

## წყლის ხარჯის შეფასება მდინარე ვერეს 13.06.2015 წლის წყალმოვარდნის დროს

კერესელიძე ზ., ხვედელიძე ი.

*ივ. ჯავახიშვილის სახ. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის მ. ნოდიაშ სახ. გეოფიზიკის ინსტიტუტი  
Irine.khvedelidze@tsu.ge*

**შესავალი.** მდინარე ვერეს (სიგრძე 45 კმ, ვარდნის სიმაღლე 1290 მ.), ყველა მთის მდინარის მსგავსად, პერიოდული წყალმოვარდნები ახასიათებს, რაც მნიშვნელოვან მატერიალურ ზარალს და ზოგჯერ ადამიანურ მსხვერპლსაც იწვევს. ვერეს ხეობაში სტიქიური ბუნებრივი პროცესების მავნე შედეგებს ხელს უწყობს რთული რელიეფი და არამდგრადი ქანები. ამას ბოლო ათწლეულებში დაემატა თბილისის ტერიტორიაზე ვერეს ჭალაში მოსახლეობის განუკითხავი ქმედება და ადმინისტრაციული ორგანოების მიერ ოფიციალურად ნებადართული სამოქალაქო მშენებლობა. ყოველივე ამის გამო 2015 წლის 13 ივლისის დამეს ვერეს დახურული კალაპოტის გვირაბებმა ვერ გაატარეს ქვა-ღორღითა და მყარი საგნებით გაჯერებული ღვარცოფული მასა, რომელიც თავდაპირველად შეგუბდა სვანიდის ქუჩაზე. შემდგომში მოხდა ვერეს ხეობის მასშტაბური დატბორვა თამარაშვილის მაგისტრალსა და ზოოპარკს შორის. წყალმოვარდნის კატასტროფული შედეგები მნიშვნელოვნად განაპირობა ვერეს ხელოვნური დახურული კალაპოტის ჰიდრავლიკურმა წინააღმდეგობამ, რომელიც წარმოადგენდა ჩქაროსნული საავტომობილო გზის მონაკვეთის შემადგენელ ელემენტს.

ნებისმიერი ჰიდროტექნიკური ნაგებობის პროექტი აუცილებლად უნდა შეიცავდეს ობიექტის ექსპლუატაციის სპეციფიკითა და ბუნებრივი გარემო პირობების ცვლილებით გამოწვეული ნეგატიური ჰიდროდინამიკური ეფექტების სრულფასოვან ანალიზს. ამ თვალსაზრისით არ შეიძლება გამონაკლისი ყოფილიყო ვერეს ხეობაში რეალიზებული ჩქაროსნული საავტომობილო მაგისტრალის მონაკვეთის პროექტი. ამ მშენებლობამ მოითხოვა ვერეს ხეობის ქვედანაწილში მდინარის ბუნებრივი ღია კალაპოტის ცვლილება. გაკეთდა ხელოვნური დახურული კალაპოტი, რომელიც წარმოადგენდა ადრე არსებული ორი გვირაბისა და შვიდი ახალი გვირაბის ერთობლიობას 2100 მეტრი საერთო სიგრძით. დახურული კალაპოტის საწყისი და ბოლო უბნების მოდერნიზაცია მოხდა ძველი გვირაბების ახალ გვირაბებზე გადაბმით. ამიტომ, დღეს თამარაშვილის მაგისტრალის ქვეშ გამავალი გვირაბის სიგრძე, საწყისი 108 მეტრის მაგიერ, შეადგენს  $\approx 360$  მეტრს, ხოლო გმირთა მოედნის ქვეშ მტკვრისაკენ გამავალი 700 მეტრიანი გვირაბი დაგრძელდა  $\approx 500$  მეტრით. ცხადია, რომ ასეთი ხელოვნური ცვლილების შედეგად რადიკალურად შეიცვალა ვერეს ბუნებრივი კალაპოტის გეომეტრია და, შესაბამისად, ხეობის ჰიდროლოგიური პარამეტრები.

**ვერეს დახურული კალაპოტის მოდელირება.** როგორც 13.06.2015 წ. კატასტროფულმა წყალმოვარდნამ აჩვენა, ვერეს დახურული კალაპოტის კონსტრუქცია სრულყოფილი არ აღმოჩნდა ექსტრემალური დატვირთვის შემთხვევაში. უკვე ამიტომ, დახურული კალაპოტის კონსტრუქციის ასეთი სპეციფიკა და მასთან ჰიდრაულიკური რისკების შეფასება აპრიორი მოითხოვდა მკაცრ თვისებრივ-რაოდენობრივ ანალიზს. პირველ რიგში აღსანიშნავია, რომ დახურული კალაპოტის სახით საქმე გვაქვს ისეთ ჰიდროტექნიკურ ობიექტთან, რომელიც არ იძლევა წყლის ხარჯის მართვის საშუალებას. სხვა მდინარეებისა და სხვადასხვა დანიშნულების მქონე ჰიდროტექნიკური წყალგამტარების მსგავსად, ვერეს დახურული კალაპოტის ჰიდრაულიკური პარამეტრების განსაზღვრისათვის საჭიროა გამოვიყენოთ კალაპოტის აპროქსიმაცია წრიული კვეთის მქონე მილით. ეს მეთოდი რადიალური სიმეტრიის მიახლოებაში იძლევა ჰიდროდინამიკური მსგავსების პრინციპის გამოყენების საშუალებას. ცნობილია, რომ არ არსებობს ლამინარული დინების ტურბულენტურში გადასვლის ერთიანი თეორია. თუმცა თუკი მოქმედებს დინების შემაშფოთებელი რომელიმე ტექნოგენური ფაქტორი, მაგალითად: ვიბრაცია ან ზედაპირის ხაოიანობა, ლამინარული დინების გადასვლა ტურბულენტურში გარდაუვალია. სწორედამ ნეგატიური ეფექტის არსში გარკვევისათვის იყო გამოყენებული ვერეს დახურული კალაპოტის აპროქსიმაცია წრიული კვეთის მქონე მილით [1]. რადგანაც, მილის დიამეტრის ზრდასთან ერთად, ჰიდროდინამიკური მსგავსების პრინციპი შეიძლება დაირღვეს თეორიულად შეუძლებელია წრიული მილის დიამეტრის (რადიუსის) კრიტიკული ზომის დადგენა. ამრიგად, უცნობია რაოდენობრივი ცვლილების თვისებრივში გადასვლის ზუსტი ჰიდროდინამიკური კრიტერიუმი. თუმცა აშკარაა, რომ მილის დიამეტრის ზრდასთან დაკავშირებული ცთომილება შეიძლება გამოწვეული იყოს რამდენიმე მიზეზით. პირველ რიგში, ეს შესაძლოა გამოიწვიოს მილში მაქსიმალურ მნიშვნელობაზე გაცილებით უფრო დაბალმა წყლის ხარჯმა. ცნობილია, რომ ეს ეფექტი ყოველთვის არის დაკავშირებული ლამინარული დინების ტურბულენტურში გადასვლის მომენტის მახასიათებელი განუზომელი პარამეტრის, რეინოლდსის რიცხვის ცვლილებასთან, რომელიც წარმოადგენს ჰიდროდინამიკური მსგავსების მთავარ პარამეტრს [2-4]. კერძოდ, 2015 წლის 13 ივნისის კატასტროფული წყალმოვარდნის ჰიდროლოგიური პარამეტრების ქვემოთ მოყვანილი ანალიზი გვიჩვენებს, რომ განვითარებული ტურბულენტობის რეჟიმში მილის სრული დატვირთვა სულაც არ ნიშნავს მის მაქსიმალურ გამტარუნარიანობას. თუმცა, მილის არასრული დატვირთვი შემთხვევაში, წყლის ხარჯი შეიძლება იმდენად დაბალი იყოს, რომ ჰიდროდინამიკური მსგავსების პრინციპის დარღვევა საგრძნობი არც აღმოჩნდეს.

**დახურულ კალაპოტში წყლის ხარჯის მოდელირების მათემატიკური საფუძველი.** ლამინარულ მიახლოებაში მკაცრად სამართლიანია წყლის ხარჯის განმსაზღვრელი ხაგენ-პუაზეილის ფორმულა

$$Q = \frac{\pi R^4 (P_1 - P_2)}{8\eta L}, \quad (1)$$

სადაც  $R$  – წრიული კვეთის მქონე მილის რადიუსია,  $\eta$  – წყლის დინამიკური სიბლანტის კოეფიციენტი  $L$ -სიგრძე,  $\Delta P/L$  – წნევის ცვლილება.

ტურბულენტური დინების შემთხვევაში მილში წყლის ხარჯის განმსაზღვრელი მკაცრი ფორმულა არ არსებობს, რის გამო საჭიროა გამოვიყენოთ ხაგენ-პუაზეილის ფორმულის მოდიფიკაცია ტურბულენტური დინების საშუალო სიჩქარის  $\bar{u}$  გამოყენებით

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

ერთგვაროვანი ლამინარული დინების შემთხვევაში  $\Delta P/L$  – წნევათა სხვაობა მილის ერთეულ სიგრძეზე უკავშირდება მხებ ძაბვას სითხის პარალელურ ფენებს შორის. ტურბულენტურ სითხეში წნევათა სხვაობის ცვლილება კავშირშია მილის წინააღმდეგობასთან და რადიუსთან

$$\frac{P_1 - P_2}{L} = \frac{\lambda \rho}{4R} \bar{u}^2, \quad (3)$$

სადაც  $\lambda$  – მილის ჰიდრავლიკურ წინააღმდეგობაა.

