

UDC 624.137.2.046.3

SCOPUS CODE 2301

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2022-1-217-230>

გრუნტის წყლების გავლენა ფერდოს სტატიკურ მდგრადობაზე. დეპრესიის მრუდის განტოლება

ტარიელ კვიციანი საინჟინრო მექანიკისა და მშენებლობის ტექნიკური ექსპერტიზის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, საქართველო, 0160, თბილისი, მ. კოსტავას 68^ბ
E-mail: kvitsianitariel@gtu.ge

ლიანა ქვარცხავა საინჟინრო მექანიკისა და მშენებლობის ტექნიკური ექსპერტიზის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, საქართველო, 0160, თბილისი, მ. კოსტავას 68^ბ
E-mail: l.kvartckava@gtu.ge

რეცენზენტები:

ლ. ჯიქიძე, სტუ-ის სამშენებლო ფაკულტეტის ასოცირებული პროფესორი

E-mail: lev.jikidze@gtu.ge

ი. ქადარია, სტუ-ის სამშენებლო ფაკულტეტის პროფესორი, ტ.მ.დ.

E-mail: i.kadaria@gtu.ge

ანოტაცია. მიწისქვეშა წყლები ერთგვაროვანი მთის ქანების ფერდოს მასივში მიედინება. ფილტრაციული ძალები გრუნტის სიმტკიცის დაკარგვისა და ფერდოს დეფორმაციის ძირითადი პირობაა, რაც მეწყერ-ჩამონაქცევების წარმოქმნის საფუძველი ხდება.

ფერდოს მდგრადობის ანალიზის ჩასატარებლად მნიშვნელოვანია გრუნტის წყლების დონეთა მერყეობისა და დეპრესიული მრუდის მდებარეობის განსაზღვრა. ამ ამოცანის გადასაწყვეტად შეს-

წავლილია ფილტრაციული წყლის ნაკადის მოძრაობა ერთგვაროვანი გრუნტისგან შემდგარ ფერდოში, რომელიც ჰორიზონტისადმი α კუთხით დახრილ წყალშეუღწევ კლდოვან ფუძეს ეყრდნობა. შედგენილია ფილტრაციული წყლის ნაკადის მოძრაობის ჩვეულებრივი დიფერენციალური განტოლება, დაყვანილია პირველი რიგის წრფივ განტოლებაზე, რომელსაც აკმაყოფილებს დეპრესიის წირის განტოლება. აღწერილია მეთოდი, როგორ ავაგოთ დეპრესიის თეორიული მრუდი დიფერენციალური განტოლების ამონახსნის მეშვეობით. ამ მე-

თოდის თანახმად, შერჩეულია დეპრესიის წირზე მდებარე რამდენიმე მახასიათებელი წერტილი. ფერდოს გეომეტრიული პარამეტრებისა და გრუნტის მახასიათებელთა სხვადასხვა მნიშვნელობით განისაზღვრება მახასიათებელი წერტილების კოორდინატები.

დეპრესიის მრუდის ფერდოს ზედაპირზე გამოსვლის და შუა წერტილის კოორდინატების განსაზღვრისათვის, რიცხვითი მეთოდით მიღებული შედეგებით აგებულია დამხმარე გრაფიკები. საილუსტრაციოდ მოყვანილია ტესტური მაგალითის ამოხსნა.

მთის ქანების ფერდოს გრუნტში ფილტრაციული წყლის მოძრაობისას დასაბუთებულია ფილტრაციული ძალების ანუ ჰიდროდინამიკური წნევის მოქმედების გავლენა გრუნტის ფერდოს მდგრადობის გაუარესებაზე. ფერდოს მდგრადობაზე გაანგარიშებისას გათვალისწინებულია დამატებითი ძალები: ჰიდროსტატიკური და ჰიდროდინამიკური წნევები. მეტწილად ამ ორი ძალის ჯამური სიდიდეების ზემოქმედებით გრუნტის მასივის სიმტკიცე ირღვევა და მეწყერ-ჩამონაქცევები წარმოიქმნება. ფერდოს მდგრადობის ანალიზისათვის განხილულია ფერდოს ზედაპირზე პირობითად აღებული ერთეული მოცულობის გრუნტის ნაწილაკის მდგრადობა. მიღებულია ძვრაზე მდგრადობის კოეფიციენტის გამოსათვლელი ფორმულა.

საკვანძო სიტყვები: გრუნტი; გრადიენტი; დეპრესიის წირი; მარაგის კოეფიციენტი; მდგრადობა; ფერდო; ფილტრაცია.

შესავალი

ბუნებრივ მდგომარეობაში მთის ქანები მუდმივად განიცდის ბუნებრივი ფაქტორების რთულ ზემოქმედებას. ჰაერის ტემპერატურის ცვლილება დღე-ღამის განმავლობაში მასივის დეფორმაციას იწვევს. წლის განმავლობაში გაყინვა და გალღობა, ხეები და ბალახი და ასევე ქარიც ქანებზე მოქმედებს. ეს პროცესი მიმდინარეობს ძალიან ნელა და ისეთი ძლიერი მოვლენები, როგორიცაა მიწისძვრები, აფეთქებითი სამუშაოები აჩქარებს მთის ქანების მასივის ფიზიკური და ქიმიური თვისებების ცვლილებას.

მთის ქანების ამოღება მკვეთრად არღვევს მთის მასივების ბუნებრივ რეჟიმს, ცვლის ძაბვის ველს. მთის ქანებში წარმოიშობა ღრუები, გაშიშვლებული ქანების დამატებითი სიბრტყეები, იწყება გამოფიტვის პროცესი. ქანების მასივი, რომლებზეც არ მიმდინარეობს სამთო სამუშაოები, მოცულობით დამაბულ მდგომარეობაშია.

მთის ქანების დამუშავებისას დამატებითი ძაბვების გაჩენას ასევე ხელს უწყობს აფეთქებითი სამუშაოების წარმოება, დამხმარე მოწყობილობების მასა, კარიერის კიდეზე და მის სიახლოვეს ყრილის მასა.

დრენაჟული სისტემების გამოყენებით იზრდება მიწისქვეშა წყლების სიჩქარე, რაც იწვევს ჰიდროდინამიკური წნევის გაზრდას და ძაბვების გადანაწილებას ფერდოს სიახლოვეს.

