

თამარ ყირიმლიშვილი-დავითაშვილი

ექსტრემალური ჰიდროდინამიკური პროცესების
ზემოქმედება გარემოზე ჰიდროკვანძის რაიონში

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

სექტემბერი, 2011

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

სამშენებლო ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით თამარ ყირიმლიშვილი-დავითაშვილის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით "ექსტრემალური ჰიდროდინამიკური პროცესების ზემოქმედება გარემოზე ჰიდროკვანძის რაიონში" და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

ხელმძღვანელი: ტმდ, სრული პროფესორი თ.გველესიანი

რეცენზენტი: ტმდ, სრული პროფესორი შ.გაგოშიძე

რეცენზენტი: ტმდ, სრული პროფესორი გ.ხელიძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2011

ავტორი: თამარ ყირიმლიშვილი-დავითაშვილი
დასახელება: ექსტრემალური ჰიდროდინამიკური პროცესების
ზემოქმედება გარემოზე ჰიდროკვანძის რაიონში
ფაკულტეტი: სამშენებლო
ხარისხი: დოქტორი
სხდომა ჩატარდა:

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ შემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭვდა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით დაცული მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ ხპეციფიკურ მიმართებს ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

რეზიუმე

პრობლემის აქტუალობა. ჰიდროენერგეტიკისა და სოფლის მეურნეობის ამოცანების წარმატებით გადაწყვეტის ერთ-ერთ აუცილებელ და ქმედით საშუალებას სხვადასხვა დანიშნულების ჰიდროკვანძები წარმოადგენენ მათი საიმედო ფუნქციონირების პირობებში. საქართველოში, რომელიც მთა-გორიანი რელიეფით ხასიათდება, ეს ჰიდროკვანძები, განლაგებულია უმეტესწილად, მთის ან მთისწინა რაიონებში, რომლებიც ხშირად, რთული გეოლოგიური პირობებით გამოირჩევიან, რაც გამოიხატება კერძოდ, ინტენსიური მეწყერული პროცესებით მთის ფერდობებზე.

ამასთან დაკავშირებით, ჰიდროკვანძების დაგეგმარებისა და ექსპლუატაციის დროს, მათი საიმედო ფუნქციონირებისა და მიმდებარე რაიონის გეოლოგიური უსაფრთხოების უზრუნველყოფის მიზნით, აუცილებელია, გათვალისწინებული იყოს მთიანი რეგიონებისათვის დამახასიათებელი სპეციფიკური ფაქტორების ზემოქმედება.

ერთ-ერთ ასეთ მნიშვნელოვან ფაქტორს წარმოადგენს ჰიდროკვანძის წყალსაცავის სანაპირო ფერდობიდან ამა თუ იმ მიზეზით, მეწყერის წყალში ჩამონგრევის შედეგად წყლის ზედაპირზე აღძრული ინტენსიური ტალღური პროცესი. საკმარისად მაღალი ტალღების გენერაციის შემთხვევაში, შეიძლება მოხდეს მათი გადაღვრა კაშხალზე, რაც თავის მხრივ, გამოიწვევს კაშხლის ნაწილობრივ ან მთლიან წარცხვას (თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ საირიგაციო დანიშნულების ჰიდროკვანძების კაშხლები, როგორც წესი აიგება ადგილობრივი მასალისაგან, რომელიც ინტენსიური წარცხვის თვისებით ხასიათდება). ამ დროს, ქვედა ბიეფში გავრცელების შედეგად აღნიშნული ტალღები შენობა-ნაგებობების, საირიგაციო და სატრანსპორტო სისტემებისა და სხვ. დანგრევის მიზეზი ხდება, ზოგჯერ კი, განაპირობებენ ადამიანთა მსხვერპლს (ამის მაგალითებია, იტალიაში ვაიონტის წყალსაცავში, 1963 წ. და ნორვეგიაში ლიონის ტბაში, 1936 წ. მეწყერით წარმოქმნილი ტალღების კატასტროფული შედეგები) და სხვ.