ლამინარულ მიახლოებაში ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის კოეფიციენტი  $\lambda$  დამოკიდებულია მხოლოდ რეინოლდსის რიცხვზე. ასეთი დამოკიდებულება სამართლიანია იმ შემთხვევაშიც, როცა დინების რეჟიმი ტურბულენტური ხდება. თუმცა, ამ დროს ჩნდება დამატებითი ფიზიკური ფაქტორი, რომელიც დამოკიდებულია მილის შიდა ზედაპირის სიგლუვეზე. ამიტომ, გარსდენადი ზედაპირის ხაოიანობას განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება, როგორც მილის წინააღმდეგობის განმსაზღვრელ ერთ-ერთ ფაქტორს.

ტურბულენტური დინების შემთხვევაში მხები ძაბვის ფორმულა, ხაგენ-პუაზეილის ფორმულის მსგავსად, ტრანსფორმაციას განიცდის. ამ ფორმულიდან გამოდის, რომ ტურბულენტური დინების დროს მხები ძაბვა მილის შიდა ზედაპირზე დამოკიდებულია წყლის საშუალო სიჩქარის კვადრატზე

$$\tau_0 = \frac{\lambda}{8} \rho \bar{u}^2, \quad (4)$$

ისევე, როგორც წყლის ხარჯი ხაგენ-პუაზეილის (2) ფორმულის მიხედვით

$$Q = \frac{\pi R^3 \lambda}{16\nu} \bar{u}^2, \quad (5)$$

სადაც  $\nu = \eta/\rho$  – წყლის სიბლანტის კინემატიკური კოეფიციენტია [2]. ერთი შეხედვით, (5) ფორმულის პრაქტიკული ღირებულება, (2)-თან შედარებით, უფრო მაღალია, რადგანაც ის ცხადი სახით შეიცავს მილის ჰიდრავლიკურ წინააღმდეგობას. მაგრამ, რაოდენობრივი შეფასებებისათვის ფორმულა (5)-ის არაკორექტულმა გამოყენებამ შეიძლება მცდარ დასკვნამდე მიგვიყვანოს, რის გამოც მას შემდეგ არ გამოვიყენებთ.

**გარსდენადი ზედაპირების ხაოიანობის მოდელირება.** ამ ნეგატიური ეფექტის რაოდენობრივი შეფასება წარმოადგენს ექსპერიმენტული ჰიდროდინამიკის საგანს. 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 მილისათვის ეს პარამეტრი რადიუსის ტოლია. ჰიდროტექნიკურ ობიექტებზე, მილების მსგავსად, ყველგან არსებობს ხელოვნური ხაოიანობის ფაქტორი, გამოწვეული გარსდენადი ზედაპირების სიგლუვის დაბალი ხარისხით. ასეთმა ხაოიანობამ, ნალექთან კომბინაციაში, შეიძლება გამოიწვიოს, მაგალითად, მილის შიდა ზედაპირის ტალღისებურობა. პრაქტიკაში, სხვადასხვა ჰიდროტექნიკური დანიშნულების ობიექტებზე, ფარდობითი ხაოიანობა მერყეობს 0.2%-7% ინტერვალში [2,4]. აქედან გამომდინარე, რადგანაც ვერეს დახურული კალაპოტის ექვივალენტური მილის დიამეტრია  $D \approx 8 \cdot 10^3$  მმ, მისთვის კრიტიკული უნდა ყოფილიყო უკვე 20 მმ აბსოლუტური ზომის (სიმაღლის) ხაოიანობა. ეს მა-

ხასიათებელი ზომა გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე ვერეს დახურული კალაპოტის კონსტრუქციაში გამოყენებული ფოლადის გოფრეს სიმაღლე  $k=150$  მმ. ამიტომ, გოფრირებული ზედაპირი როგორც თვისობრივად, ასევე რაოდენობრივად წარმოადგენს ხელოვნური ხაოიანობის თვალსაჩინო მაგალითს.

ცნობილია, რომ ლამინარული დინების შემთხვევაში მილის წინააღმდეგობა ემორჩილება ბლაზიუსის კანონს  $\lambda \approx 0.32 (Re)^{-\frac{1}{4}}$ , ხოლო მილში დინების ნებისმიერი რეჟიმის დროს რეინოლდსის რიცხვი განისაზღვრება მილის განივი კვეთის დიამეტრის საშუალებით  $Re = \frac{\bar{u}D}{\nu}$ . ტურბულენტური დინების შემთხვევაში ლამინარული სასაზღვრო ფენის სისქე დამოკიდებულია სითხის კინემატიკურ სიბლანტეზე და ზედაპირული წინააღმდეგობის ძაბვასთან დაკავშირებულ პარამეტრზე, წინამიკურ სიჩქარეზე  $v_*$ . ამიტომ, ამ შემთხვევაში, ჩვეულებრივ რეინოლდსის რიცხვთან ერთად, აგრეთვე შემოდის ხაოიანობის ეფექტის განმსაზღვრელი მეორე უგანზომილებო პარამეტრი  $Re_* = \frac{kV_*}{\nu} \sim \frac{k}{\delta_l}$ . იმისათვის, რომ ხაოიანი მილი ტურბულენტური დინებისათვისაც ჰიდროდინამიკურად გლუვი დარჩეს საკმარისია, რომ ხაოიანობამ არ იმოქმედოს მილის წინააღმდეგობაზე, ამისათვის მილის შიდა ზედაპირზე წარმოქმნილი ლამინარული სასაზღვრო ფენის სისქე უნდა აღემატებოდეს ხაოიანობის სიმაღლეს. მაგალითად, ხაოიანობის ნეგატიური ეფექტის სრული გამოვლინების რეჟიმში ხაოიანობის ყველა ელემენტი გამოდის ლამინარული სასაზღვრო ფენიდან და მილის წინააღმდეგობა კვადრატული კანონით იცვლება [2]

$$\lambda_1 = \frac{1}{(2lg\frac{R}{k}+1.74)^2}. \quad (6)$$

ხაოიანობით გამოწვეული წინააღმდეგობისათვის აგრეთვე არსებობს ალტერნატიული ფორმულა[3,4]

$$\lambda_k = \frac{1.3}{\ln^2(\frac{R}{k})}. \quad (7)$$

ასეთი ნახევრად ემპირიული კავშირების გამომხატველი ფორმულები წარმოადგენენ ჰიდრაულიკის ქვაკუთხედს. რადგანაც ვერეს დახურული კალაპოტის გოფრირებული ზედაპირის ფარდობითი გეომეტრიული ხაოიანობაა:  $\frac{R}{k} \approx 26.6$  ( $R \approx 4\text{მ}$ ,  $k \approx 0.15\text{მ}$ ), გვექნება, რომ  $\lambda \approx 0.047$ , ხოლო  $\lambda_k \approx 0.12$ . წყლის ხარჯის ქვემოთ მოცემულ რაოდენობრივ შეფასებებში, ამ სიდიდეებთან ერთად, დახურულ კალაპოტში წყლის დინების საშუალო სიჩქარის განსაზღვრისათვის გამოყენებული იქნება აგრეთვე ალტერნატიული ფორმულები:

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{4R\Delta p}{\lambda \rho l}} = \sqrt{\frac{8}{\lambda}} v_*, \quad (8)$$

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{R\Delta p}{2\alpha^2 \rho l}} \ln \frac{R}{k} = \frac{v_*}{\alpha} \ln \frac{R}{k}, \quad (9)$$

რადგანაც  $\frac{\Delta p}{l} = \rho v_*^2 \frac{2}{R}$ , ხოლო  $\alpha=0.4$ -ე.წ. კარმანის მუდმივაა.

დინამიური სიჩქარე უკავშირდება ჰიდროდინამიკური სიჩქარის მაქსიმუმს შემდეგი ნახევრად ემპირიული ფორმულით:

$$v_* = \frac{u_{max}}{5.75lg\frac{R}{k} + 8.48} \quad (10)$$

იმ შემთხვევაში, თუ მილი მრუდწირულია, მასში აღიძვრება ცენტრიდანული ძალები, რომლებიც იწვევენ ლამინარული დინების დესტაბილიზაციას. მისი სიმძლავრე დამოკიდებულია მილის სიმრუდის რადიუსზე და გამოისახება ფორმულით

$$\frac{\lambda_r}{\lambda_0} = 1 + 0.075R_e^{1/4} \left(\frac{R}{r}\right)^{1/2}, \quad (11)$$

სადაც  $\lambda_0$  – გლუვის წორხაზოვანი მილის წინააღმდეგობის კოეფიციენტი,  $r$ –მრუდწირული უბნის სიმრუდის რადიუსი.

ამრიგად, თუ მილი ხაოიანია, ხოლო მისი მრუდწირული უბნის სიმრუდე საკმარისად დიდია, დინების ტურბულენტურ რეჟიმში ერთდროულად იმოქმედებს მილის წინააღმდეგობის ზრდის ხელშემწყობი ორივე ფაქტორი. ამ თვალსაზრისით განსაკუთრებით გამოსაყოფია პირველი გვირაბი, რომლის სიმრუდე ირიბი შეფასებით ახლოსაა ან შეიძლება აღემატება კიდევ სამშენებლო ნორმებით დასაშვებ სიდიდეს [5].

