების გათვალისწინებით, მივიღებთ

$$\frac{Q_1}{Q_2} = 1 = \frac{R_1^2}{R_2^2} \sqrt{\frac{R_1 \lambda}{R_2 \lambda_0}} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^{2.5} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{1/2} \quad (13)$$

(13) გამოსახულებიდან, წინააღმდეგობის ჯამური კოეფიციენტის ზემოთ განსაზღვრული სიდიდისათვის, მივიღებთ მრუდწირული ხაოიანი და სწორხაზოვანი გლუვი მილების რადიუსების შემდეგ ფარდობას:  $\frac{R_2}{R_1} \approx 1.8$ . ამრიგად, წყლის ერთნაირი ხარჯის უზრუნველსაყოფად ხაოიანი მრუდწირული მილის კვეთის ფართი მნიშვნელოვნად უნდა აღემატებოდეს გლუვი მილის კვეთის ფართს:  $S_2 \approx 3.24 S_1$ . ეს ნიშნავს, რომ ერთნაირი კვეთის ფართის მქონე გლუვი და ხაოიანი მრუდწირული მილების გამტარუნარიანობა, ანუ პოტენციალური (მაქსიმალური) წყლის ხარჯი, მნიშვნელოვნად განსხვავებულია. კერძოდ, ამ მოდელის ფარგლებში ექსტრემალურ პირობებში წყლის ხარჯი სწორხაზოვან გლუვ მილში დაახლოებით სამჯერ მეტი შეიძლება ყოფილიყო, ვიდრე ხაოიან მრუდწირულ მილში. ეს ნიშნავს, რომ თუ ასეთი ორი მილი ერთმანეთზეა გადაბმული, პირველის სრული დატვირთვა გარდაუვლად გამოიწვევს მეორე მილის ნაწილობრივ ჩაკეტვას.

ზემოთ მიღებული შეფასებები შეიძლება შეიცავდნენ გარკვეულ რაოდენობრივ ცდომილებას, რადგანაც, როგორც აღვნიშნეთ, ვერეს დახურული კალაპოტის მაპროექსირებელი მილის დიამეტრი იმდენად დიდია, რომ მისთვის დასაშვებია ჰიდროდინამიკური მსგავსების პრინციპის გარკვეულ ფარგლებში დარღვევა. მიუხედავად ამისა, რომ ჩატარებული მოცემული მოდელური ანალიზის კორექტულობა განსაკუთრებულ ეჭვს არ უნდა იწვევდეს, რამდენადაც რაოდენობრივი შეფასებებისათვის გამოყენებულია თეორიული ჰიდროდინამიკის კლასიკური ფორმულები.

**მდინარე ვერეს დახურული კალაპოტის ჰიდროდინამიკური პრობლემა.** ვერეს (სიგრძე  $\approx 45$  კმ, ვარდნის სიმაღლე  $\approx 1290$  მ.), როგორც ყველა სხვა მთის მდინარეს, პერიოდულად ძლიერი წყალმოვარდნები ახასიათებს. ამ მდინარის ხეობის ქვედა ნაწილში ისედაც რთულმა რელიეფმა ბოლო დროს განიცადა განსაკუთრებული ურბანული დაწოლა, რამაც

გარკვეულწილად შექმნა კატასტროფის წინაპირობა. ამან თავი იჩინა 2015 წლის 13 ივლისის ღამეს, როცა თავსხმა წვიმის სახით მოსულმა,  $h \approx 100-150$  მმ, ნალექმა 3-4 საათის განმავლობაში გამოიწვია ვერეს სწრაფი ადიდება. თავდაპირველად წყალი დაგუბდა პირველი გვირაბის წინ, რამაც გამოიწვია სვანიძის ქუჩის აქამდე არნახული მასშტაბის დატბორვა. ამის შემდეგ დატბორვა მოხდა ვერეს ხეობის უკანასკნელ მონაკვეთზე, ანუ თამარაშვილის მაგისტრალსა და ზოოპარკს შორის. მიგვაჩნია, რომ წყალდიდობის გამომწვევი მიზეზების კორექტული ანალიზისათვის უმნიშვნელოვანესია ფაქტი, რომ არ მოხდა წყლის გადადინება სვანიძის ქუჩიდან თამარაშვილის მაგისტრალზე, რომელმაც წყალგამყოფის როლი შეასრულა. ეს ფაქტი უცილობლად ნიშავს, რომ თამარაშვილის მაგისტრალსა და ზოოპარკს შორის წყალდიდობა მოხდა სვანიძის ქუჩაზე წარმოქმნილი წყლის რეზერვუარისაგან დამოუკიდებლად. აქ წყლის სიმაღლემ მოიმატა დაახლოებით 8-10 მეტრით. წყლის ასეთი მატება არ შეიძლება გამოწვეული ყოფილიყო მხოლოდ ამ ტერიტორიის შესაბამისი წყალშემკრების ქმედებით. როგორც სჩანს, გვირაბებმა ვერ გაატარა ქვა-ღორღითა და მყარი საგნებით გაჯერებული ღვარცოფული მასა იმ ზომით, რაც შეესაბამებოდა მათ გამტარუნარიანობას შიდა ზედაპირის იდეალური სიგლუვისა და ნულოვანი სიმრუდის შემთხვევაში. ამის დადასტურებაა მეორე წყალგამყოფი, რომლის ფუნქცია შეასრულა მზიურის ტერიტორიაზე გამავალი ვაკე-საბურთალოს შემაერთებელი გზის მონაკვეთმა, ანუ მესამე გვირაბის თავზე გამავალმა ხიდმა. ამ ადგილის შემდეგ კვლავ მოხდა წყლის შეგუბება ისეთ დონეზე, რომ წყალმა მთლიანად გადარეცხა დატკეპნილი გრუნტი შემდგომი გვირაბის თავზე და მას მოგლიჯა ფოლადის სექცია. ასეთი რამ კიდევ განმეორდა უკანასკნელი გვირაბის წინ. ეს ფაქტი სრულიად საკმარისად მიგვაჩნია რათა განვაცხადოთ, რომ წყალმოვარდნის კატასტროფული შედეგები გამოიწვია არა მარტო ანომალური ინტენსივობის ნალექმა, არამედ აგრეთვე ვერეს კომბინირებული დახურული კალაპოტის ჰიდრაულიკურმა წინააღმდეგობამ. ექსტრემალურ პირობებში ამ ფაქტორმა, როგორც სჩანს, განსაკუთრებით გაამძიერა ჰიდროდინამიკური ტურბულენტობის ეფექტი, რამაც გამოიწვია დახურული კალაპოტის ნაწილობრივი ჩაკეტვა, ანუ მისი გამტარუნარიანობის მკვეთრი შემცირება.