მთაზე ღია სამუშაოების ჩატარება იწვევს ღია ქანების გაშიშვლებას, რომლებიც ადრე მასივის სიღრმეში იმყოფებოდა. გაშიშვლების შედეგად იწყება მათი ფიზიკური და ქიმიური გამოფიტვა. ასევე იწვევს ქანების სიმტკიცის თვისებების რღვევას. ამო-

ლების შედეგად ზედა მოშიშვლებული ფენები ამოიბურცება და მათი სიმტკიცე იკლებს. ქანების სიმტკიცეზე ასევე არსებითად მოქმედებს დატენიანება, რომლებიც ადრე მშრალ მდგომარეობაში იყო [1,2].

წყლის გავლენა ფერდოს მასივის დეფორმაციაზე. მიწისქვეშა და ზედაპირული წყლები ბუნებრივი და ხელოვნური ფერდობების მიწის ქანებზე მექანიკურ, ქიმიურ და ელექტროქიმიურ ზემოქმედებას ახდენს. კალთების ბაქნებზე წყლის დაგროვება ზრდის ჰიდროსტატიკურ და ჰიდროდინამიკურ ძალებს, კალთების დაღბობას, ზედაპირულ ჩარეცხვას, ქანების წყლით გაჯირჯვას და გრუნტის მასივის სიმტკიცის დაკარგვას, რაც ფერდობისა და ბორტების დეფორმაციის გამოწვევის საფუძველი ხდება, წარმოიქმნება მეწყერ-ჩამონაქცევები.

გრუნტი, რომლისაგანაც წარმოქმნილია ფერდო, ყოველთვის ცოტად თუ ბევრად წყალშედწევადია, ამიტომ ფერდოს ტანში ფილტრაციული ნაკადი იქმნება. ჩვეულებრივ, ფილტრაციული ნაკადის ყველაზე ზედა ფენის წირს დეპრესიის მრუდს უწოდებენ.

ფერდობის ფილტრაციული გაანგარიშებისას კაპილარულ და ფსკერულ წყლებს, ჩვეულებრივ, უგულებელყოფენ. მაგრამ, ასეთი წყლის არსებობა ფორებში ყოველთვის უნდა იქნეს გათვალისწინებული.

კაპილარული აწევის მაქსიმალური სიმაღლე, რომელიც გრუნტის ფორების ზომებზეა დამოკიდებული, სხვადასხვაა: წვრილქვიშიანი გრუნტებისათვის – 0,5–1,0 მ-მდე, ხოლო თიხოვანი გრუნტებისათვის – მნიშვნელოვნად მეტი.

ფერდობის მდგრადობის გაანალიზებით ვრწმუნდებით, რომ, გრუნტის წყლების არსებობის

პირობებში, მისი გრუნტის ჩონჩხი იმყოფება ფილტრაციული ნაკადის მუდმივი ზემოქმედების ქვეშ, ამიტომ შეიძლება გაჩნდეს ფილტრაციის შეყურსული სისველე, რასაც, ჩვეულებრივ, თან სდევს ფერდოს დანგრევა (მეწყერ-ჩამონაქცევი).

სტატისტიკური ცნობების თანახმად, მეწყერ-ჩამონაქცევების უმრავლესობა გამოწვეულია ფილტრაციულ ზემოქმედებათა შედეგად, ამიტომ ფილტრაციული წყლების მოძრაობის შესწავლა და მის საფუძველზე საიმედო კონსტრუქციულ ღონისძიებათა გათვალისწინება ერთ-ერთი მთავარი საკითხია დაგეგმარების დროს [2,3].

წყლის რეჟიმი (ჰიდროგეოლოგია). უმეტეს შემთხვევაში, მეწყერის წარმოქმნის მნიშვნელოვანი ფაქტორია წყალი, რომელიც მთის ქანებში შეიძლება ბმული და თავისუფალი სახით შეგვხვდეს. თიხოვან გრუნტებში მეტწილად გავრცელებულია ბმული წყალი, რომელიც, მდგრადობის თვალსაზრისით, უარყოფით გავლენას ახდენს მთის ქანების სტრუქტურაზე. გრუნტის ტენიანობა განისაზღვრება მასში ბმული წყლის მაქსიმალური რაოდენობით. თავისუფალი წყალი ავსებს მთის ქანების იმ ფორებს, რომელშიც ბმული წყალი არ არის. ის იყოფა გრავიტაციულად და კაპილარულად.

გრავიტაციულ წყალს წვეთოვანი წყლის ყველა თვისება აქვს. კერძოდ, ის მოძრაობს სიმძიმისა და ჰიდროსტატიკური წნევის ძალის გავლენით, რომლის სიდიდეც განისაზღვრება პიეზომეტრული სიმაღლით, ე.ი. მოცემულ წერტილში წყლის ზედაპირის დონის ზემოთ ამაღლებით. პიეზომეტრული წირის ასაგებად უნდა გაკეთდეს ჭაბურღილი ყრუ მილით, რომელიც წყალს მხოლოდ ქვედა თავისუფალი ზედაპირიდან მიიღებს. გამაგრებითი ღო-

ნისძიებების დაგეგმვა მოითხოვს მეწყრისა და მისი მიმდებარე ტერიტორიის ჰიდროგეოლოგიური პირობების კარგად შესწავლას. ძირითადი ამოცანა იმაშია, რომ განვსაზღვროთ გრუნტის წყლების განლაგება და მათი დონის მერყეობა. უნდა გადაიღონ ყველა ნაკადული, წყარო, გამოჟონვის ადგილები, დატენიანებული ნაკვეთების ზედაპირები, განისაზღვროს გრუნტის წყლების წნევები, აგრეთვე წყალჟონვადი შრები.

მეწყრით გამოწვეული ფერდოს რელიეფის ცვლილება მნიშვნელოვნად ცვლის გრუნტის წყლების რეჟიმს და ზედაპირზე გამოჟონვის პირობებს. წყლის ზედაპირზე გამოჟონვისას მცირდება გრუნტზე დაწნევა. ის გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე მისი წნევა გრუნტზე დახშულ პირობებში. მაგალითად, დაკვირვება გვიჩვენებს, რომ მეწყრის ენაში წყლის ნაკადის ჩახშობის პროცესს მოსდევს მეწყრის გაქტიურება და წარმოქმნა, ხოლო როდესაც შეწყდება გადაადგილებები, ნაკადულების დებეტი იზრდება. მეწყრის ზედაპირი ჩვეულებრივ წყალჟონია და აკავებს როგორც ზედაპირულ, ისე გრუნტის წყლებს. მეწყრის გაბურღვისას წარმოიქმნება წყლის ახალი ნაკადები და დატენიანებული ადგილები. ჭაბურღილების მეშვეობით კარგად უნდა დაფიქსირდეს გრუნტის წყლების სიღრმე და მათი დონის მერყეობა. ამასთან უნდა აღინიშნოს, რომ თიხოვან გრუნტებში მეწყრით გამოწვეული ფორული წნევების შეფასება, ბურღვითი სამუშაოების შესრულებისას, მარტივი დაკვირვების საფუძველზე შეუძლებელია. ამ დროს ჭაბურღილი წყლით ივსება და მის მიდამოში წყლის წნევა მცირდება. ამიტომ, ფორული წნევების გასაზომად აუცილებელია პიეზომეტრული ხელსაწყოებით სარგებლობა.