რეზერვუარის არსებობის შემთხვევაში ჰიდროდინამიკური სიჩქარის მაქსიმუმი უნდა განისაზღვროს ზოგადი ფორმულიდან

$$u_{max} = \sqrt{2gH}, \quad (12)$$

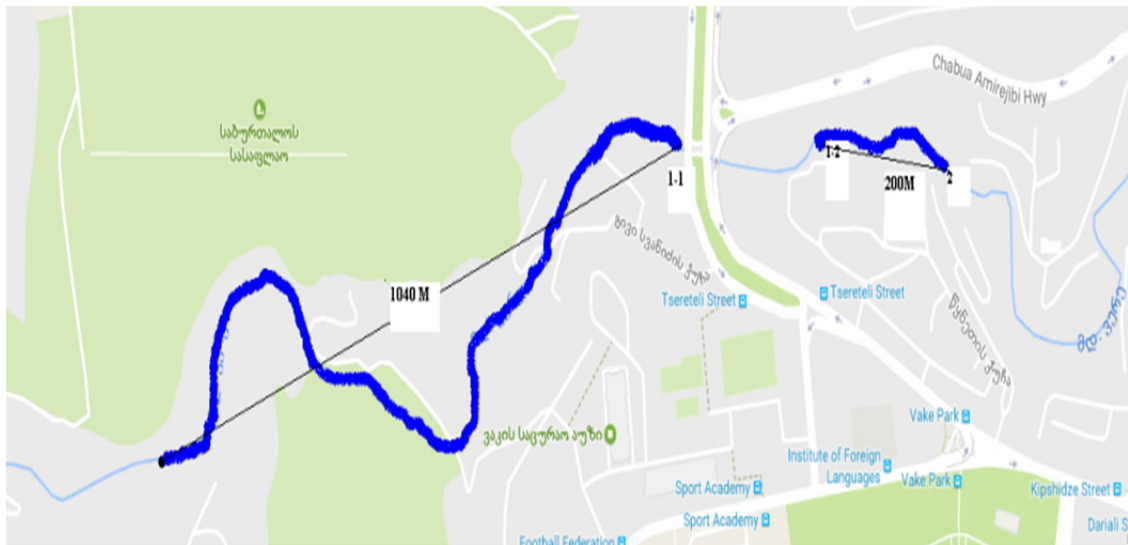
სადაც  $H$  სიმაღლეა,  $g$ - სიმძიმის ძალის აჩქარება. იმ შემთხვევაში თუ რეზერვუარი იცლება, ანუ  $H$  ცვლადია, (12) ფორმულა განიცდის ტრანსფორმაციას

$$\bar{u} = \frac{\sqrt{2g}}{H_0} \int_{H_1}^{H_2} \sqrt{H} dH \approx 2,97 \frac{1}{H_0} \left( H_2^{3/2} - H_1^{3/2} \right), \quad (13)$$

სადაც  $H_0 = H_2 - H_1$ -წარმოადგენს რეზერვუარის საწყის და საბოლოო სიმაღლეებს შორის დონეთა სხვაობას.

**ვერეს დახურული კალაპოტის ექსტრემალურ პირობებში გამტარუნარიანობის შეფასება.** მოდელის თანახმად, პირველი გვირაბის წინ წყლის შეგუბებას არ ჰქონდა გადამწყვეტი როლი ხეობის დანარჩენი ნაწილის დატბორვაში. პირველ რიგში იმიტომ რომ, როგორც ქვემოთ იქნება ნაჩვენები, სვანიძის ქუჩაზე წარმოქმნილი დროებითი საგუბარის მოცულობა მნიშვნელოვნად ნაკლები აღმოჩნდა იმ მოცულობაზე, რომელიც დასახელებული იყო კატასტროფის უშუალოდ შემდგომ პერიოდში [6,7]. თუმცა, ამ რეზერვუარის პარამეტრები სრულად განაპირობებდა დახურული კალაპოტის (1 გვირაბი) შესასვლელში ჰიდროდინამიკურ სიჩქარეს. ეს სიდიდე, ცხადია, უნდა შეცვლილიყო პირველ გვირაბში უკვე მისი შესასვლელის მახლობლად. ეს ნიშნავს, რომ წყლის ხარჯის გამოსათვლელ ფორმულაში (2) უნდა გავითვალისწინოთ რეალური სიჩქარე, რომლისთვისაც უპრიანია გამოვიყენოთ ფორმულები (8) და (9). აპრიორი უპირატესობის მიცემა რომელიმე ამ ფორმულისათვის არასწორი იქნება, რადგანაც ყველა ჩვენი შეფასება ტარდება ნახევრადემპირიული ჰიდროდინამიკური თეორიის ფარგლებში. ბუნებრივია, რომ დახურული კალაპოტის მთელ სიგრძეზე პირველი გვირაბის მიერ გატარებულ წყლის ნაკადს დაემატებოდა ქალაქის წყლების ჩამონადენი და ნალექი ხეობის ამ ნაწილის ფართობიდან. ამიტომ, პირველ საგუბართან ერთად, შეგვიძლია შევაფასოთ აგრეთვე მეორე საგუბარის მოცულობაც, თამარაშვილის მაგისტრალსა და გაბაშვილის ქუჩას შორის. ეს შესაძლებლობა გვაქვს იქიდან

გამომდინარე, რომ ჩვენთვის ცნობილია წყლის დონის აბსოლუტური სიმაღლეები პირველი და მეორე გვირაბების შესასვლელებთან (ნახ. 1 და 2 )



ნახ. 1



ნახ. 2

**I საგუბარი.** დროებითი საგუბრების გეომეტრია მოცემულია რუკაზე (ნახ. 2). პირველი გვირაბის წინ ვერეს კალაპოტის ნიშნულია  $h_1 = 455$  მ. დროებითი საგუბარის აბსოლუტური სიმაღლე ცხადი კვალის მიხედვით იყო  $h_2 = 472$  მ. წყალი თამარაშვილის მაგისტრალზე არ გადასულა, რადგანაც მაგისტრალის დონემდე დარჩა 1.5 მეტრი. დროებითი საგუბრის აპროქსიმაციისათვის საჭიროა აგრეთვე საგუბარის განივი ზომა, რომელმაც გვირაბის შესასვლელთან შეადგინა  $\approx 50$  მ. მოდელური საგუბრის სიგრძე განისაზღვრა თბილისის 1:10000 მასშტაბის, ფიზიკური რუკიდან (ნახ 1), რომელზედაც ვერეს ხეობაში დატანილი იქნა  $H=472$  მ აბსოლუტური სიმაღლის წერტილი. ასეთი გზით განისაზღვრა  $L \approx 1040$  მ. საგუბრის საშუალო სიმაღლეა  $\bar{h} = 8.5$  მ. სიგანე, ვიზუალური შეფასებიდან გამომდინარე,

შეიძლება ჩავთვალოთ ინტერვალში  $d = m$  [35-50] ამრიგად მივიღებთ, რომ სვანის ქუჩაზე დროებითი საგუბრის მოცულობა

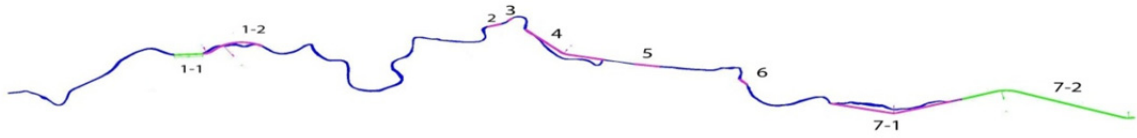
$$W = \bar{h}Ld \quad (14)$$

შესაძლოა იყო ინტერვალში  $W_1 \approx (3.1 \cdot 10^5 - 4.4 \cdot 10^5) \text{ } \rho^3$ .

**II საგუბარი.** გაბაშვილის ქუჩამ, რომელიც გადის მეორე გვირაბის თავზე, მნიშვნელოვნად იმოქმედა, როგორც ზედა ბიეფმა, საიდანაც მოხდა საკმაო სიმაღლიდან წყლის ნაკადის გადადინება ვერეს ხეობის დანარჩენ ნაწილში. მეორე გვირაბის შესასვლელი მდებარეობდა  $h_1 \approx 442 \text{ } \rho$  ნიშნულზე, ხოლო გაბაშვილის ქუჩა  $h_2 \approx 455 \text{ } \rho$  ნიშნულზე. ამ საგუბრის მააპროქსიმირებელი პარალელეპიპედის სიგრძე  $L \approx 200 \text{ } \rho$ . რადგან საგუბარი საკმაოდ მოკლეა შესაძლოა მივიჩნიოთ, რომ მისი საშუალო სიღრმეა  $h_2 - h_1 = 13 \text{ } \rho$ , ხოლო სიგანე  $d \approx 60 \text{ } \rho$ . შესაბამისად ამ საგუბრის სავარაუდო მოცულობა  $W_2 \approx 1.6 \cdot 10^5 \text{ } \rho^3$ .