ტურბულენტობის მოვლენა, რომლის მოქმედებას ხშირ შემთხვევაში ნეგატიური შედეგები მოაქვს, სისტემატურად ვლინდება ბუნებასა და ტექნიკაში. ყველგან, ბუნებაში და ტექნიკურ ობიექტებზე, არსებობს ტურბულენტობის გაძლიერების ხელშემწყობი სხვადასხვა სპონტანური ან რეგულარული მიზეზი. მაგალითად, ტურბულენტობა ჰაერსა და წყალში წარმოადგენს თვითმფრინავებისა და გემების გარსდენის პროცესში მათი ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის გაზრდის ბუნებრივ მიზეზს. ამას ხელს უწყობს არა მარტო მოძრავი ობიექტების სიჩქარის გაზრდა, აგრეთვე მათი არასათანადო აეროდინამიკური ფორმა და ზედაპირის არასაკმარისი სიგლუვე. ტურბულენტობამ შეიძლება თავი იჩინოს ნებისმიერ წყალგამტარში, თუ იარსებებს მისი გამომწვევი რომელიმე მიზეზი. კერძოდ, ვერეს დახურული კალაპოტი სრული დატვირთვის შემთხვევაში, კალაპოტის მრუდწირულ გეომეტრიასთან ერთად, ტურბულენტობის გამაძლიერებელი მიზეზი აუცილებლად იქნებოდა გვირაბების გოფრირებული ზედაპირი. ამიტომ, ბუნებრივია, რომ ამ ფაქტორების

ერთობლივი ნეგატიური მოქმედების ეფექტის რაოდენობრივი შეფასების გარდა, მიზანშეწონილად მიგვაჩნია ხაოიან მილში ტურბულენტური პულსაციების გენერაციის მექანიზმის მოკლე ფიზიკური ანალიზი. აქვე, ისიც უნდა აღინიშნოს, რომ არ არსებობს ლამინარული დინების ტურბულენტურში გადასვლის ერთიანი თეორია.

ცნობილია, რომ გლუვ მილში წყლის დინება თეორიულად მდგრადია მცირე შემფოთებების მიმართ რეინოლდსის რიცხვის ნებისმიერი მნიშვნელობისათვის. ამასთან, ლამინარული დინების შემთხვევაში მილში წყლის მოძრაობა ყოველთვის სტაციონარულია. აქედან გამომდის, რომ თუ რაიმე მიზეზით მილში ლამინარული დინების სტრუქტურა დაირღვევა, ამ დროს წარმოქმნილი მცირე შემფოთება დროში და სივრცეში ვერ განვითარდება, ანუ ის მალე ჩაქრება და დინების საწყისი ლამინარული სტრუქტურა აღსდგება. დინება მილში შეიძლება არამდგრადი გახდეს მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ შემფოთება საკმარისად ძლიერია. ტურბულენტობის წრფივი თეორიის თანახმად, შემფოთების ამპლიტუდა შეიძლება ექსპონენციალურად იზრდებოდეს რეინოლდსის რიცხვის ზრდასთან ერთად. მაგრამ, მრავალრიცხოვან ექსპერიმენტებში რეინოლდსის რიცხვის კრიტიკული მნიშვნელობა თეორიულ მნიშვნელობაზე მეტი აღმოჩნდა [5,7]. ამრიგად, რეალურად, შემფოთების ამპლიტუდის ზრდა შეზღუდულია არაწრფივი ეფექტებით, რომლებიც ახდენენ შემფოთების სტაბილიზაციას. ეს ნიშნავს, რომ სითხის დინებაში მყარდება ახალი წონასწორული მდგომარეობა. ამიტომ, რაღაც დონეზე ტურბულენტური რეჟიმის საბოლოო ჩამოყალიბებამდე, მილში დინება გადის გარდამავალ რეჟიმზე. ამრიგად, რეინოლდსის რიცხვის კრიტიკულ მნიშვნელობამდე ზრდის პროცესში, გარკვეული ხნით მაინც, ერთხელ ან რამდენიმეჯერ, მყარდება კვაზისტაბილური მდგომარეობა, რომელსაც ფაზური მდგომარეობების სივრცეში ისეთი ღია ტრაექტორია შეესაბამება, რომლისკენაც მოცემული დროის განმავლობაში მიისწრაფება სხვა ტრაექტორიების გარკვეული რაოდენობა. სწორედ ეს ეფექტი წარმოადგენს ე.წ. სტოქასტიკური ატრაქტორის (ე.წ. „უცნაური“ ატრაქტორი) განსაკუთრებით თვალსაჩინო მაგალითს. ბუნებრივია, რომ სტოქასტიკური ატრაქტორისკენ მიისწრაფების პროცესში დინებაზე მომქმედი უარყოფითი ტექნოგენური ფაქტორების არსებობა მხოლოდ ამცირებს მეტასტაბილური მდგომარეობის მიღწევის ალბათობას.