ამჟამად, მთის რეგიონებში განლაგებული დიდი ჰიდროენერგეტიკული დანიშნულების ჰიდროკვანძების პირობებისათვის, მეწყერით გენერირებული ტალღების პროგნოზირების საკითხები

საკმაოდ კარგად არის დამუშავებული, მთელი რიგი თეორიული, აგრეთვე ექსპერიმენტალური კვლევების შედეგად. ამის მიუხედავად, შედარებით მცირე ზომის წყალსაცავების შემთხვევაში, ზოგიერთი აქტუალური საკითხი არასაკმარისად არის შესწავლილი.

სამუშაოს მიზანი და ამოცანა. დამუშავებული იქნას შედარებით მცირე წყალსაცავებში მეწყერით გამოწვეული მაღალი ტალღების პარამეტრების (მათ შორის ტალღის ამპლიტუდის და კაშხალზე ჰიდროდინამიკური წნევების) გათვლის მეთოდების, აგრეთვე კაშხალზე ტალღის გადაღვრის პროცესის მათემატიკური მოდელირება.

ნაშრომის მეცნიერული სიახლე მდგომარეობს შემდეგში:

- მიღებულია ანალიზური გამოსახულებები და მათ საფუძველზე ჩატარებულია სისტემატური კომპიუტერული გაანგარიშებათა ციკლი, რის შედეგად დადგენილია გავლენა, რომელსაც ახდენს მეწყერის წყალში შემოსვლის ხასიათი წარმოქმნილ ტალღების ინტენსივობაზე;

- დამუშავებულია აპროქსიმაციული ანალიზური დამოკიდებულება მეწყერით გამოწვეული ბრტყელი ტალღის სიგრძის სწრაფი პროგნოზირების მიზნით;

- მიღებულია განზოგადოებული გრაფიკები, რომლის საშუალებით შესაძლებელია კაშხალთან წყლის დონის აწევის მაქსიმალური სიდიდის სწრაფი დადგენა.

- დამუშავებულია მეთოდთა მაქსიმალური ტალღის კაშხალზე გადაღვრის პროცესის პარამეტრების, აგრეთვე კაშხალზე ტალღით გამოწვეული დატვირთვის პროგნოზირების მიზნით.

ნაშრომის პრაქტიკული ღირებულება. მთიან რეგიონებში განლაგებული ჰიდროენერგეტიკული და საირიგაციო დანიშნულების წყალსაცავების ფერდობებზე პოტენციური მეწყერის აქტივიზაციის დროს (რაც შეიძლება გამოწვეული იყოს უხვი წვიმებით, წყალმოვარდნით, მიწისძვრით, ტექნოგენური მიზეზებით და სხვ.), აუცილებელია ჩატარდეს აღნიშნული მეწყერით გამოწვეული ტალღის პარამეტრების სიდიდის ოპერატიული პროგნოზირება, რაც თავის მხრივ საფუძველია, იმისათვის, რომ კორექტულად შეფასდეს ტალღური პროცესის ინტენსივობა წყალსაცავში და უზრუნველყოფილ იქნას მიმდებარე რაიონის უსაფრთხოების პირობები (კაშხალზე ტალღის გადაღვრის, კაშხლის წარცხვის შესაძლებლობა და სხვ.).

პირველ თავში განხილულია ტალღური პროცესების შესწავლის ძირითადი მიახლოებითი თეორიები და მათი გამოყენების სფეროები. გრძელი ტალღების ანუ მარჩხი წყლის (მწ) თეორიის მიხედვით სითხის სიჩქარის ვერტიკალური მდგენელი არ მიიღება მხედველობაში და ამგვარად, წყალსადინარის განივკვეთში ნაკადი ხასიათდება კერძოდ, მხოლოდ ერთი (გასაშუალოებული) ჰორიზონტალური სიჩქარით. უფრო ზოგადი თეორიის, მცირე ამპლიტუდის ტალღების (მატ) თეორიის თანახმად, შეიძლება გაანგარიშებულ იქნას ნებისმიერი სიგრძის ტალღები სიჩქარის ყველა მდგენელის გათვალისწინებით. ამ თეორიის საფუძველზე, შეიძლება ამოიხსნას ჰიდროდინამიკის (პოტენციური მოძრაობის) სასაზღვრო ამოცანა და მოიძებნოს სიჩქარის პოტენციალი ϕ , რის საშუალებით შესაძლებელი ხდება განისაზღვროს ტალღური პროცესის ყველა პარამეტრი (ტალღის ამპლიტუდა, სიჩქარეები, ჰიდროდინამიკური წნევები).