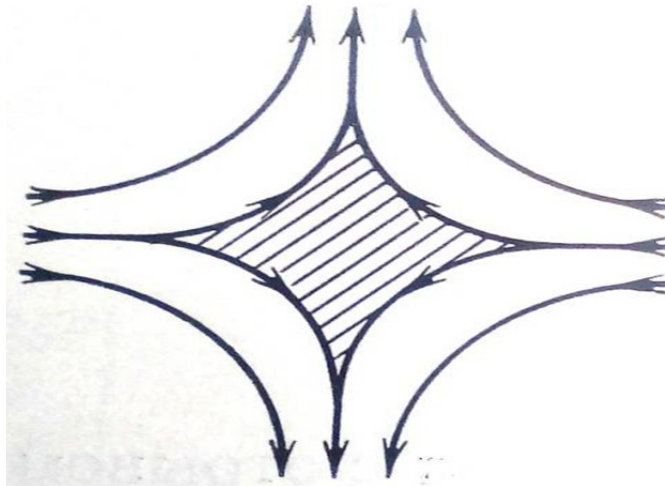
**სტაგნაციის ზონა.** როგორც ვერეს დახურული კალაპოტის სქემა ( ნახ.1) გვიჩვენებს, მეორე გვირაბის წინ ვერე მკვეთრად უხვევს. ამიტომ, შეიძლება ვივარაუდოდ, რომ წყალმოვარდნის დროს ეს ადგილი გახდა წყლის მასშტაბური შეგუბების ერთ-ერთი ლოკალური წერტილი. ამას, გვირაბის ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის ზრდასთან ერთად, სავარაუდოდ ხელი შეუწყო ვერეს კალაპოტის ბუნებრივმა გეომეტრიამ. სავარაუდოა, რომ ამიტომ კატასტროფის შემდეგ დახურული კალაპოტის აღდგენის პროცესში ამ ადგილს განსაკუთრებული ყურადღება მიაქცევს. ამიტომ, მომავალში პრობლემის თავიდან აცილების მიზნით, მოხდა მეორე გვირაბის შესასვლელი პორტალის მოდერნიზაცია მიმართველი კედლების მონტაჟის საშუალებით. ეს მიშენება ძაბრის მსგავსია და მისი დანიშნულებაა ხელი შეუწყოს წყლის შედინებას გვირაბში. მიშენების პირველი სეგმენტები გვირაბის ღერძის პარალელურია, ხოლო მეორე სეგმენტები, რომელთა სიგრძე დაახლოებით 5 მეტრია, ქმნიან კუთხეებს:  $\gamma \approx 20^\circ$  და  $\delta \approx 30^\circ$ . ჩვენ მიგვაჩნია, რომ ასეთი ტექნიკური ცვლილება, არა თუ წყალმოვარდნის, არამედ საკმარისად ინტენსიური წვიმის შემთხვევაშიც კი, შეიძლება გახდეს წყლის შეგუბების მიზეზი, ანუ შეამცირებს წყლის ხარჯს გვირაბში. საქმე ისაა, რომ მიმართველი კედლები, იმ შემთხვევაში, თუ ისინი დაყენებული არიან არასწორად, აუცილებლად შექმნიან შემხვედრ წყლის ნაკადებს, რომელთა შეჯახება მოხდება გვირაბის შესასვლელთან ახლოს. შემხვედრი ნაკადების წარმოქმნას, ანუ დინების სეპარაციას კედლებთან შეჯახებამდე, შეიძლება ხელი შეუწყოს აგრეთვე იმ ფაქტმა, რომ მეორე გვირაბის წინ ვერეს კალაპოტს გააჩნია მეჩეჩი. ამიტომ, თუ მოხდება დაშორიშორებული ნაკადების შეჯახება, დაარა მათი რბილიშერწყმა, რომელიც შესაძლებელია მხოლოდ პარალელური ნაკადების ურთიერთქმედებისას, შეჯახების შემდეგ სავარაუდოა უკუნაყადების წარმოქმნა. დახურული კალაპოტის აღდგენის შემდეგ ინტენსიური წვიმების დროს წყლის შეგუბება მეორე გვირაბის წინ მოხდა. ამის პირდაპირი ინდიკატორია წყლის დონე გვირაბში, რაც დაფიქსირებული იქნა ფოტოსურათებზე მაგალითად: 11.06.2017 წ. და 7.07.2017 წ. განსაკუთრებით აღსანიშნავია უკანასკნელი შემთხვევა, როცა დაუზუსტებელი მონაცემებით ნალექებმა შეადგინეს  $\approx 20$  მმ, რაც არის არა უმეტეს 20% იმ ნალექებისა, რომელთაც გამოიწვიეს 13.06.2015 წ. კატასტროფული წყალდიდობა. ეს ფაქტი უდავოდ იმსახურებს განსაკუთრებულ ყურადღებას, რადგან ჩვენი აზრით, პირდაპირ არის დაკავშირებული არასწორ ტექნიკურ გადაწყვეტილებასთან. ასეთი შეხედულების

დასასაბუთებლად შესაფერისად მიგვაჩნია მიემართოთ იდეალური სითხის ჭავლების თეორიას. კერძოდ მიგვაჩნია, რომ, თუ მოვახდენთ წყლის ნაკადების აპროქსიმაციას ჭავლებით, შესაძლებელი იქნება მეორე გვირაბის წინ წყლის შეგუბების ფიზიკური მიზეზის ცხადად წარმოჩინება.



ნახ 3. ვერეს დახურული კალაპოტის სქემა

იდეალური უკუმშვადი სითხის ჭავლების ჰიდროდინამიკურ თეორიაში განსაკუთრებული ადგილი უჭირავს ჭავლების შეჯახების პრობლემას. ცნობილია ორი ან რამდენიმე ჭავლის შეჯახების ამოცანის რამდენიმე ვარიანტი. ყველა მათგანის ანალიზური ამონახსნი ზოგადად არაცალსახაა, რადგან დამოკიდებულია თავისუფალ პარამეტრზე [9]. ჩვეულებრივ, ეს პარამეტრია კუთხე პირდაპირ ჭავლსა და დაჯახების შედეგად წარმოქმნის უკუჭავლს შორის.

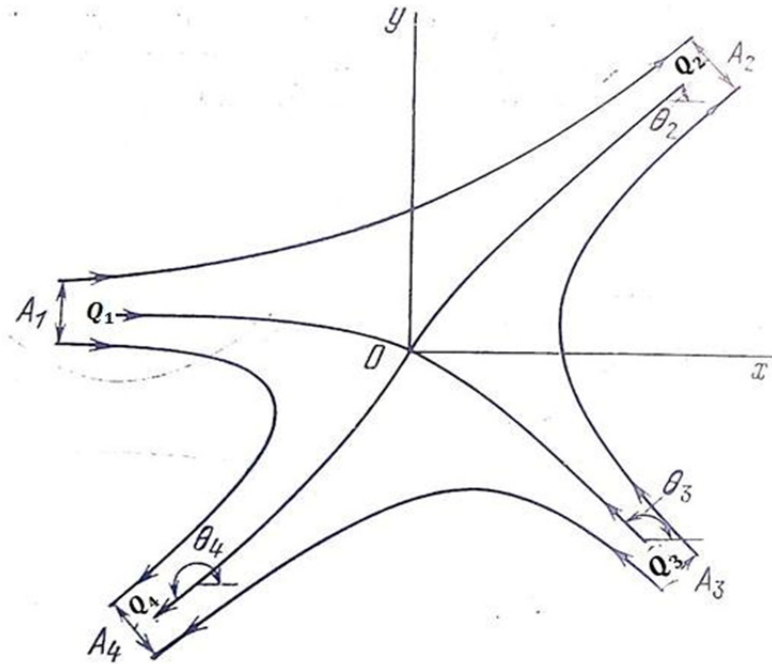


ნახ 4.

არაცალსახობის მიზეზის გრაფიკულ ილუსტრაციას წარმოადგენს ნახ. 4, რომელიც შეესაბამება ორი ერთნაირი ინტენსივობის (წყლის ხარჯის) მქონე ჭავლის პირდაპირი კუთხით შეჯახებას. ამ იდეალიზირებულ კერძო შემთხვევაში შედეგი ცალსახაა, რადგანაც შეჯახების შემდეგ წარმოქმნილი ჭავლები პირდაპირი ჭავლების იდენტურია. ამასთან, შეჯახების არეში წარმოიქმნება ე.წ. სტაგნაციის ზონა, რომელსაც ჭავლების პარამეტრების შესაბამისი გარკვეული ხაზოვანი ზომა გააჩნია. თუ პირველადი ჭავლების ინტენსივობა განსხვავებულია, ხოლო მათი შეჯახება ხდება ნებისმიერი კუთხით, შესაბამისი ამოცანის



ანალიზური ამონახსნი არაცალსახაა, რადგან, როგორც ავღნიშნეთ, მოითხოვს თავისუფალი პარამეტრის აპრიორი ცოდნას. თუმცა, როცა ხდება ანალიზური ამონახსნის რიცხვითი მოდელირება, ეს ნაკლი შეიძლება ხელის შემშლელი არ აღმოჩნდეს მიახლოებითი რაოდენობრივი შეფასებისათვის. მაგრამ, სრულფასოვანი თვისებრივი ანალიზი, რომელიც წარმოაჩენს ჭავლების შეჯახების პროცესის ყველა ფიზიკურ მხარეს, შესაძლებელია მხოლოდ ანალიზური ამონახსნის ასიმპტოტური ყოფაქცევის საფუძველზე. ასეთი ტიპის ნაშრომებს შორის ჩვენი მიზნისათვის განსაკუთრებით საინტერესოა [10], რომელის გეომეტრიული სქემა მოცემულია ნახ. 5.



ნახ. 5.

ამ ნახაზზე  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  – წარმოადგენს  $A_1, A_2, A_3, A_4$  ჭავლების სიგანეს, ანუ ინტენსივობას ბრტყელ მიახლოებაში (წყლის ხარჯი),  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$  – შესაბამისი ჭავლების კუთხე კოპლექსური სიბრტყის X-ღერძთან.