მილში სტაციონარული დინება, როგორც წესი, ერთგვაროვანია გასწვრივი მიმართულებით. სტაბილური ლამინარული დინების დროს მილში წარმოქმნილი ნებისმიერი მცირე შემფოთება ყოველთვის ლოკალურია. თუმცა, იშვიათ შემთხვევაში, მცირე ამპლიტუდის ზოგიერთი შემფოთება შეიძლება გადაადგილდეს დინების გასწვრივ. ასეთია მაგალითად, მცირე ამპლიტუდის მქონე ისეთი პერიოდული შემფოთებები, რომლებიც ვრცელდება იმ ფაზურ სიჩქარით, რომელიც მილში ლამინარული დინების სიჩქარის ტოლია. ამ დროს წყლის დინების ჰიდროდინამიკური სიჩქარე იცვლება მხოლოდ მილის განივ კვეთაში, ისიც გარკვეული სისქის სასაზღვრო ფენაში. ამიტომ, ლამინარულ რეჟიმში სითხის დინებას განსხვავებული განივი კვეთის ფორმის მქონე მილებში, დახურულ და ღია არხებში, აგრეთვე სხვადასხვა სიმრუდის ზედაპირების გარსდენის შემთხვევაში, ახასიათებს თვისობრივი მსგავსება. ყველა ასეთი დინება მეტ-ნაკლებად

მდგრადია მცირე შეშფოთებების მიმართ, თანაც დინების მდგრადობა შეიძლება შენარჩუნდეს რეინოლდსის რიცხვის რომელიღაც კონკრეტულ ინტერვალში. ჩვეულებრივ, ასეთ დინებებს გააჩნიათ მხოლოდ განივი ხაზოვანი მასშტაბი, მაგალითად: მილის დიამეტრი ან, სწორკუთხა არხის შემთხვევაში, მისი სიმაღლე და სიგანე. ამიტომ, მცირე პერიოდული შეშფოთებებისას გენერირებული ტალღების სიხშირული სპექტრი არ განიცდის დისპერსიას დინების მოძრაობის მიმართულებით.

ჰიდროდინამიკური მსგავსების თვალსაზრისით არსებობს სრული იდენტურობა ხაგენ-პუაზეილის დინების სხვადასხვა ტიპებს შორის. მაგალითად, ასეთ ლამინარულ დინებებს მიეკუთვნება: დინება ორ სიბრტყეს შორის; დინება კოაქსიალურ ცილინდრულ ზედაპირებს შორის; დინება წრიული განივი კვეთის მქონე გლუვ ან ხაოიან მილში. ასეთი დინებებისათვის ყოველთვის იარსებებს რეინოლდსის რიცხვის ისეთი კრიტიკული მნიშვნელობა, რომელიც იქნება ლამინარული დინების რეჟიმის ტურბულენტურში გადასვლის რიცხვითი კრიტერიუმი. საზოგადოდ, რეინოლდსის რიცხვის სიდიდე იცვლება დინების გრძივი ხაზოვანი ზომის ზრდასთან ერთად. ამიტომ, ნებისმიერ გარსდენად ზედაპირზე, სასამ რეინოლდსის რიცხვის ლოკალური სიდიდე არ გადააჭარბებს კრიტიკულ მნიშვნელობას ( $Re < Re_k$ ), ყალიბდება ლამინარული სასაზღვრო ფენა. წყლის ბლანტი ბუნების გამო სასაზღვრო ფენაში დინების სიჩქარის განაწილებას აუცილებლად გააჩნია პროფილი. მის არსებობას განაპირობებს მყარ ზედაპირზე წყლის ნაწილაკების მიკვრა, რის გამოც განივი მიმართულებით დინების სიჩქარე იცვლება ნულიდან გარკვეულ მნიშვნელობამდე. წრიული კვეთის მილის შემთხვევაში ეს არის დინების ბირთვის სიჩქარე. ამიტომ, ლამინარული სასაზღვრო ფენა წარმოადგენს ნებისმიერი სტაციონარული დინების ფენოვანი სტრუქტურის ძირითად, ანუ რეგულარულ, შემადგენელ ნაწილს. მილის შემთხვევაში სასაზღვრო ფენის ქვედა საზღვარია მისი შიდა ზედაპირი. სასაზღვრო ფენის სისქე თანდათან მატულობს მილის რადიუსის გასწვრივ და გარკვეულ დისტანციაზე შეიძლება მისი თანაზომადიც გახდეს. ამასთან, მილის ნებისმიერ განივ კვეთაში, სიჩქარის განაწილება სასაზღვრო ფენაში ჰიდროდინამიკურ მსგავსებას ინარჩუნებს, ანუ მთლიანობაში სიჩქარის პროფილის მომვლები წარმოადგენს პარაბოლას. ამრიგად, დაწყებული მილის ზედაპირიდან მისი სიმეტრიის ღერძის მიმართულებით სითხის დამუხრუჭების ეფექტი, გამოწვეული წყლის ფენებს შორის მხები ძაბვის მოქმედებით, თანდათან მცირდება. ამიტომ, რათა რეზერვუარიდან ან ღია კალაპოტიდან მილში შესვლის შემდეგ წყლის ხარჯი მუდმივი დარჩეს, საჭიროა, რომ დინების ბირთვში სიჩქარე სასაზღვრო ფენის სისქის თანაზომადად გაიზარდოს. მაგრამ, სიჩქარის ზრდა ნიშნავს რეინოლდსის რიცხვის ზრდას. თეორიულად, ამ დროს, თუ დინების ლამინარული რეჟიმი შენარჩუნდა, წყლის ხარჯი შეიძლება გაიზარდოს კიდევ. იმ შემთხვევაში, თუ დინება არამდგრადი გახდება, აუცილებლად განვითარდება ტურბულენტობა, რომლის გამო წყლის ხარჯი მილის კვეთაში უნდა შემცირდეს. ამრიგად, თეორიულად, დიდი რეინოლდსის რიცხვის პირობებში, მილში მაქსიმალური წყლის ხარჯის მისაღწევად, საკმარისია ლამინარული დინების რეჟიმის შენარჩუნება. მაგრამ, როგორც ეს მრავალრიცხოვანმა ექსპერიმენტებმა აჩვენა, ასეთი დინების რეალიზაციისათვის აუცილებელი პირობების ცალსახად დადგენა და მათი