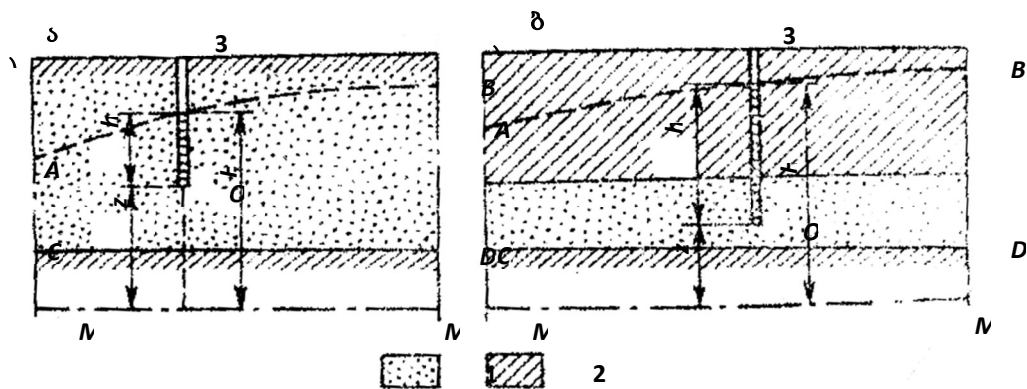
თუ ჭაბურღილებში წყლის დონე დარჩა იმავე ნიშნულზე, რაც გაბურღვამდე ეკავა, მაშინ წყლის ზედაპირს ეწოდება დეპრესიული (უდაწნეო შრე), ხოლო თუ წყლის ზედაპირი (ყრუ მილში) აიწევს წყალგამყოფი ფენის ზემოთ, რომელიც ზემოდან შემოსაზღვრულია წყალსაყრდენი შრით – პიეზომეტრული ზედაპირი (დაწნევითი შრე).

გრუნტის წყლების დონის ქვემოთ მთის ქანები გაჟღენთილ მდგომარეობაშია და ჰიდროსტატიკური წნევა ატმოსფერულზე მეტია. ამის ზემოთ გრავიტაციული წყალი არ არის და თავისუფალი წყალი იმყოფება კაპილარულ მდგომარეობაში.

წყალშემცველი გრუნტის ფორებსა და ბზარებში ფილტრაციის (მიწისქვეშა წყლების მოძრაობის) ძირითადი განმსაზღვრელი ძალაა სიმძიმისა და ჰიდროსტატიკური წნევის ძალები. შესაბამისად, მიწისქვეშა წყლის ნაკადის ენერგიის მაჩვენებელია მიწისქვეშა წყლების H წნევა, რომელიც მეტრებში იზომება:

$$H = z + h_p = z + \frac{p}{\gamma_0}, \quad (1)$$

სადაც z არის რაიმე MM საფარდი სიბრტყის მიმართ იმ წერტილის ორდინატა, სადაც p წნევა განისაზღვრება (სურ. 1), ე.ი. z -ით განისაზღვრება სიმძიმის ძალით გამოწვეული ენერგია; h_p – პიეზომეტრული სიმაღლე ($h_p = +\frac{p}{\gamma_0}$), γ_0 – წყლის კუთრი წონა, ე.ი. h_p განსაზღვრავს მოცემულ წერტილში ჰიდროსტატიკური p წნევით გამოწვეულ ენერგიის ნაწილს. სილათიხოვანი ქანების ფილტრაციული დეფორმაციები შეიძლება ხელოვნური გამაგრებით აიცილონ იმ შემთხვევაში, როცა ასეთი ფერდობების დრენაჟი ტექნიკურად შეუძლებელია.



სურ. 1. შრეებში წყლის წნევის განსაზღვრის სქემა:

ა) უდაწნეო; ბ) დაწნეითი; MIM – ათვლის ნებისმიერი საფარდი სიბრტყე; CD და C/D' – წყალსაყრდენი საზღვრები; O – ანათვლის ასაღები წერტილი; AB – დეპრესიის მრუდი; A/B' – პიეზომეტრული წირი; 1 – ქვიშა; 2 – წყალსაყრდენი თიხა; 3 – ჭაბურღილი

თიხოვანი ქანების გაჯირჯება დროთა განმავლობაში მათ ძვრაზე წინაღობის შემცირებას იწვევს. გაჯირჯების პირობა თიხოვანი გრუნტების შეერთება წყალგამტარ ფენებთან – დაზარალებულ ქანებსა და სილებთან. გაჯირჯების ხარისხი დამოკიდებულია თიხების მინერალოგიურ შედგენილობაზე, მოცემულ წერტილში მკუმშავი წნევის სიდიდესა და გრავიტაციული წყლის საკმაო ქვედინების არსებობაზე. ძაბვის სიდიდე, რომლის დროსაც ფერდოს სხვადასხვა წერტილში იწყება ინტენსიური გაჯირჯება, თიხნარი და სილოვანი თიხები ინტენსიურად იჟღინთება 0,5–1 კგ.ძ/სმ², ხოლო პლასტიკურ-ჰიდრავლიკური თიხები – 3–4 კგ.ძ/სმ² ძაბვების დროს. მაშასადამე, ფერდოს მდგრადობის ანალიზისთვის მნიშვნელოვანი და აქტუალური ამოცანაა ფერდოს მასივზე ფილტრაციული ძალების ზემოქმედების გამოკვლევა [2–6].

ძირითადი ნაწილი

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, გამაგრებითი ღონისძიებების დაგეგმვა მოითხოვს მეწყრისა და მისი

მიმდებარე ტერიტორიის ჰიდროგეოლოგიური პირობების კარგად შესწავლას. მაშასადამე, უნდა განვსაზღვროთ გრუნტის წყლების განლაგება და მათი დონის მერყეობა, გამოჟონვის ადგილები, დატენიებული ნაკვეთების ზედაპირები, გრუნტის წყლების წნევები, აგრეთვე წყალჟონვადი შრები. ამ მიზნით განვიხილოთ შემდეგი ამოცანა.