იდეალური სითხის ჭავლების სხვა ამოცანების ანალიზური ამონახსნების მსგავსად, ამონახსნი [10] ბრტყელია და შეიცავს თავისუფალ პარამეტრს. თუმცა შემდგომში აღმოჩნდა, რომ ასეთი შეზღუდვის ნაწილობრივი გამოსწორება შესაძლებელი ყოფილაკვლავ კონფორმული ასახვის მეთოდით. ცნობილია ასეთი რამდენიმე ამოცანა, რომელთა შორის აღსანიშნავად მიგვაჩნია ნაშრომი [11]. აქ განსაზღვრული ანალიზური კავშირი ჭავლების პარამეტრებს შორის არსებითად აძლიერებს [10] ნაშრომის ღირებულებას

$$Q_{2,4} = \frac{Q_1 Q_3 (1 - \cos \theta_3)}{Q_1 (1 - \cos \theta_{2,4}) + Q_3 (\cos \theta_{2,4} - \cos \theta_3)}. \quad (15)$$

(15) გამოსახულების სახით არსებობს პირობა, რომელიც აკავშირებს  $\theta_3$  კუთხით შეჯახებული ჭავლების ინტენსივობას დაჯახების შედეგად წარმოქმნილი უკუჭავლების ინტენსივობასთან, რისთვისაც საკმარისი ყოფილა ახალი ჭავლებიდან ერთ-ერთის, მაგალითად,  $A_2$  ჭავლის  $Q_2$  ინტენსივობისა მისი X ღერძთან დახრის  $\theta_2$  კუთხის ცოდნა. შესაბამი-

სად, შესაძლებელი ხდება ფორმულა (15)-იდან განისაზღვროს  $Q_4$ , რისთვისაც, [11]-ის თანახმად, საჭიროა ვისარგებლოთ დამატებითი პირობით:  $\pi \leq \theta_4 \leq \pi + \theta_3$ . ამ შემთხვევაში უკუჭავლის მიმართულება კვლავ თავისუფალ პარამეტრად რჩება, თუმცა უკვე შესაძლებელი ხდება  $Q_4$  ინტენსივობის განსაზღვრა კომპლექსური ტოლობიდან [10]

$$-Q_1 - Q_2 e^{i\theta_1} + Q_3 e^{i\theta_2} + Q_4 e^{i\theta_4} = 0. \quad (16)$$

ამრიგად, არსებობს ასიმპტოტური ანალიზის საშუალება მნიშვნელოვნად განსხვავებული ინტენსივობის მქონე სხვადასხვა ჭავლების შეჯახების შემთხვევაში, ანუ  $\frac{Q_1}{Q_3}$  ფარდობის პრაქტიკულად ყველა შესაძლებელი მნიშვნელობისათვის. სწორედ მსგავსი ვითარება შესაძლებელია წარმოიქმნას ვერეს დახურული კალაპოტის მეორე გვირაბის შესასვლელის წინ, წყლის დონის ზრდის პროცესში, როცა თავდაპირველი წყლის ნაკადი, სავარაუდოდ, თანდათან უფრო უპირატესად უნდა შეეჯახოს მოპირდაპირე მიმართველ კედელს. შესაბამისად  $A_1$  ჭავლი თანდათან უფრო ინტენსიური იქნება, ვიდრე  $A_3$ . მაგალითად, შევავსოთ  $A_2$  პირდაპირი ჭავლის ინტენსივობა მოდელური შემთხვევისათვის:  $Q_1 = 2Q_3$ .  $\gamma$  და  $\delta$  კუთხეების ზემოთ მოცემული მნიშვნელობებისათვის  $\theta_3 \approx 130^\circ$ , ხოლო  $\theta_2$  განუსაზღვრელი რჩება. თუმცა, თუ გვირაბის ღერძი  $Y$  ორდინატს ემთხვევა, ამ ღერძის მიმართ ჭავლების დახრიდან გამომდინარე გვექნება:  $\frac{\pi}{2} - \delta \leq \theta_2 \leq \frac{\pi}{2} - \gamma$ . ე.ი., სავარაუდოდ,  $60^\circ \leq \theta_2 \leq 70^\circ$ . თუ მხედველობაში მივიღებთ აღნიშნულ შეზღუდვას (15) გამოსახულებიდან პირდაპირი ჭავლისათვის გვექნება  $Q_2 \approx 1.7 Q_3$ . ამრიგად, რადგანაც შეჯახებამდე ჯამური წყლის ხარჯი  $Q = 3Q_3$ , მივიღებთ, რომ  $A_4$  ჭავლის ინტენსივობა  $Q_4 \approx 1.3 Q_3$ . რაც შეეხება უკუ ჭავლის მიმართულებას, ანუ  $\theta_4$  კუთხეს, მის სიდიდეს, წყლის შეგუბების ეფექტზე გავლენის თვალსაზრისით, პრინციპული მნიშვნელობა არ აქვს. თუმცა, სწორედ უკუ ჭავლი აყალიბებს სტაგნაციის ზონას მაშინ, როდესაც წყლის შეგუბების გამომწვევი სხვა ფაქტორები არ არსებობენ, ან მათი მოქმედება ნიველირებულია. ამრიგად, მოსალოდნელია, რომ ხაოიანობის ეფექტის მსგავსად, მეორე გვირაბის წინ დამონტაჟებული მიმართველი კედლები შეამცირებენ წყლის ხარჯს მეორე გვირაბში. ამრიგად, თუ ნალექი ექსტრემალურ დონეს მიაღწევს, ყველა ნეგატიური ფაქტორის ერთობლივი მოქმედება დახურულ კალაპოტში გარდაუვლად გამოიწვევს წყლის სწრაფ შეგუბებას მდინარე ვერეს ხეობაში. კერძოდ, როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ყიფშიძის ქუჩის მიმდებარე ვერეს ხეობის მონაკვეთზე 13.06.2015წ. ღამეს ჩამოყალიბებული სპონტანური საგუბარის სავარაუდო მოცულობა უნდა ყოფილიყო  $W_2 \approx 1.6 \cdot 10^6 \text{ მ}^3$ . მისი გავსების შემდეგ მოხდა წყლის გადადინება, რამაც მნიშვნელოვნად გაზარდა კატასტროფული წყალდიდობის მასშტაბი.

### წყლის ხარჯის მოდელური შეფასება

ცნობილია რამდენიმე განსხვავებული მონაცემი, რომელიც დაკავშირებულია წყლის ხარჯთან 13.05.2015 წლის კატასტროფული წყალმოვარდნის დროს [7,8]. ჩვენი შეხედულებით, ეს მონაცემები სადავოა. მიგვაჩნია, რომ შეფასების საფუძველი უნდა იყოს არა ზედმეტად დეტერმინირებული, თანაც არც თუ საიმედო, რაოდენობრივი მონაცემები, არამედ მათემატიკურად გამყარებული თვისებრივ-რაოდენობრივი ანალიზი. ამისათვის შეიძლება მივმართოთ ჰიდროდინამიკურ თეორიას, რომელიც იძლევა რეალური ვითარების კორექტულად მოდელირების საშუალებას. კერძოდ, წყალმოვარდნის დროს წარმოქმნილი

სპონტანური საგუბარების დაცლის პროცესის ანალიზის დროს საჭიროა გამოვიყენოთ ფიზიკური ანალოგია რეზერვუარიდან დიდი ზომის ხვრელში წყლისგადინების მოვლენასთან. ამ დროს საჭიროა წყლის ხარჯის ფორმულაში გათვალისწინებული უნდა იყოს ე.წ. წყლის ნაკადის კუმშვის ეფექტი. ამ მოვლენას რაოდენობრივად ასახავს ემპირიული გზით განსაზღვრული კოეფიციენტი  $\epsilon=0.6-0.7$ . პირველი მნიშვნელობა შეესაბამება ისეთ რეზერვუარს, რომლის სიმაღლე ხვრელიდან საგუბრის ზედაპირამდე მინიმუმ 3-ჯერ ნაკლებია ხვრელის დიამეტრზე, ხოლო მეორე-ე.წ. „სრულყოფილ“ სიტუაციას, ანუ როცა  $h > 3d$ . ამიტომ, მიუხედავად იმისა, რომ დახურული კალაპოტის გვირაბების სიმაღლე  $h = 9d$ , რადგანაც მააპროქსიმირებელი მილის დიამეტრი  $D = 8 d$ , შეგვიძლია მივიღოთ, რომ  $\epsilon \approx 0.65$ . ამიტომ, წყლის ხარჯის სიდიდის შეფასებისათვის ქვემოთ გამოყენებული იქნება ფორმულა (2)-ის შემდეგი მოდიფიკაცია [2,4]

$$Q = 0.65\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \bar{v}, \quad (17)$$

სადაც  $\bar{v}$  – წარმოადგენს გვირაბში (რეზერვუარის ხვრელში) წყლის დინების საშუალო ჰიდროდინამიკურ სიჩქარეს. ეს პარამეტრი განსხვავდება გვირაბის შესასვლელში წყლის სიჩქარისაგან, რომელიც დამოკიდებულია ჰიდრაულიკურ წინააღმდეგობაზე. ამიტომ ის უნდა განისაზღვროს (13),(10),(6),(7),(9) და (8) ფორმულების საშუალებით. პირველ რიგში საჭიროა ვიცოდეთ წყლის მაქსიმალური სიჩქარე გვირაბის შესასვლელში, რომელიც დამოკიდებულია საგუბარში წყლის დონეზე. როცა გვირაბის ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობა გამოწვეულია მისი შიდა ზედაპირის ხაოიანობით, ეს პარამეტრი გვირაბში წყლის დინების მოძრაობის სიჩქარის ერთ-ერთი მახასიათებელია. რადგანაც ეს სიჩქარე ცვლადია, შემდგომი მიახლოებითი რიცხვითი შეფასებებისათვის საჭიროა განისაზღვროს მისი საშუალო სიდიდე. ამისათვის ყველაზე უფრო უპრიანია (13) ინტეგრალური ფორმულის გამოყენება, თუმცა, აგრეთვე დასაშვებია მექანიკური საშუალოს განსაზღვრა (12) ფორმულის საშუალებით. კერძოდ, რადგანაც  $H_0 = 17d$ (13)-იდან გვექნება  $\bar{u}_1 \approx 12.2 \text{ მწმ}^{-1}$ , ხოლო (12)-იდან  $\bar{u}_2 = \frac{u_{max}}{2} \approx 9,2 \text{ მწმ}^{-1}$ . რადგანაც ამ სიდიდეებს შორის სხვაობა საკმაოდ მცირეა, შემდგომში გამოვიყენოთ მათი საშუალო  $\bar{u}_2 \approx 11.7 \text{ მწმ}^{-1}$ , როგორც გვირაბში წყლის შედინების მახასიათებელი სიჩქარე.