სტაბილური შენარჩუნება პრაქტიკაში შეუძლებელია. ეს რომ შესაძლებელი ყოფილიყო, სითხის გამტარი ნებისმიერი ტექნიკური ობიექტის, მაგალითად, სარწყავი არხის, ან ნავთობსადენის, ეფექტიურობა მნიშვნელოვნად გაიზრდებოდა [7].

ამრიგად, ლამინარულმა დინებამ ყოველთვის შეიძლება ტრანსფორმაცია განიცადოს ტურბულენტურში, თუმცა ამ დროს შესაძლებელია, რომ, გარსდენად ზედაპირზე ლამინარული სასაზღვრო ფენა შენარჩუნდეს რეინოლდსის რიცხვის გარკვეულ დიაპაზონში. კერძოდ, მილის შემთხვევაში ცნობილია, რომ ლამინარული დინების ტურბულენტურში გადასვლა ჩვეულებრივ იწყება მილის შესასვლელიდან რაღაც მანძილზე. ამიტომ, მხოლოდ მილის გარკვეულ სიგრძეზე, ლამინარული სასაზღვრო ფენა კვლავ იარსებებს. თუ გამოვიყენებთ ანალოგიას, აქედან გამომდინარეობს, რომ რომ ვერეს მიწისქვეშა დახურულ კალაპოტის სექციებში შესვლის შემდეგ ტურბულენტობა, ადრე თუ გვიან, მაინც განვითარდებოდა. სავარაუდოდ, ეს მოხდებოდა პირველი გვირაბის შესასვლელიდან გარკვეულ მანძილზე, რომელიც ექსტრა ორდინარულ ვითარებაში პრაქტიკულად ნულის ტოლი შეიძლება

როგორც ავლნიშნეთ, რადგანაც რეინოლდსის რიცხვის ზრდასთან ერთად იზრდება აგრეთვე მილში ლოკალურად წარმოქმნილი მცირე პერიოდული შემფოთებების ამპლიტუდა, დინება თანდათან მეტასტაბილური ხდება ( $R_e \approx R_{e_k}$ ). ამ დროს წყალში წარმოიქმნება სხვადასხვა ზომის გრიგალები, ანუ იწყება ტურბულენტური პულსაციების გენერაცია. ეს პროცესი რეინოლდსის რიცხვის გარკვეულ მნიშვნელობამდე ლოკალურ ხასიათს ატარებს. მაგრამ, თუ რეინოლდსის რიცხვის ზრდა გაგრძელდა, ტურბულენტური პულსაციები შეიძლება ჩაიტანოს დინებამ, ე.ი. ტურბულენტობის არე თანდათან გაფართოვდება და პულსაციებმა შეიძლება დაიკავოს მთელი მილი. ასეთ მდგომარეობას შეესაბამება ტურბულენტური პულსაციების მახასიათებელი ტალღური რიცხვის კრიტიკული სიდიდე, რომელიც დაკავშირებულია რომელიმე წრფივ მასშტაბთან, მაგალითად, დინების განივ ხაზოვან ზომასთან, რომელიც მილში ყოველთვის ნაკლებია მის სიგრძეზე. თეორიიდან ცნობილია, რომ ხაგენ-პუაზეილის ტიპის ბრტყელი დინების შემთხვევაში ტალღური რიცხვის კრიტიკული სიდიდე ტოლია;  $K=2.04/h$ , სადაც  $h$ -მანძილია დინების შემომსაზღვრელ სიბრტყეებს შორის [6]. მსგავსი კავშირი, ოღონდაც გარკვეული რაოდენობრივი ცვლილებით, სამართლიანია წრიული კვეთის მქონე გლუვი მილის შემთხვევაშიც, რომელისათვის განივ ხაზოვან მასშტაბს წარმოადგენს მისი დიამეტრი (რადიუსი). სხვადასხვა ტიპის დინებებისათვის არსებობს მათი შესაბამისი ანალიზური კავშირები ტურბულენტური პულსაციების ტალღურ პარამეტრებსა და დინების პარამეტრებს შორის. მაგალითად, რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობების კრიტიკულ ინტერვალში, ასეთ კავშირს ბრტყელი დინების შემთხვევაში აღწერს გამოსახულება