ამოცანა. შევადგინოთ გრუნტის წყლის ნაკადის მოძრაობის დიფერენციალური განტოლება, რომელსაც დააკმაყოფილებს დეპრესიის წირის განტოლება. საწყის პირობად მივიღოთ საშიში დაცურების პრიზმულ მასივში დეპრესიის წირის შესვლის $M(x, y)$ წერტილი, სადაც $x = d$, $y = h$.

განვიხილოთ მთის ერთგვაროვანი ქანებისაგან შემდგარი ფერდო, რომელიც ეყრდნობა ჰორიზონტისადმი α კუთხით დახრილ წყალშეუღწევ კლდოვან ფუძეს. მე-2 სურ-ზე ნაჩვენებია ერთგვაროვანი მთის ქანების ფერდო, რომელიც წარმოშობს $N:1$ ქანობს (ჰორიზონტალური და ვერტიკალური გეგმილების ფარდობა). დრენაჟის სისტემის არარსებობის შემთხვევაში ფერდოს ქანობი უნდა იყოს

შედარებით ნაკლებად დამრეცი, არაუმეტეს 1,5:1. ასეთ შემთხვევაში გრუნტის წყლის ნაკადისთვის მართებულია დიუპუის დაშვება იმის შესახებ, რომ ვერტიკალის ყოველ წერტილში ჰიდრავლიკური გრადიენტი მუდმივ სიდიდეს ინარჩუნებს და $\frac{dy}{dx}$ ფარდობის ტოლია. ფერდოს გრუნტში ფილტრაცია შეიძლება გამოისახოს დარსის კანონით [3]:

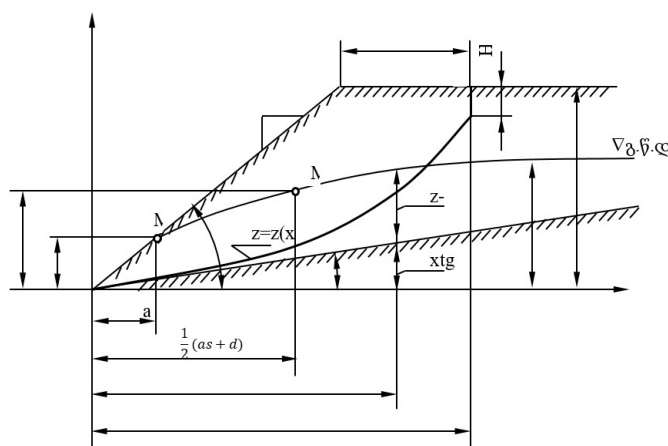
$$q = k(y - x \operatorname{tg} \alpha) \frac{dy}{dx}, \quad (2)$$

სადაც q არის გრუნტის წყლის ნაკადის კუთრი ხარჯი; k – ფილტრაციის კოეფიციენტი; α – ფუძის დახრის კუთხე; x და y – დეპრესიის წირის მიმდინარე კოორდინატები.

გამოსვლის M_2 წერტილში ფილტრაციის ნაკადის კუთრი ხარჯი ტოლია [4]:

$$q = \frac{ka(1 - S \operatorname{tg} \alpha)}{S}, \quad (3)$$

სადაც a არის გამოსვლის წერტილის ორდინატა.



სურ. 2. გრუნტის წყლის ნაკადის არსებობისას დეპრესიის წირის საანგარიშო სქემა

(2) და (3) განტოლებების მარჯვენა ნაწილების გატოლებით მივიღებთ:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{a(1 - S \operatorname{tg} \alpha)}{Sy - S \operatorname{tg} \alpha \cdot x}. \quad (4)$$

მარტივი გარდაქმნებით (4) განტოლება შეიძლება გადავწეროთ შემდეგი სახით:

$$\frac{dx}{dy} + \frac{S \operatorname{tg} \alpha}{a(1 - S \operatorname{tg} \alpha)} \cdot x = \frac{S}{a(1 - S \operatorname{tg} \alpha)} \cdot y. \quad (5)$$

(5) გამოსახავს ფილტრაციული ნაკადის მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებას. იგი პირველი რიგის წრფივი დიფერენციალური განტოლებაა, რომლის ინტეგრირებისთვის ვისარგებლოთ უმაღლესი მათემატიკის შემდეგი ცნობილი ფორმულით [8]:

$$x = e^{-\int P(y)dy} \left[\int Q(y) e^{\int P(y)dy} dy + C \right], \quad (6)$$

$$\text{სადაც } P(y) = \frac{S \operatorname{tg} \alpha}{a(1 - S \operatorname{tg} \alpha)}, \quad Q(y) = \frac{S}{a(1 - S \operatorname{tg} \alpha)}.$$

(6)-ის თანახმად, (5) განტოლების ინტეგრირებით მივიღებთ შემდეგი სახის გამოსახულებას:

$$x = e^{-\frac{S \operatorname{tg} \alpha}{a(1 - S \operatorname{tg} \alpha)} y} \left[C \operatorname{tg} \alpha \cdot e^{\frac{S \operatorname{tg} \alpha}{a(1 - S \operatorname{tg} \alpha)} y} + C \right], \quad (7)$$

სადაც C არის ინტეგრირების ნებისმიერი მუდმივი. სავარაუდოა, რომ დეპრესიის თეორიული მრუდი იწყება $M(d; h)$ წერტილში, ე.ი. ცნობილია დეპრესიის მხოლოდ ერთი წერტილი, საშიში დაცურების პრიზმულ მასაში ფილტრაციული ნაკადის შესვლის წერტილი. მაშასადამე, C მუდმივის განსაზღვრისთვის (7)-ში ჩავსვათ საწყისი $x = d$, $y = h$ პირობები, მივიღებთ:

$$C = (d - ctg\alpha)e^{\frac{Stg\alpha}{a(1-Stg\alpha)}}. \quad (8)$$

თუ (8) გამოსახულებას შევითავსებთ (7)-ში, გვექნება:

$$x = ctg\alpha + (d - ctg\alpha)e^{\frac{Stg\alpha(h-y)}{a(1-Stg\alpha)}}. \quad (9)$$

თუ (9) განტოლებას ამოვხსნით y -ის მიმართ, მივიღებთ

$$y = \frac{a(1-Stg\alpha)}{Stg\alpha} \ln \left| \frac{d-ctg\alpha}{x-ctg\alpha} \right| + h. \quad (10)$$

(10) არის $M(d; h)$ წერტილზე გამავალი დეკრესიის მრუდის განტოლება. ცხადია, დეკრესიის წირის ასაგებად საჭიროა მასზე მდებარე მინიმუმ კიდევ ორი წერტილის კოორდინატების განსაზღვრა. ამ წერტილებად შევარჩიოთ გამოსვლის M_2 და შუა M_1 წერტილები (იხ. სურ. 2).