შემდეგი ნაბიჯია დინამიური სიჩქარის მნიშვნელობის განსაზღვრა (10) ფორმულიდან გვირაბის შიდა ზედაპირის  $k=15\text{მმ}$  ხაოიანობისათვის;  $\mathcal{V}_* \approx 0,7 \text{ მწმ}^{-1}$  ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის კოეფიციენტის ნახევრადემპირიული ფორმულების განსხვავებულობის გამო გამოვიყენოთ ორივე მათგანი. ამრიგად, (6) და (7) მოგვცემს:  $\lambda_1 \approx 0.047$  და  $\lambda_k \approx 0.13$ . შესაბამისად, (8)-იდან გვექნება გვირაბში წყლის დინების საშუალო ჰიდროდინამიკური სიჩქარის ორი მნიშვნელობა:  $\bar{v}_1 \approx 9.1 \text{ მწმ}^{-1}$  და  $\bar{v}_2 \approx 5,5 \text{ მწმ}^{-1}$ . (9) ფორმულიდან მიიღება მხოლოდ ერთი სიდიდე:  $\bar{v}_3 \approx 5.4 \text{ მწმ}^{-1}$ . ამრიგად, (17) ფორმულა იძლევა წყლის ხარჯის შემდეგ სავარაუდო მნიშვნელობებს:

$$Q_1 \approx 298 \text{ მ}^3 \text{ წმ}^{-1}, Q_2 \approx 180 \text{ მ}^3 \text{ წმ}^{-1}, Q_3 \approx 177 \text{ მ}^3 \text{ წმ}^{-1}. \quad (18)$$

ამრიგად 13.05.2015 წლის კატასტროფული წყალდიდობის დროს, სვანიძის ქუჩაზე წარმოქმნილი საგუბარის დაცლის პროცესში, დახურული კალაპოტის პირველ გვირაბში წყლის ხარჯის სიდიდის ცალსახად განსაზღვრა შეუძლებელია. პირველ რიგში, ეს ფაქტი

დაკავშირებულია ლაბორატორიული ექსპერიმენტებით დადგენილი მორფოლოგიური კავშირების ნახევრად ემპირიული ხასიათიდან. ამის გამო შეუძლებელი აღმოჩნდა ჰიდროდინამიკური პარამეტრების ფუნქციონალური დამოკიდებულების გამოსახვა რომელიმე უნივერსალური ანალიზური ფორმულით დადგენილი კავშირების რაოდენობრივი მახასიათებლების ზუსტი განსაზღვრა. სწორედ ამიტომ (8) ფორმულაში გამოყენებული იყო ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის კოეფიციენტის ორი განსხვავებული სიდიდე, რაც შესაბამისად აისახა მნიშვნელოვან სხვაობაში წყლისხარჯის სიდიდეში. თუმცა (8)-ის ალტერნატიული (9) ფორმულით მიღებული  $Q_3$  სიდიდე ფაქტიურად დაემთხვა  $Q_2$ -ს, რაც გარკვეულწილად შეიძლება ნიშნავდეს (7) ფორმულის უპირატესობას (6)-თან შედარებით. ჩვენი შედეგების [7,8] ნაშრომების მონაცემებთან შედარება გვიჩვენებს მნიშვნელოვან რაოდენობრივ სხვაობას, რაც აშკარად დაკავშირებულია წყლის ხარჯის გამოთვლის მეთოდისკასთან. კერძოდ [6]-ში გამოყენებულ იყო ვერეს კალაპოტში დინების მახასიათებელი სიჩქარის ორი მნიშვნელობა:  $v_1 = 4\text{მწმ}^{-1}$  და  $v_2 = 6\text{მწმ}^{-1}$ , რომელთათვისაც განსაზღვრული იქნა წყლის ხარჯის ორი სავარაუდო ინტერვალი:  $Q_1 \approx 220 - 480\text{მ}^3\text{წმ}^{-1}$  და  $Q_2 \approx 320 - 720\text{მ}^3\text{წმ}^{-1}$ . ასევე, დინების სიჩქარის იგივე  $v_2$  სიდიდისათვის გარემოსა და ბუნებრივი რესურსების სამინისტროს გარემოს ეროვნული სააგენტოს ანგარიშში [7] მოცემულია სიდიდე  $Q = 468\text{მ}^3\text{წმ}^{-1}$ . აქ აგრეთვე ნახსენებია წყლის ხარჯის ისტორიული მაქსიმუმის სიდიდე  $Q = 259\text{მ}^3\text{წმ}^{-1}$ , რომელიც განისაზღვრა 1960 წლის 5 ივლისის წყალმომარდნის ირიბი მონაცემებით. მიუხედავად იმისა, რომ არ ვიცით, თუ რანაირად მოხდა ასეთი ხარჯის განსაზღვრა, ეს სიდიდე საკმაოდ რეალურად მოსჩანს, რადგან (18)-ის თანახმად, ახლოსაა  $Q_3$ -თან. ასეთი მსგავსება ადასტურებს ვარაუდს 13.05.2015 წ. წყალმომარდნა და 04.07.1960 წყალმომარდნის თანაზომადობასთან დაკავშირებით.

მოცემული ნაშრომის ერთ-ერთი მიზანია წყალმომარდნის დროს სვანიდის ქუჩაზე და თამარაშვილის მაგისტრალსა და გაბაშვილის ქუჩებს შორის წარმოქმნილი დროებითი საგუბარების მოცულობის რეალურად შეფასება. ამასთან დაკავშირებით უნდა ავლნიშნოთ, რომ უშუალოდ კატასტროფის შემდეგ I საგუბარის სავარაუდო მოცულობა აშკარად არ იყო კორექტულად შეფასებული. შესაძლოა, რომ შეცდომა გამოიწვია ახალდაბის მიდამოში ჩამოწოლილი მძლავრი მეწყრის ეფექტის მცდარმა ინტერპრეტაციამ, რომლის მიხედვით მოხდა ხეობის ჩაკეტვა და ამის გამო, დიდი მოცულობის მქონე ღვარცოფული მასის დაგროვება. ამ შეხედულების უსაფუძვლოება აშკარაა, თუ მაგალითად, დავეყრდნობით წყალმომარდნის ერთერთი უშუალო დამკვირვებლის ინფორმაციას, რომლის თანახმად სვანიდის ქუჩაზე წარმოქმნილი I საგუბარი დაიცალა დაახლოებით 20 წუთის განმავლობაში [6]. ამ ინფორმაციის გადასამოწმებლად შეიძლება გამოვიყენოთ ჩვენს მიერ ზემოთ განსაზღვრული I საგუბარის სავარაუდო მოცულობა  $W_1 \approx (3.1 \cdot 10^5 - 4.4 \cdot 10^5)\text{მ}^3$ . დამკვირვებლის ამ ცნობის შესაბამისად, საგუბარის მოცულობის ამ ინტერვალში, მის დაცლისათვის საჭირო იყო წყლის ხარჯი  $Q_* \approx 258 - 370/\text{მ}^3\text{წმ}^{-1}$ . შესაძლოა, ამ ინტერვალის ქვედა სიდიდე საკმაოდ რეალური იყოს, რადგანაც მეტნაკლებად შესაბამისობაშია 5.07.21960 წ. ისტორიულ მონაცემთან. გარდა ამისა, ჩვენს მიერ მიღებული მონაცემებით (18) გვექნება I საგუბარის დაცლის მახასიათებელი დროის ორი ინტერვალი, რომელთაგან პირველი ფაქტიურად ემთხვევა დამკვირვებლის მიერ დაფიქსირებულ დროს

$$t_1 = W_1/Q_1 \approx 17 - 25 \text{ წთ}, t_2 = W_1/Q_{2,3} \approx 29 - 40 \text{ წთ.}$$

თუმცა, მიუხედავად ასეთი თანხედენისა, ბუნებრივია, რომ არ შეიძლება გამოვრიცხოთ გარკვეული სკეპტიციზმი დამკვირვებლის მიერ მოწოდებული ინფორმაციის სანდოობასთან დაკავშირებით.

**დასკვნა.** მრავალწლიანი გამოცდილებით ცნობილი იყო, რომ მდინარე ვერეს ადრეული პირველი ორი გვირაბის შესასვლელი პრაქტიკულად ყოველთვის წარმოადგენდა ყველა მასშტაბური წყალდიდობის საწყის ადგილს. როგორც 13.06.2015 წლის კატასტროფულმა წყალმოვარდნამ აჩვენა, ხელოვნური დახურული კალაპოტის შემადგენელი ახალი გვირაბების აგებისა და ძველი გვირაბების მოდერნიზაციის შემდეგ წყალდიდობის მასშტაბები კიდევ უფრო გაიზარდა. ამას, სავარაუდოდ, პირველი გვირაბის შესასვლელის დროებით ჩახერგვასთან ერთად, მნიშვნელოვნად შეუწყო ხელი დახურული კალაპოტის შიდა ზედაპირის ხაოიანობამ და ამ გვირაბის მინაშენის კრიტიკულმა სიმრუდემ. განსაკუთრებულ ყურადღებას ითხოვს ფაქტი, რომ სივრცეში პირველი გვირაბის გამოსასვლელსა და ბოლო გვირაბის შესასვლელს შორის დატბორვა განვითარდა პირველი გვირაბის შეზღუდული გამტარუნარიანობის დროს, როცა მისი შესასვლელი ჩახერგილი იყო. ამ დროს თამარაშვილის მაგისტრალი, რომლის ქვეშ გადის პირველი გვირაბი, წყალგამყოფი აღმოჩნდა, განსხვავებით ვაკე-საბურთალოს დამაკავშირებელი ბერძენიშვილის ქუჩისაგან, რომლიდანაც მოხდა წყლის გადადინება ყიფშიძის ქუჩის მიმდებარე მონაკვეთზე მეორე საგუბარის წარმოქმნის გამო. ამიტომ, საკმაოდ სარწმუნოდ წარმოგვიდგება მოსაზრება, რომ პირველი გვირაბის გარდა, ლოკალური დატბორვის ეფექტი წარმოიქმნა აგრეთვე სხვა გვირაბების შესასვლელებშიც. პირველ რიგში, ასეთი ადგილი აღმოჩნდა მეორე გვირაბი, და სავარაუდოდ, ბოლო მოდერნიზირებული გვირაბი, რომელიც აერთებს ვერეს მტკვართან. ამიტომ მიგვაჩნია, რომ მომავალში ვერეს ხეობაში წყალდიდობის განმეორების კატასტროფული შედეგების თავიდან აცილების მიზნით საჭიროა დახურული კალაპოტის ყველა ტექნიკური ხარვეზის სრულფასოვანი ანალიზი. ამის დასტურად ქვემოთ მოყვანილია რამდენიმე ამონარიდი ნორმატიული მოთხოვნების კრებულიდან [12].