$$\sqrt[3]{\Omega h/u} \approx (kh), \quad (14)$$

სადაც  $\Omega$ - ტურბულენტური პულსაციების სიხშირეა,  $u$ -დინების საშუალო სიჩქარე (პერიოდული შემფოთებების ფაზური სიჩქარე). ბუნებრივია, რომ არსებობს (14)

გამოსახულების ანალოგი წრიული ფორმის განივი კვეთის გლუვი მილისათვისაც. ამ კავშირის ფორმა, დიდი დიამეტრის მილის შემთხვევაში, ფაქტიურად (14) გამოსახულების ანალოგიურია.

გლუვი მილისაგან განსხვავებით, ხაოიანი მილში გენერირებული შემფოთებების სპექტრში, დიამეტრის გარდა, ჩნდება სხვა წრფივი მასშტაბების შესაბამისი ტალღური რიცხვებიც. ასეთი მახასიათებელი ზომებია: მილის სიგრძე, ხაოების სიმაღლე ( ტალღის ამპლიტუდის ანალოგი), აგრეთვე მანძილი მეზობელ ხაოებს შორის (ტალღის სიგრძის ანალოგი). ასეთი დამატებითი ხაზოვანი ზომების არსებობა მნიშვნელოვნად აფართოებს ტალღური შემფოთებების არეს და ცვლის მათ სიხშირულ სპექტრს, რადგანაც ჩნდება დისპერსია მილის გასწვრივ. ამასთან ერთად, განვითარებულ ტურბულენტობას ახასიათებს მცირე ზომის ტურბულენტური უჯრედების რიცხვის ზვავისებური ზრდა. ტურბულენტობის ელემენტარული უჯრედები წარმოიქმნებიან მსხვილმასშტაბოვანი გრიგალების დაშლის შედეგად. ასეთი დისიპაციური პროცესი მილში ლოკალურად იწყება, თუმცა შემფოთების არის გაფართოების გამო ის თანდათან აბსოლუტურ ხასიათს იძენს. ტალღური ფორმალიზმის ჩარჩოში, ტურბულენტური ფონის შემადგენელი ელემენტარული უჯრედები ქმნიან ტალღურ პაკეტებს. ამიტომ, დეტერმინირებული წარმოდგენით, ტურბულენტური პულსაციების სპექტრი შეიძლება გავაიგივოთ ელემენტარული ტალღური პაკეტების ერთობლიობასთან, რომელთა გავრცელება ხდება ჯგუფური სიჩქარით

$$d\Omega/dk \sim dRe \Omega/dk \quad (15)$$

სადაც  $Re\Omega$ - კომპლექსური სიხშირის რეალური ნაწილია. საბოლოოდ, ტურბულენტური პულსაციები აბსოლუტურ ხასიათს იძენენ და სითხეში ე.წ. კონვექციური არამდგრადობის ჩანასახები ხდებიან [5,6]. თუმცა როგორც წესი, ასეთი არამდგრადობა მილში განვითარებას ვერ პოულობს და, ადრე თუ გვიან, ჩაქრება.

სითხეში მსხვილმასშტაბოვანი გრიგალების გენერაციის, ზრდისა და დაშლის პროცესში ტურბულენტური პულსაციების სპექტრი ცვლილებას განიცდის. მასთან ერთად იცვლება აგრეთვე მილში წყლის დინების მსხვილმასშტაბოვანი ჰიდროდინამიკური სურათი, რადგანაც მასში პერმანენტულად წარმოიქმნება უკუდინებები. ეს ეფექტი ამცირებს დინების საშუალო სიჩქარეს, რაც მოქმედებს წყლის ხარჯზე და ხელს უწყობს წყლის ნაკადის მექანიკური ენერჯის დისიპაციას. ამ მოვლენამ შეიძლება თხევადი გარემოს თერმოდინამიკური მახასიათებლების საგრძნობი ცვლილება გამოიწვიოს. თუმცა, სუფთა წყალში ასეთი ცვლილების ეფექტი საგრძნობი ვერ იქნება. სამაგიეროდ, ღვარცოფულ ნაკადში, მისი არაერთგვაროვნების გამო, ტურბულენტობით გამოწვეული თერმოდინამიკური ცვლილებები საკმაოდ მნიშვნელოვანი შეიძლება აღმოჩნდეს. მათ შეიძლება გავლენა იქონიონ, მაგალითად, ღვარცოფული სუსპენზიური მასის სიბლანტეზე. თუმცა, ამაზე ალბათ უფრო თვისობრივი მსჯელობა შეიძლება, ვიდრე ექსპერიმენტის გზით რაოდენობრივი შეფასებების მიღება. კერძოდ, თხევადი გარემოს კინემატიკური სიბლანტის ზრდა, თითქოს და, უნდა იწვევდეს ტურბულენტური პულსაციების ჩაქრობას, ანუ ხელს უნდა უწყობდეს დინების სტაბილიზაციას. მაგრამ, ასეთ ვარაუდს სანდო თეორიული