მნიშვნა. შესვლის $M(d; h)$ წერტილის d აბსცისა განისაზღვრება ფერდოს გეომეტრიული პარამეტრებისა და გრუნტის მახასიათებლების საშუალებით. კერძოდ, $d = Htg\beta + l$. აქ H არის ფერდოს სიმაღლე, l – ფერდოს ზედა ბაქანზე პრიზმის შესადლო ჩამონგრევის სიგანე, ე.ი. ფერდოს თხემის A წარბიდან ჰორიზონტალური AB მანძილი (სურ. 2), რომელიც შემდეგი ფორმულით მოიცემა:

$$l = \frac{2H[1-ctg\beta \cdot tg\frac{\beta+\phi}{2}]-2H_{90}}{ctg(45^\circ - \frac{\phi}{2}) + tg\frac{\beta+\phi}{2}},$$

სადაც $H_{90} = \frac{2K}{\gamma} ctg(45^\circ - \frac{\phi}{2})$; თეორიული დამოკიდებულებით განისაზღვრება l მანძილზე მეწყერ-ჩამონაქცევის ვერტიკალური სიბრტყის სიმაღლე [6,7], K – შეჭიდულობა, ნ/სმ²; ϕ – ქანების შიგა ხახუნის კუთხე; γ – გრუნტის კუთრი წონა, ნ/სმ³, β –

ფერდოს ჰორიზონტისადმი დახრის კუთხე. რაც შეეხება $M(d; h)$ წერტილის h ორდინატას, იგი განსაზღვრულია დროის მომენტისათვის განისაზღვრება ჰაბურდილის მეშვეობით, როგორც ზემოთ იყო აღწერილი (იხ. სურ. 1).

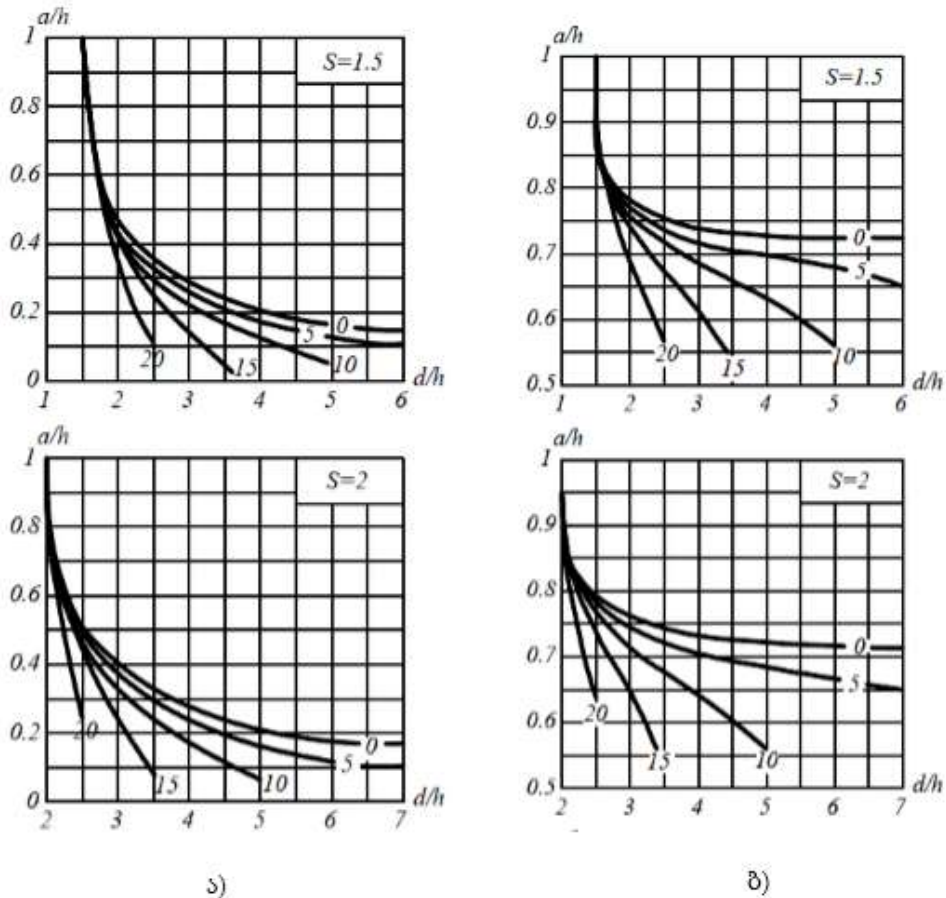
დავუშვათ, რომ გამოსვლის M_2 წერტილის კოორდინატებია: $x = aS$ და $y = a$ (სურ. 2), მაშინ (x, y) კოორდინატების წყვილის (10) განტოლებაში ჩასმით მივიღებთ შემდეგ დამოკიდებულებას:

$$a = \frac{a(1-Stg\alpha)}{Stg\alpha} \ln \left| \frac{d-ctg\alpha}{aS-ctg\alpha} \right| + h. \quad (11)$$

$\varphi(a) = 0$ (11) განტოლების a -ს მიმართ ამოხსნისას საჭიროა გამოვიყენოთ რიცხვითი მეთოდი. ამისათვის კოორდინატთა სისტემის ვერტიკალურ და ჰორიზონტალურ ღერძებზე, შესაბამისად, გადავზომოთ a/h და d/h სიდიდეები. α -ს მნიშვნელობები გარკვეული ბიჯით აღებულია $\alpha \in [0, 20^\circ]$ ინტერვალიდან. ფერდოს გეომეტრიული პარამეტრების და გრუნტის მახასიათებელთა სხვადასხვა მნიშვნელობისთვის (11) განტოლების რიცხვითი მეთოდით ამოხსნის შედეგები გრაფიკების სახით მოცემულია მე-3, ა სურათზე.