## 1. ზოგადი დებულებები

1.1. ახალი და არსებული ჰიდროტექნიკური გვირაბების რეკონსტრუქციის ძირითადი ტექნიკური გადაწყვეტილებები (მუშაობის ჰიდრავლიკური რეჟიმი, გაყვანის სიღრმე, განლაგება გეგმაში და გრძივ პროფილში, განივი კვეთა, მოპირკეთების ტიპი და სხვა) მიღებული უნდა იქნას ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლების ვარიანტების შედარების საფუძველზე ჰიდროკვანძის, მელიორაციული სისტემის ან წყალმომარაგების სისტემების ნაგებობის ზოგადი შემადგენლობის გათვალისწინებით, მათი ექსპლუატაციის პირობების, გვირაბების დანიშნულების, დაგეგმილი სამუშაოების საშუალებების და ვადების, მშენებლობის რაიონის ტოპოგრაფიული, საინჟინრო-გეოლოგიური, ჰიდროგეოლოგიური, კლიმატური და სხვა პირობების გათვალისწინებით.

საპროექტო გადაწყვეტილების არჩეული ვარიანტი უნდა უზრუნველყოფდეს ნაგებობის გამძლეობას, მდგრადობას და ეკონომიურობას, სამშენებლო და სარემონტო სამუშაოების ინდუსტრიალიზაციის და მექანიზაციის შესაძლებლობას, გვირაბების ოპტიმალურ საექსპლუატაციო ხარისხს.

1.2. I და II კლასის ძირითადი ჰიდროტექნიკური გვირაბების პროექტებში გათვალისწინებული უნდა იქნას საკონტროლო-საზომი აპარატურის მონტაჟი მშენებლობის პრო-

ცესში და მისი ექსპლუატაციის პერიოდში ნაგებობების მუშაობაზე ნატურული (ბუნებრივ გარემოში) დაკვირვებების ჩატარების მიზნით, გვირაბების მოპირკეთების, მისი მიმდებარე გრუნტის, ჰიდრავლიკური და ფილტრაციის რეჟიმების მდგომარეობის შესაფასებლად.

## 2. გვირაბის ტრასა და განივი კვეთა

2.1. ჰიდროტექნიკური გვირაბების პროექტირებისას შეძლებისდაგვარად უნდა იქნას თავიდან აცილებული უბნები, რომლებიც განლაგებულია გვირაბის მშენებლობის საინჟინრო-გეოლოგიურ და ჰიდროგეოლოგიურ არახელსაყრელ პირობებში (მნიშვნელოვანი ტექტონიკური რღვევები, აირგამოყოფა, მიწისქვეშა წყლების ნაკადი, მეწყერები, კარსტები), ასევე უბნები, რომლებიც ხასიათდება არახელსაყრელი სანიტარული პირობებით (ცხოველთა სამარხები, სასაფლაოები, ნაგავსაყრელები, ფილტრაციის ველები).

2.2. გვირაბის ტრასა უნდა იყოს სწორხაზოვანი და მინიმალური სიგრძის. არასწორხაზოვანი ტრასის მიღება დასაშვებია მხოლოდ იმ შემთხვევებში, როცა ეს გამოწვეულია ჰიდროკვანძის შედგენის მოთხოვნებით, დამატებითი სანგრევის გახსნის აუცილებლობით ან გვირაბის საკმარისი სიღრმის უზრუნველსაყოფად, ასევე, როცა აუცილებელია 2.1 პუნქტში მითითებული გვირაბის არახელსაყრელ პირობებში განლაგების თავიდან აცილება.

2.3. დაწნევითი გვირაბის მთელს სირგმეზე თაღის ჭრილის ქვეშ უზრუნველყოფილი უნდა იქნას წნევის მარაგი არანაკლებ 0,02 პასკალი.

2.4. გვირაბის ტრასის მოხვევის კუთხეები გეგმაში წყლის ჭავლის 10მ/წმ ნაკლები სიჩქარისას მიღებული უნდა იქნას არაუმეტეს 60°, ხოლო მომრგვალების რადიუსი – არანაკლებ გვირაბის ხუთი განის (დიამეტრის) ჯამური სიგანის. მოხვევის კუთხის გაზრდა და მომრგვალების რადიუსის შემცირება მოცემულთან შედარებით, ასევე მათი დაშვებული მნიშვნელობები წყლის ნაკადის 10მ/წმ მეტი სიჩქარის დროს აუცილებელია მიღებულ იქნას ლაბორატორიული კვლევების საფუძველზე.

2.5. გვირაბის მრუდხაზოვანი ტრასის საწყისი და საბოლოო უბნები უნდა იყოს სწორხაზოვანი სიგრძით, არანაკლებ გვირაბის განისა (დიამეტრის), მინიმუმ 6მ.

2.6. გვირაბების გრძივი კვეთის ზომები უნდა განისაზღვროს ჰიდრავლიკური და ტექნიკურ-ეკონომიკური გათვლების საფუძველზე.

2.7. ცვლადი ჰიდრავლიკური რეჟიმისა და გვირაბში წყლის 10მ/წმ მეტი სიჩქარის შემთხვევაში განივი კვეთის ზომები აუცილებელია დაზუსტდეს ლაბორატორიული კვლევების საფუძველზე, ანალოგიურ პირობებში არსებული გვირაბების ექსპლუატაციის გამოცდილების გათვალისწინებით.

2.8. წყლის დონის ზემოთ არსებული საჰაერო სივრცის სიმაღლე უწნევო გვირაბში ნაკადის 10მ/წმ-მდე სიჩქარით დადგენილი მოძრაობისას მიღებული უნდა იქნას ჰიდრავლიკური გათვლებით, მაგრამ არანაკლებ 0,07 გვირაბის სიმაღლისა და არანაკლებ 40 სმ.

## ლიტერატურა

1. კერესელიძე ზ., შერგილაშვილი გ. მდინარე ვერეს 13.06.2015 წლის წყალმოვარდნა და დახურული კალაპოტის ჰიდროდინამიკური პრობლემა. გეოფიზიკის ინსტიტუტის შრომების კრებული. ტ LXVI, 2016, გვ. 199-221.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Москва: Наука, 1973, гл. X. , 847 с.

3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Гл.4, Москва, Наука, 1988, 733с.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Гл. XX, Москва, Наука, 1974, 711 с.
5. СП 102.13330.2012.Туннели гидротехнические. Актуализированная редакция, СНиП 2.06.09-8, 2012.
6. კერესელიძე დ., ალავერდაშვილი მ., ცინცაძე თ., ტრაპაიძე ვ., ბრეგვაძე გ.რა მოხდა 2015 წლის 13 ივნისს მდინარე ვერეს წყალშემკრებ აუზში.თბილისი,საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტის გამომცემლობა, 2015 წ. 40გვ.
7. CNN საქართველო მდინარე ვერეს 2015 წლის 13 ივნისის წყალმოვარდნა. ანგარიში მომზადდა „ტყის მდგრადი მართვა საქართველოში“ პროექტის ფარგლებში, ავსტრიის თანამშრომლობა განვითარებისათვის – ADC -ის მხარდაჭერით. თბილისი 2015 წ. 35გვ.
8. Landau L.D., Lifshitz E.M. Hydrodynamics. Moscow, Publishing House NAUKA, 1988, v. 4 (in Russian).
9. Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости. Москва, Наука, 1979, 536 с.
10. Биргкоф Г., Сарантоннело Э. Струи, следы и каверны. Москва, Мир, 1964.
11. Белоцерковский П. О соударении двух свободных плоских струй идеальной несжимаемой жидкости. В кн.Материалы всесоюзной конференции по краевым задачам. Казань, 1970, изд.казанскогогосуниверситета.
12. Building Normsand Rules. Hydrotechnicaltunnels. Actualizedpublication, SNiP 2.06.09-8 SP 102.13330.2012 (in Russian).