საფუძველი არ გააჩნია. პირიქით, როგორც სასაზღვრო ფენის ჰიდროდინამიკური თეორიის მამამთავარმა ლუდვიგ პრანდტლმა ექსპერიმენტალურად დაადგინა, ჩვეულებრივი (არა რეოლოგიური) სითხის თხელი ჰორიზონტალური ფენის განივ კვეთაში სიბლანტის ზრდამ შეიძლება გამოიწვიოს დინების კინეტიკური ენერჯის ტურბულენტური პულსაციებისათვის გადაცემის პროცესის ინტენსიფიკაცია. ამის შედეგად სითხეში შეიძლება განვითარდეს სპეციფიური ტიპის, ე.წ. ტოლმინ-შლიხტინგის, არამდგრადობა [7]. სამაგიეროდ, სიბლანტის გავლენა ძლიერია რეოლოგიური სითხის, მაგალითად სისხლის, დინებაზე, მაგრამ მხოლოდ წვრილ კაპილარებში. ამიტომ ბუნებრივია, რომ, წყლისგან განსხვავებით, სისხლის დინება ყოველთვის სტაბილურია, ხოლო შესაბამისი რეინოლდსის რიცხვი-ძალიან მცირე. თუმცა, უნდა აღინიშნოს, რომ ზოგჯერ მილში წყლის დინების შემთხვევაშიც შესაძლებელია, რომ რეინოლდსის რიცხვი მცირე იყოს, ხოლო დინება-არასტაბილური. მართლაც, ინიკურადის ექსპერიმენტების თანახმად, წყალში ტურბულენტობის დაწყების მკაცრი კრიტერიუმი არ არსებობს [1,2]. მაგალითად, გლუვ მილებში წყლის დინებისათვის ტურბულენტობის საწყისი რიცხვითი კრიტერიუმის სიდიდე საკმარისად მცირეა:  $Re \approx 10^3$ . რეინოლდსის რიცხვის ასეთი მცირე მნიშვნელობა საკმაოდ მსხვილ მილში წყლის სწრაფი დინების შემთხვევაში პრაქტიკულად გამორიცხულია. ამიტომ, რეინოლდსის რიცხვის ასეთი მახასიათებელი სიდიდისათვის ტურბულენტური დინების წარმოქმნა ფორმალურად შესაძლებელია მხოლოდ ისეთ სითხეში, რომელსაც გააჩნია დიდი კინემატიკური სიბლანტე. თუმცა, თეორიულად, განსაკუთრებით ხელშემწყობ პირობებში ( ნაწილობრივ დატვირთული გლუვი მილი), დინების ლამინარული რეჟიმი შეიძლება შენარჩუნდეს იქამდე, სანამ  $Re \leq 10^5$ . ამის შემდეგ მილში მდგრადი დინების რეჟიმის შენარჩუნება შეუძლებელი ხდება. სწორედ ამის გამო, საიმედო ექსპერიმენტული მონაცემები არსებობს მხოლოდ რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობამდე:  $Re \approx 10^7$  [1,2,6].

საზოგადოდ, გლუვი მილის ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობა ტურბულენტური მოძრაობის საწყის მომენტში ნახტომისებურად იცვლილება. მაგრამ, წინააღმდეგობის შემცირება არ ნიშნავს წყლის ხარჯის გაზრდას, რადგანაც ტურბულენტობის დონის ზრდის შესაბამისად, დინების საშუალო სიჩქარე მილის გასწვრივ მცირდება. ვერეს უკანასკნელი წყალმომვარდნისას, პრინციპში, სწორედ ასეთი ეფექტი შეიძლება განვითარებულიყო უკვე დახურული კალაპოტის თავში, თამარაშვილის მაგისტრალის ქვეშ გამავალ გვირაბში. ამის გამო შემდგომ გვირაბში და შესაბამისად, მთელ დახურულ კალაპოტშიც, წყლის ხარჯი უნდა შემცირებულიყო. ამიტომ, არალოგიკური და ფიზიკურად უსაფუძვლოა ტრივიალური შეხედულება, რომ წყლის შეგუბებამ სვანიდის ქუჩაზე საწყისი დაუდო ვერეს ხეობის არნახულ დატბორვას თამარაშვილის მაგისტრალის შემდეგ. ჩვენთვის აშკარაა, რომ აქ განლაგებული გვირაბების გამტარუნარიანობა რომ არ შემცირებულიყო, მხოლოდ მოსული ნალექის ხარჯზე წყლის დონე კატასტროფულად ვერ გაიზრდებოდა.