მივიღოთ, რომ M_1 შუა წერტილის კოორდინატები ტოლია: $x = \frac{1}{2}(aS + d)$ და $y = b$, მაშინ (10) განტოლებაში (x, y) კოორდინატების წყვილის ჩასმით, მივიღებთ:

$$b = \frac{a(1-Stg\alpha)}{Stg\alpha} \left(\frac{d-ctg\alpha}{\frac{1}{2}(aS+d)-ctg\alpha} \right) + h. \quad (12)$$



სურ. 3. ა. გამოსვლის წერტილების განსაზღვრის გრაფიკები; ბ. შუა წერტილის განსაზღვრის გრაფიკები
(რიცხვები მრუდებზე მიუთითებს ბუნებრივი დახრის α კუთხეებს ინტერვალიდან)

ახლა (12) განტოლების b -ს მიმართ ამოხსნისას მხედველობაში მივიღოთ, რომ a -ს მნიშვნელობები მიღებულია (11) განტოლებიდან, რიცხვითი მეთოდით ამოხსნის შედეგები მოყვანილია გრაფიკების სახით მე-3, ბ სურათზე. ამრიგად, თუ გვაქვს დებრესიული ზედაპირის სამი წერტილი, კერძოდ საწყისი, შუა და გამოსვლის, მაშინ ამ წერტილების საფუძველზე შეიძლება გამოვხაზოთ წირი, რომელიც დებრესიის თეორიული მრუდი იქნება. რადგან დებრესიის ფაქტობრივი მრუდი უნდა იყოს ზედა ქანობის პერპენდიკულარული და ქვედა ქანობის მხები, თეორიული წირი უნდა გავატაროთ ამ საზღვრო პირობების შესაბამისად [3].

შევნიშნოთ, რომ თუ ფერდოს საყრდენი ფუძე ჰორიზონტალურია, ე.ი. $\alpha=0$, მაშინ ჩვენ მიერ მოძიებული ეს გადაწყვეტა ლიტერატურაში მოყვანილ შედეგებს ემთხვევა.

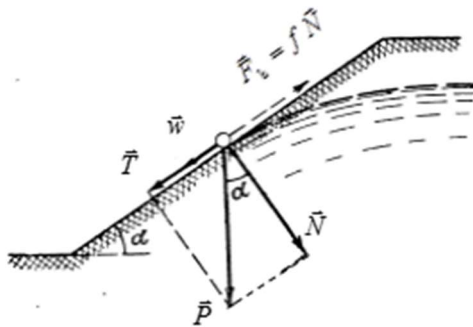
მე-2 სურ-ზე ნაჩვენები ფერდოს განივი კვეთის და მე-3, ა, ბ სურათებზე მოცემული გრაფიკების გამოყენების ილუსტრირება შეიძლება შემდეგი ტესტური მაგალითით.

მაგალითი. სქემის მიხედვით დავუშვათ, რომ $d=120$ მ და $h=46$ მ (სურ. 2). მე-3, ა და ბ სურათებზე მოყვანილი გრაფიკებით ვიპოვოთ M_1 და M_2 მახასიათებელი წერტილების კოორდინატები.

მოცემულობის შესაბამისად, გვაქვს $d/h=2.6$. მე-3,ა სურათის მიხედვით, როცა $S=1.5$, $d/h=2.6$ და $\alpha=6.7^\circ$, ვპოვობთ $a/h=0.29$; ხოლო, თუ $S=2$, მაშინ $a/h=0.46$. რადგან საშუალო ქანობი 1.75-ის ტოლია, მივიღებთ: $a/h=(0.29+0.46)/2=0.38$ ანუ $a=17.4$ მ. მე-3,ბ სურათზე მოცემული გრაფიკის მიხედვით, როცა $S=1.5$, ვპოვობთ $b/h=0.73$. ხოლო, როცა $S=2$, მაშინ $b/h=0.77$, ამიტომ $b/h=(0.73+0.77)/2=0.75$ ანუ $b=34.5$ მ. ე.ი. დავადგინეთ M_1 და M_2 წერტილების კოორდინატები, მაშინ M , M_1 და M_2 წერტილებზე გატარებული წირი დეპრესიის ზედაპირის თეორიული მრუდია.

დეპრესიული წირის განსაზღვრის შემდეგ შედარებით ადვილად მიიღწევა ფერდოს მდგრადობაზე გაანგარიშება.

გრუნტის წყლების არსებობის შემთხვევაში ფერდოს მდგრადობის ანალიზისათვის განვიხილოთ ფერდოს ზედაპირზე პირობითად აღებული ერთეული მოცულობის გრუნტის ნაწილაკის მდგრადობის პირობა (სურ. 4).



სურ.4. ფერდოს მდგრადობის სქემა

ფილტრაციული ძალების არსებობა ანუ წყლის ჰიდროდინამიკური წნევა აუარესებს გრუნტის მასივის მდგრადობას, განსაკუთრებით გათხრითი სამუშაოების წარმოებისას. ჰიდროდინამიკური

წნევა მოქმედებს გრუნტზე, რომელშიც წყალი იფილტრება და იგი წყლის მოცულობითი წონისა და მოცემულ წერტილში ჰიდრავლიკური გრადიენტის ნამრავლის ტოლია, ე.ი. $w=\gamma_w \cdot I$. ცნობილია, რომ ფხვიერი ქანების ფერდოს დახრის კუთხე მუდმივია, თუ ის წყლით არ არის გაჟღენთილი. თუ ფერდოზე მდებარე გრუნტის ნაწილაკზე სიმძიმის ძალის გარდა მოქმედებს წყლის ფილტრაციული ძალებიც, მაშინ ჰიდროდინამიკურ წნევებზეა დამოკიდებული ფერდოს დახრის კუთხის ცვლილება. რაც უფრო დამრეცია ფერდო, მით მეტი იქნება, გრუნტის წყლების თავისუფალ ზედაპირზე გამოსვლისას, ჰიდრავლიკური გრადიენტი. შესაბამისად, ფილტრაციულ ძალებს უფრო მეტი გავლენა ექნება ფერდოს მდგრადობაზე. პრაქტიკული გაანგარიშებისას ჰიდროდინამიკური წნევების მიმართულებას ამთხვევენ ფერდოს ქანობის მიმართულებას. საილუსტრაციოდ განვიხილოთ მარტივი მაგალითი [7,10].