## **წყლის ხარჯის შეფასება მდინარე ვერეს 13.06.2015 წლის წყალმოვარდნის დროს**

**კერესელიძე ზ., ხვედელიძე ი.**

### **რეზიუმე**

1962 წლიდან უკანასკნელი კატასტროფული წყალმოვარდნის მომენტამდე სვანობის ქუჩაზე მდებარე თბილისის სახ. უნივერსიტეტის ჰიდროლოგიურ სადგურში მიმდინარეობდა უწყვეტი დაკვირვება მდინარე ვერეს ჰიდროდინამიკური რეჟიმის პარამეტრებზე. ნებისმიერი სხვა მდინარის მსგავსად, ვერესათვისაც მთავარი მახასიათებელია წყლის ხარჯის ცვლილება ექსტრემალურ მეტეოროლოგიურ პირობებში. ამ თვალსაზრისით იგი ტიპური მთის მდინარეა, რადგანაც ვერეს, ნახევარსაუკუნოვანი მონიტორინგის მონაცემების თანახმად, ახასიათებს წყლის ხარჯის მკვეთრი ცვლილება:  $Q_{max} \approx 10^2 * Q_{min}$  მინ კერძოდ, ხშირად განმეორებადი წყალმოვარდნების დროს სისტერმატიურად იტბორებოდა ვერეს ხეობის უკანასკნელი მონაკვეთი თამარაშვილის მაგისტრალსა და ზოოპარკს შორის. თუმცა, უკანასკნელი წყალმოვარდნის მასშტაბმა ყველა ადრეულ მოვლენას გადააჭარბა. ჩვენი შეხედულებით ამაში გამორჩეულად ნეგატიური როლი შეასრულა ვერეს ხეობაში 2011 წელს ექსპლოატაციაში შესულმა ჩქაროსნული გზის მონაკვეთმა. მისი კონსტრუქციის ძირითადი ელემენტია რამდენიმე გვირაბისაგან შემდგარი დახურული კალაპოტი, რომელსაც აუცილებლად გააჩნია მნიშვნელოვანი ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობა, ამ თვალსაზრისით უმნიშვნელოვანესია თამარაშვილის მაგისტრალის ქვეშ გამავალი გვირაბი (მიწისქვეშა ხიდი), რომლის სიგრძე რეკონსტრუქციის შედეგად არსებითად გაი-

ზარდა (108 მ+252 მ). აღნიშნავთ რომ, ახალი გვირაბების გოფირებული შიდა ზედაპირის ხაოიანობა ჰიდრავლიკური ობიექტებისათვის დასაშვებზე გაცილებით უფრო მაღალი იყო, რაც აუცილებლად გამოიწვევდა ექსტრემალურ პირობებში წყლის ხარჯის შემცირებას. ამასთან ერთად პირველი გვირაბში იდამატებით არსებობდა კიდევ ერთი ნეგატიური ფაქტორი-მინაშენის მნიშვნელოვანი სიმრუდე, რომელიც ზედაპირული შეფასებით კრიტიკულის ზღვარზეა. ექსტრემალურ პირობებში გვირაბებში წყლის დინება განვითარებული ტურბულენტობის პირობებში იქნებოდა, თუმცა ამ ეფექტის რაოდენობრივი შეფასების მკაცრი თეორია არ არსებობს. ამიტომ, პირველ მიახლოებაში წყლის ხარჯის შეფასებისათვის გამოვიყენეთ ხაგენ-პუაზილის ფორმულის მოდიფიკაცია

$$Q_1 = \pi R^2 \bar{u}_1, (1)$$

სადაც  $R$  - ვერეს პირველი გვირაბის რადიუსია,  $\bar{u}$  - წყლის საშუალო სიჩქარ ეგვირაბში შესვლამდე. მაგრამ ტურბულიზაციის ეფექტი აუცილებლად შეცვლიდა საშუალო სიჩქარეს მილში წყლის დინებისას. ამ ეფექტის შეფასებისათვის გამოვიყენეთ ე.წ. დინამიკური სიჩქარე

$$V^* = \left(\frac{\lambda}{8}\right)^{1/2} \bar{u}_1 (2)$$

სადაც  $\lambda$  - ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის კოეფიციენტი.

მოდელური სცენარის მიხედვით ჩვენს მიერ გაანალიზებულია წყლის ხარჯის ცვლილების სხვადასხვა ვარიანტი. ამისათვის გამოყენებულია ექსტრემალური სიჩქარის დიაპაზონი: /6-10/ მ/წმ, და  $\lambda$  /0.03-0.15/. გარდა ამისა, ჩვენი მოდელის საშუალებით შესაძლოა საკმარისი სანდოობით რეტროსპექტიულად შეფასდეს შეგუბებული წყლის მოცულობა როგორც სვანიძის ქუჩაზე ასევე ვერეს ხეობაში თამარაშვილის მაგისტრალსა და ზოპარკს შორის.

## Оценка расхода воды во время паводка реки Вере 13. 06. 2015 года

Кереселидзе З.А., Хведелидзе И.Б.

### Реферат

С 1962 года Гидрологическая станция Тбилисского государственного университета, расположенная на улице Г. Сванидзе, выполняла наблюдения относительно параметров гидродинамического режима реки Вере вплоть до разрушительного наводнения 13.06.2015 г. Главной особенностью реки Вере, подобной любой другой горной реке, является резкое изменение потока воды в экстремальных метеорологических условиях. Согласно данным, которые были накоплены за время полувекового мониторинга, Вере характеризуется быстрым изменением потока воды:  $Q_{max} \approx 10^2 * Q_{min}$  Во время частых наводнений последняя часть ущелья Вере между шоссе Тамарашвили и зоопарком постоянно затоплялась. Однако, масштаб последнего наводнения превысил все предшествующие. По нашему мнению, это было вызвано из-за участка скоростной дороги в ущелье Вере, которая была введена в эксплуатацию в 2011 году. Главный элемент этого проекта – закрытое русло реки. Оно было сконструировано из нескольких тоннелей, у которых несомненно имелось значительное гидравлическое сопротивление. В этом отношении тоннель (подземный мост), проходящий под шоссе Тамарашвили, является



наиболее интересным. В результате реконструкции его длина значительно увеличилась. Примечательно, что шероховатость гофрированной внутренней поверхности новых тоннелей превысила уровень, допустимый для гидравлических объектов. Кроме того, в первом тоннеле очевидно действовал еще один негативный фактор, кривизна пристроенной секции. В экстремальных условиях турбулентного потока для оценки расхода воды была использована модифицированная формула Хагена-Пуазеиля

$$Q = \pi R^2 \bar{u}_1, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус первого тоннеля,  $\bar{u}_1$  – средняя скорость воды прежде. Однако, эффект турбулентности существенно влияет на среднюю скорость воды. Для оценки этого эффекта была использована т.н. динамическая скорость

$$V^* = \left(\frac{\lambda}{8}\right)^{1/2} \bar{u}_1, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления.

Для оценки величины расхода воды во время катастрофического наводнения были проанализированы различные варианты режима течения в закрытом русле. Для этого были использованы диапазоны скорости воды/6-10/ м/с гидравлического сопротивления  $\lambda$  – /0.03-0.15/. Кроме этого, наша модель позволила получить ретроспективную оценку объема резервуаров воды, спонтанно возникших на улице Сванидзе, а также на примыкающем к улице Кипшидзе участке ущелья реки Vere.

## **Evaluation of water flow at Vere during the flood of 13.06.2015**

**Kereselidze Z., Khvedelidze I.**

### **Abstract**

Since 1962 the Hydrological Station of the Tbilisi State University located in Svanidze Street had been carrying out observations on the parameters of the hydrodynamic regime of the river Vere till the last moment of the devastating flood. The main characteristic of the river Vere, like any other rivers, is variation in water flow in harsh meteorological conditions. In this regard it is a typical mountain river. According to the data that have been accumulated during half a century observations the Vere is characterized with rapid changes in the water flow:  $Q_{max} \approx 10^2 * Q_{min}$ , namely, during frequent and recurrent floods the last section of the Vere Gorge between the Tamarashvili Highway and the Zoo was permanently being flooded. However, the measure of the last flood exceeded the ones of all the predecessors. In our point of view this was caused due to the highway section, which was opened for exploitation in 2011 in the gorge of the river Vere. The main element of its construction is a closed river bed made of several tunnels, which definitely have significant hydraulic resistance. In this regard the tunnel (underground bridge) under the Tamarashvili Highway is the most interesting. As a result of the reconstruction its length significantly increased (108m+252m). It is noteworthy that roughness of the corrugated internal surface of the new tunnels exceeded the rate permissible for hydraulic units. It would obviously decrease the water flow in emergency situations. Besides, in the first tunnel there was one more negative factor – maximum bending of the added section, which is at the maximum limit according to external assessment. In emergency situation the water flow would appear under the turbulent condition developed in the tunnels. However, there is no classical theory for quantitative assessment of this effect. Therefore, for assessment of the water flow we used a modified formula of Hagen-Poiseuille in the first approximation:

$$Q_1 = \pi R^2 \bar{u}_1 . \quad (1)$$

where  $R$  is the radius of the first tunnel of the river Vere,  $\bar{u}$  is average velocity of the water before flowing into the tunnel. However, the turbulence effect would definitely change the average water velocity during flowing in the pipe, i.e., there would be difference between the water flows at the inlet and the outlet of the tunnel. For the assessment of this effect we used so called dynamic velocity  $V^* = \left(\frac{\lambda}{8}\right)^{1/2} \bar{u}_1$ . Consequently, the water flow at the outlet of the first tunnel may be determined by the following formula:

$$Q_2 = \frac{\pi R^3}{4\nu} V_*^2 \quad (2)$$

where  $\lambda$  is a coefficient of hydraulic resistance,  $\nu$  is kinetic viscosity of the water.

We have analyzed different variants of water flow according to the model scenario. For this we used maximum velocities: /6-10/ m/s, and  $\lambda$  /0.03-0.15/. Thus, the model elaborated by us enables quite reliable retrospective assessment of the values of the puddled waters both in the Svanidze Street and the Vere Gorge between the Tamarashvili Highway and the Zoo.