**დასკვნა.** მდინარე ვერეს 13.07.2015 წ. კატასტროფული წყალდიდობა გამოწვეული იყო როგორც ობიექტური, ასევე სუბიექტური მიზეზებით. მოხდა ანომალური ბუნებრივი მოვლენების (კოკისპირული წვიმა, გიგანტური მასშტაბების ღვარცოფი) ზედდება ვერეს დახურული კალაპოტის ტექნოგენურ ხარვეზებზე. ჩქაროსნული გზის მონაკვეთის ვერეს ხეობაში გაყვანამდე მდინარის ბუნებრივი კალაპოტი, დიდი წყალმოვარდნის შემთხვევაშიც კი, ხანმოკლე დატბორვის შემდეგ ჩვეულებრივ უზრუნველყოფდა წყლის ზედმეტი მასის გატარებას მტკვრის მიმართულებით. როგორც რადიოლოკაციურმა დაკვირვებამ აჩვენა, ნალექების ინტენსივობა ამ პროცესის დროს, რომელიც გრძელდებოდა ხუთ საათზე მეტ ხანს, აჭარბებდა 100 მმ/სთ [8,9]. კრიტიკული ვითარების წარმოქმნა 13.06.2015 წლის ღამეს, როდესაც თავდაპირველად წყალი შეგუბდა სვანიძის ქუჩაზე, რასაც უხვ ნალექთან ერთად, ხელი შეუწყო პირველი გვირაბის შესასვლელის ჩახერგვამ. ამ გვირაბის გახსნის შემდეგ გაჩნდა დატბორვის მეორე ზონა, რომლის წარმოქმნა მნიშვნელოვნად განპირობებული იყო ვერეს დახურული კალაპოტის სპეციფიკით. ამ კონსტრუქციის მთავარ ხარვეზად მიგვაჩნია გვირაბების გოფირებული შიდა ზედაპირის ტალღისებური ხაოიანობა, რომელის ზომა, ჩვენი თეორიული შეფასების თანახმად, აჭარბებდა სამშენებლო ნორმებით დადგენილს. ხაოიანობის ფაქტორი, დახურული კალაპოტის ექტრემალური დატვირთვის პირობებში, ტურბულენტობის მკვეთრად გაძლიერებას, ანუ გვირაბების ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის გაზრდას გამოიწვევდა, რაც მათი გამტარუნარიანობის შემცირების ექვივალენტურია. რადგანაც თამარაშვილის მაგისტრალი ვერეს ხეობის წყალგამყოფი აღმოჩნდა, საკმაოდ სარწმუნოა, რომ სწორედ გვირაბებში წყლის ხარჯის შემცირების ეფექტი გახდა წყალდიდობის მთავარი მიზეზი თამარაშვილის მაგისტრალსა და ზოოპარკს შორის.

### ლიტერატურა

1. Шлихтинг Г.. Теория пограничного слоя. Гл. XX, М., Наука, 1974.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа, гл. X. М., Наука, 1973,
3. კერესელიძე დ., ალავერდაშვილი გ., კიკნაძე დ., ცინცაძე ნ., კოკაია ნ. კატასტროფული წყალმოვარდნები მდ. ვერეზე და მათი გაანგარიშების მეთოდოლოგია. თსუ შრომები, სერია გეოგრაფია, N 8-9, 2011.
4. СП 102.13330.2012.Туннели гидротехнические. Актуализированная редакция, СНиП 2.06.09-8, 2012.
5. Бетчов Р., Криминале В. Вопросы гидродинамической устойчивости. Гл.10, М., Мир,1971.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Гл. 4, М., Наука, 1988.
7. Гидродинамические неустойчивости и переход к турбулентности. Под редакцией Суинни Х. и Голлаба Дж. Гл.3. Джозеф Д. Гидродинамическая устойчивость и бифуркации; гл.7. Маслоу С.А. Неустойчивости и переход в сдвиговых течениях. М., Мир, 1984.

8. Amiranashvili A.G., Chikhladze V.A., Dzodzuashvili U.V., Ghlonti N.Ya., Sauri I.P. Reconstruction of Anti-Hail System in Kakheti (Georgia). Journal of the Georgian Geophysical Society, Issue B. Physics of Atmosphere, Ocean and Space Plasma, v.18B, 2015, p. 92-106.
9. Банеташвили В.Г., Геловани Г.Т., Гребенцова А.В., Джавахишвили Н. Р., Иобадзе К.В., Митин М.Н., Сагинашвили Н.М., Самхарадзе И.Н., Хурцидзе Г.Т., Церетели А.Г., Цхведиашвили Г.Н., Чхаидзе Б.Д. Некоторые примеры сильных ливней в восточной Грузии по данным радиолокационных наблюдений 2015 года. Тр. Ин-та геофизики им. М.З. Нодиа, т. 66, ISSN 1512-1135, Тбилиси, 2016, с. 75-83.