მაგალითი. ფერდოზე მდებარე ერთეულოვანი მოცულობის გრუნტის მყარ ნაწილაკზე მოქმედებს სიმძიმის $\vec{P}$ ძალა, ჰიდროდინამიკური $\vec{w}$ წნევა და ხახუნის ძალა. განვსაზღვროთ პირობა, რომლის დროსაც ნაწილაკი იმყოფება სტატიკური წონასწორობის მდგომარეობაში.

დავუშვათ, რომ ჰიდროდინამიკური $\vec{w}$ წნევის მიმართულება ემთხვევა ქანობის მიმართულებას (სურ. 4). მაშინ ნაწილაკზე იმოქმედებს დამძვრელი $\sum \vec{P}_i$ და დამჭერი $\sum \vec{F}_i$ ძალები. სიმძიმის $\vec{P}$ ძალა დავშალოთ ორ მდგენელად (სურ. 4): $\vec{P}=\vec{T}+\vec{N}$, სადაც $T=P \sin \alpha$ და $N = P \cos \alpha$. ჰიდროდინამიკური წნევა გამოითვლება ფორმულით: $w = \gamma_w n I$, სადაც n არის

გრუნტის ერთეულოვანი მოცულობის ნაწილაკში ფორების მოცულობა; γ_w – წყლის მოცულობითი წონა; I – ჰიდრავლიკური გრადიენტი. ფერდოს ზედაპირზე გამოყოფილ ნაწილაკზე მოქმედი და მძვრელი ძალა იქნება:

$$\sum P_i = P \sin \alpha + \gamma_w \cdot n \cdot I.$$

რადგან კუთხე, რომლითაც ფილტრაციული წყლის ნაკადი გამოდის ფერდოს ზედაპირზე, საკმაოდ დიდია (ახლოსაა ფერდოს დახრის α კუთხესთან), ამიტომ ჰიდრავლიკური I გრადიენტის (დაწნევის დანაკარგის ფარდობა ფილტრაციის გავლილ გზის სიგრძესთან) $tg \alpha$ -ს ტოლად მიჩნევა მცდარია. ასეთ შემთხვევაში შეიძლება დავუშვათ, რომ $I = \Delta H / l = \sin \alpha$.

მაშასადამე,

$$\sum P_i = P \sin \alpha + \gamma_w \cdot n \cdot \sin \alpha. \quad (13)$$

ფერდოს ზედაპირზე მდებარე განსახილველ გრუნტის ელემენტზე მოქმედი დამჭერი ძალა იქნება:

$$\sum F_i = F_x = fN = P \cos \alpha \cdot tg \phi.$$

ამასთან, $P = \gamma_{set} \cdot 1$, სადაც γ_{set} შეტივტივებული გრუნტის მოცულობითი წონაა. მაშასადამე,

$$\sum F_i = \gamma_{set} \cos \alpha \cdot tg \phi, \quad (14)$$

სადაც $f = tg \phi$ არის სრიალის ხახუნის კოეფიციენტი; ϕ – გრუნტის შიგა ხახუნის კუთხე.

ფერდოზე მდებარე ნაწილაკის სტატიკური მდგრადობის შემთხვევაში მასზე მოქმედი მძვრელი ძალების ჯამი უნდა შეადგენდეს დამჭერი ძალების ჯამის რაიმე ნაწილს. მაშასადამე, ნათქვამის საფუძველზე, (13) და (14) დამოკიდებულებიდან გვექნება:

$$\gamma_{set} \cdot \sin \alpha + \gamma_w \cdot n \cdot \sin \alpha = \frac{1}{K_{Zv}} (\gamma_{set} \cdot \cos \alpha \cdot tg \phi),$$

საიდანაც

$$K_{Zv} = \frac{\gamma_{set} \cdot \cos \alpha \cdot tg \phi}{\gamma_{set} \sin \alpha + \gamma_w \cdot n \cdot \sin \alpha}$$

ანუ

$$K_{Zv} = \frac{\gamma_{set} \cdot tg \phi}{(\gamma_{set} + \gamma_w \cdot n) tg \alpha}, \quad (15)$$

სადაც K_{Zv} არის გრუნტის ნაწილაკის მდგრადობის კოეფიციენტი დაცურებაზე.

თუ $K_{Zv} > 1$, მაშინ ფერდო იქნება მდგრადი; თუ $K_{Zv} = 1$ გვაქვს ზღვრული წონასწორობის მდგომარეობა.

დასკვნა

ფერდოების მდგრადობის გაანალიზებით ვრწმუნდებით, რომ, გრუნტის წყლების არსებობის პირობებში, მისი გრუნტის ჩონჩხი იმყოფება ფილტრაციული ნაკადის მუდმივი ზემოქმედების ქვეშ, რასაც, ჩვეულებრივ, თან სდევს ფერდოს დანგრევა (მეწყერ-ჩამონაქცევი).

მეწყერ-ჩამონაქცევების უმრავლესობა გამოწვეულია ფილტრაციულ მოქმედებათა შედეგად, ამიტომ ფილტრაციული წყლების მოძრაობის შესწავლა და მის საფუძველზე საიმედო კონსტრუქციულ ღონისძიებათა გათვალისწინება ერთ-ერთი მთავარი საკითხია დაგეგმარების დროს.

ფერდოს მდგრადობაზე გაანგარიშებისას საჭიროა ჭაბურღილების მეშვეობით კარგად დაფიქსირდეს გრუნტის წყლების სიღრმე და მათი დონის მერყეობა. ამ მიზნით დეპესიის თეორიული წირის ასაგებად მიღებული განტოლება და დამხმარე გრაფიკები საშუალებას იძლევა ერთი ჭაბურღილის მეშვეობით ავაგოთ დეპრესიის მრუდი, აგრეთვე გან-

ვსაზღვროთ ჰიდროდინამიკური წნევები. ფერდოს ლების, სიმძიმის ძალის მხევი მდგენელის და ძვრაზე მდგრადობის კოეფიციენტის განსაზღვრისას ჰიდროდინამიკური წნევების განსაზღვრისას აუცი- ფერდოს პირობითად ვერტიკალზე ნაკვეთურებად ლებელია წინასწარ ვიცოდეთ დეპესიის წირის მდე- ყოფენ. ამ დროს ნაკვეთურზე მოქმედი მძვრელი ძა- ბარეობა.

ლიტერატურა

1. Bishop, A.W. (1975). The Use of Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. *Geotechnique*, 5, (1), pp.17.
Retrieved from: <https://www.scribd.com/document/187650932/Bishop-1955-The-Use-of-the-Slip-Circle-in-the-Stability-Analysis-of-Slopes>.
2. Arsenyev, A.I., Bukin, I.I., Mironenko, V.A. (1992). Stability of edges and draining the quarries. *Nedra*, p. 164.
<http://www.twirpx.com/file/1602485/> (In Russian);
3. Huang, Y. H. (1983). Stability Analysis of Earth Slopes. *University of Kentucky*.
4. Chowdhury, R. (2009). Geotechnical Slope Analysis. Australia, Wollongong: *University of Wollongong*, p. 720;
5. Krahn, J. (2004). Stability Modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology. Canada: *Geo-Slope/W International, Ltd*, p. 396;
6. Citovich, N.A. (1996). Soil Mechanics. p. 636. (in Russian);
7. Danko, P.E., Popov, F.G., Kozhevnikov, T.Ya. (2009). Higher mathematics in exercises and tasks part 1. Moscow: *Higher school*, p. 408. (In Russian);
8. Verruijt, A. (2001). Soil Mechanics. *Delft University of Technology*, p. 340.
9. Tertsagi, K. (1961). Soil Mechanics Theory. Moscow: *State Publishing House of Literature on Construction, Architecture and Building Materials*, p. 507. (In Russian).

UDC 624.137.2.046.3

SCOPUS CODE 2301

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2022-1-217-230>

Impact of Underground Waters on the Stability of the Mountain Rock Slope. Depression Surface Equation

Tariel Kvitsiani

Department of Technical Expertise of Engineering Mechanics and Building, Georgian Technical University, Georgia, 0160, Tbilisi, 68^b M. Kostava str.

E-mail: kvitsianitariel@gtu.ge

Liana Kvatskhava

Department of Technical Expertise of Engineering Mechanics and Building, Georgian Technical University, Georgia, 0160, Tbilisi, 68^b M. Kostava str.

E-mail: l.kvartckava@gtu.ge

Reviewers:

L. Jikidze, Associate Professor, Faculty of Construction, GTU

E-mail: lev.jikidze@gtu.ge

I. Kadaria, Professor, Doctor of Technical Sciences, Faculty of Construction, GTU

E-mail: i.kadaria@gtu.ge

Abstract. The underground waters move in the slope massif of a homogeneous mountain rocks. It is demonstrated that the filtration forces are the main cause for the decreased soil strength and slope deformation that further causes landslides.

It was found that calculating the variability of groundwater levels and the location of the depressive curve plays an important role in the slope sustainability analysis. To solve this problem, the movement of the filtration water flow is considered within the slope of a homogeneous soil, which relies on the water-permeable cliffy bed sloping at an angle α to the horizon. A common differential equation for the motion of the filtration water flow is deduced and reduced to the first-order linear equation, which is satisfied by the equation of the depression line. The method to draft a theoretical depression curve by using the solution of the differential equation is discussed. Based on this method, several typical points on the depression curve were selected. By using different values of geometrical parameters and ground characteristics of the slope, the coordinates of the typical points were determined.

Auxiliary graphs were construed based on the results obtained by the numerical method to determine the coordinates of the outcrop of the depression curve on the slope surface and midpoint. The solution of a test example is given for illustration purposes.

As the filtration water moves through the ground of the mountain rock slope, the impact of filtration forces or hydrodynamic pressure on the reduction of the slope ground stability is substantiated. Additional shear forces are taken into account in the calculation of the slope stability: hydrostatic and hydrodynamic pressures. The impact of the sums of these two forces results in the decreased ground mass strength, landslides and avalanches. For the slope

stability analysis, the condition of the stability of the unit volume of the ground particle on the slope surface is considered. The formula to calculate the shear strength coefficient is deduced.

Keywords: depression curve; filtering; gradient; ground; reserve coefficient; slope; stability.

UDC 624.137.2.046.3

SCOPUS CODE 2301

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2022-1-217-230>

Влияние грунтовых вод на статическую устойчивость склонов. Уравнение депрессионной поверхности

Тარიэл Квицიანი Департамент инженерной механики и технической экспертизы строительства, Грузинский технический университет, Грузия, 0160, Тбилиси, ул. М. Костава 68⁶
E-mail: kvitsianitariel@gtu.ge

Лана Кварцхава Департамент инженерной механики и технической экспертизы строительства, Грузинский технический университет, Грузия, 0160, Тбилиси, ул. М. Костава 68⁶
E-mail: l.kvartckava@gtu.ge

Рецензенты:

Л. Джикидзе, ассоциированный профессор строительного факультета ГТУ

E-mail: lev.jikidze@gtu.ge

И. Кадариа, доктор технических наук, профессор строительного факультета ГТУ

E-mail: i.kadaria@gtu.ge

Аннотация. Подземные воды текут в склоновом массиве однородных горных пород. Силы фильтрации являются основным условием потери прочности грунта и деформации откосов, что становится основой для оползней.

Для проведения анализа устойчивости откосов важно определить изменчивость уровней грунтовых вод и расположение депрессионной кривой. Для решения поставленной задачи изучается движение фильтрационного водного потока, состоящего из однородного грунта, по склону, опирающемуся на водопроницаемое скальное основание, наклоненное под углом α к горизонту. Составлено обычное дифференциальное уравнение движения фильтрационного потока воды, сведенное к линейному уравнению первого порядка, которому удовлетворяет уравнение окружности депрессии. Описывает метод построения теоретической кривой депрессии путем решения дифференциального уравнения. По этому методу выбирают несколько харак-

терных точек на окружности депрессии. Координаты характерных точек определяются разными значениями геометрических параметров уклона и характеристик грунта.

Построены вспомогательные графики для расчета наклона кривой депрессии на поверхности и определения координат средней точки численными методами. Приведен пример тестового решения.

Влияние фильтрационных сил или гидродинамического давления на движение фильтрационной воды в склоновом грунте горных пород обосновывает ухудшение устойчивости склонового грунта. При расчете устойчивости откосов учитываются дополнительные силы: гидростатическое и гидродинамическое давления. В значительной степени под действием суммы этих двух сил нарушается прочность грунтового массива и возникают оползни. Для анализа устойчивости откосов обсуждается устойчивость единицы объема условно принятой единицы объема на поверхности откоса. Получена формула для расчета коэффициента прочности на сдвиг.

Ключевые слова: грунт; депрессионные поверхности; коэффициент запаса; откос; поверхность скольжения; устойчивость.

განხილვის თარიღი 12.11.2021

შემოსვლის თარიღი 19.11.2021

ხელმოწერილია დასაბეჭდად 25.03.2022