**მდინარე ვერეს 13.06.2015 წლის წყალმოვარდნა და დახურული  
კალაპოტის ჰიდროდინამიკური პრობლემა**

**კერესელიძე ზ., შერგილაშვილი გ.**

**რეზიუმე**

მდინარე ვერე წარმოადგენს ტიპიურ მთის მდინარეს, რომლის ხეობის სიგრძე 40 კილომეტრზე მეტია, სიმაღლეთა სხვაობა თითქმის კილომეტრნახევარი, ხოლო საშუალოწლიური წყლის ხარჯი  $Q \approx 1\text{მ}^3 \text{წმ}^{-1}$ . ხშირი წყალმოვარდნების გამო ეს მდინარე ითვლება ერთ-ერთ ყველაზე სახიფათოდ აღმოსავლეთ საქართველოში, რადგან ამ შემთხვევებში წყლის ხარჯი თითქმის ორი ხარისხით აჭარბებს საშუალოწლიურ მაჩვენებელს. როგორც წესი, ეს წყალმოვარდნები ყოველთვის იწვევდა ძლიერ დატბორვას, თუმცა კატასტროფული შემთხვევა, რომელსაც ადგილი ჰქონდა ამ მდინარის ხეობის ქვემო წელში 13.06.2015 წ. ჩვენი აზრით, გამოწვეული იყო არა მარტო ბუნებრივი, არამედ ტექნოგენური მიზეზებითაც. მდინარე ვერეს დახურული ფოლადის გოფრირებული ზედაპირის მქონე კალაპოტის ნეგატიური ზემოქმედება ზოგიერთ უბანზე მისი მნიშვნელოვანი სიმრუდის გათვალისწინებით, პროცესის მოდელირებით მიღებული შეფასებით შეიძლება კრიტიკული გამხდარიყო. შესაძლო შედეგი იქნებოდა დახურული კალაპოტის ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის გაზრდა, რასაც მოჰყვა მისი ნაწილობრივი ჩაკეტვა და შედეგად, დატბორვა.

## **OVERFLOW OF VERE RIVER ON 13 JUNE 2015 AND HYDRODYNAMIC PROBLEM OF CLOSED CHANNEL**

**Kereselidze Z., Shergilashvili G.**

### **Abstract**

The river Vere is a typical mountain river with its gorge of more than 40 km length, range of heights up to 1500 m and average annual water flow quantity of  $Q \approx 1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . This river is considered to be one of the most dangerous rivers in the east Georgia due to its frequent overflows, characterized by flow quantities exceeding the average annual value by one hundred times. Continuous and full-scale meteorological observations on Vere River flow regime count more than half-a-century history. Besides, there exist quite reliable data on individual overflows of the river starting from the last decade of the 19<sup>th</sup> century and to the first half of the 20<sup>th</sup> century. As a rule, the mentioned overflows used to cause strong floods. However, in our opinion, the catastrophic flood in the lower part of the Vere river gorge on 13 June 2015 was caused not only by natural factors, but man-caused reasons as well. It seems that the result of objectively arisen anomalous natural phenomenon (downpour) coincided with a negative technical factor related to construction deficiency of the recently built closed channel of the Vere River. Such hydro-technical solution was driven by construction of a highway section passing through the gorge of this mountain river. However, as it seems, the project did not consider in a due manner the possibility of a critical increase of hydraulic resistance of a closed channel during its full load. Relatively, the possibility of partial blocking of the closed channel due to the effect of this factor was neglected. Development of such critical situation was probably caused by theoretically not sufficiently substantiated construction of some curved sections of the closed channel, which stretch at a significant length. These sections were made of combination of parts with corrugated steel surface and reinforced concrete surface. Total negative effect of steel surface roughness, in combination with significant curvature of some areas of the closed channel, according to model estimations could be critical. A probable consequence of this was an increase of hydraulic resistance, which caused a partial blockage of the closed channel. It was followed by a massive flood within the precincts of Tbilisi with the tragic outcome.

## **ПАВОДОК РЕКИ ВЕРЕ 13.06.2015 ГОДА И ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА ЗАКРЫТОГО РУСЛА**

**Кереселидзе З., Шергилашвили Г.**

### **Реферат**

Река Вере представляет собой типичную горную речку с ущельем длиной более 40 км, перепадом высот около полторы тысячи метров и среднегодовым расходом воды  $Q \approx 1 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ . Эта река считается одной из самых опасных в Восточной Грузии из-за часто повторяемых паводков, характеризующихся расходом воды более чем на два порядка превышающим среднегодовое значение. Непрерывные полноценные метео-гидрологические наблюдения за режимом течения р. Вере охватывают более чем полувековой период. Кроме этого, имеются также достаточно надежные

данные об отдельных паводках, начиная с последнего десятилетия девятнадцатого до второй половины двадцатого века. Как правило, эти паводки неизменно вызывали сильное наводнение. Однако катастрофическое наводнение, имевшее место в нижней части ущелья р. Вере 13.06.2015 г., по нашему мнению, было вызвано не только естественными, но и техногенными причинами. Представляется, что произошло наложение результата объективно возникшего аномального стихийного явления (проливной дождь) на негативный технический фактор, связанный с конструктивным недостатком недавно построенного закрытого русла р. Вере. Такое гидротехническое решение было вызвано строительством участка скоростной дороги, проходящим в ущелье этой горной реки. Однако, по всей видимости, в проекте не была должным образом учтена возможность критического возрастания гидравлического сопротивления закрытого русла при его полной нагрузке. Следовательно, была игнорирована возможность частичного запираения закрытого русла из-за действия этого фактора. Развитию подобной критической ситуации, вероятно, способствовала теоретически недостаточно обоснованная конструкция некоторых криволинейных секций закрытого русла, имеющих значительную длину. Эти секции являлись комбинацией участков с поверхностью из гофрированной стали и поверхностью из железобетона. Суммарное негативное действие шероховатости стальной поверхности, при значительной кривизне некоторых участков закрытого русла, по модельным оценкам, могло быть критическим. Вероятным следствием этого было возрастание гидравлического сопротивления, в результате чего произошло частичное запираение закрытого русла. За этим последовало обширное наводнение в черте города Тбилиси, приведшее к трагическим последствиям.