მეორე თავში წარმოდგენილია წყალსატევების (მათ შორის წყალსაცავების) სანაპირო ფერდობებზე მეწყერული პროცესების კლასიფიკაცია. განხილულია მეწყერული ქანების მექანიკის თავისებურებები და მეწყერის წარმოქმნის ძირითადი მიზეზები, აგრეთვე ცნობილი მეწყერული მოვლენები წყალსაცავებსა და მდინარეების ხეობების ფერდობებზე. გარდა ამისა, წარმოდგენილია ბლოკური ტიპის მეწყერის სანაპირო ფერდობზე მოძრაობის საანგარიშო სქემა.

მესამე თავში მიღებულია კონკრეტული საანგარიშო დამოკიდებულებები (ფორმულები) პროფ. თ. გველესიანის მიერ მიღებული ბრტყელი (ორ-განზომილებიანი) ტალღური სასაზღვრო ამოცანის ზოგადი ანალიზური ამონახსნის საფუძველზე. აღნიშნული ფორმულები შეესაბამებიან მეწყერის წყალში შემოსვლის და მასში მოძრაობის სხვადასხვა შემთხვევას.

მეოთხე თავში მოცემულია სხვადასხვა ტალღური პროცესის გათვლის შედეგები. დადგენილია, რომ ტალღის ამპლიტუდაზე გავლენას ახდენს როგორც ტალღის წარმოქმნელი ფაქტორები, ასევე წყალსაცავის ზომები, გარდა ამისა ტალღა განიცდის ფორმისა და სიგრძის ცვლილებას.

მეხუთე თავში დამუშავებულია მეწყერული ტალღის კაშხლის ქიმზე გადაღვრის პროგნოზირების ორი მეთოდი. პირველი (უფრო მარტივი)

მეთოდი გამოიყენება იმ შემთხვევაში, როდესაც ტალღის ამპლიტუდა (η^m) მნიშვნელოვნად მეტია კაშხლის ქიმის ნიშნულსა და წყალსაცავის საანგარიშო ღონეს შორის მანძილზე ანუ ე.წ. "მარაგის" სიდიდეზე (d); როდესაც $\eta^m < d$, მაშინ ტალღის კაშხალზე გადაღვრის მოდელირება წარმოებს, პროფ. თ.გველესიანი შემოთავაზების თანახმად, თანდათან მიახლოების (იტერაციული) მეთოდის გამოყენებით, რაც შესაძლებლობას იძლევა განისაზღვროს გადაღვრის ყველა პარამეტრი.

მექვსე თავში განისაზღვრება მეწყერით გამოწვეული ტალღის ჰიდროდინამიკური ზემოქმედება კაშხალზე საანგარიშო პარამეტრების სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის.

ABSTRACT

Problem actuality. For diverse waterworks facilities, to ensure their reliable and steady operation, are essential to effectively solving hydro-power engineering problems as well as those related to agriculture. In Georgia which is characterized by a mountainous terrain, waterworks facilities are mostly situated either in a hilly area or at foothills being often distinguished by severe geological conditions, as witnessed, in particular, by intensive landslide processes over mountain slopes.

In this connection, when designing and operating waterworks facilities, in order to ensure secure functioning and ecological safety in the adjacent area, proper allowance must be made for the impact of the specific factors characteristic of mountainous regions.

One of a number of those important factors is intensive wave process generated on water surface due to landslide falling into water in its downhill motion for one reason or other, from waterworks facility water-storage reservoir shore slope. When the waves are high enough, there can take place dam overflowing, causing in turn, either partial or overall wash-out at dam (given that the dams for irrigation waterworks facilities are made, as a rule, of locally available natural material featuring a tendency for intensive wash-out). Propagating downstream, the said waves can cause the destruction of structures, irrigation and transportation systems etc., and also, on occasion, may result in casualties (disastrous impact of landslide waves generated in Viont water-storage reservoir in Italy, 1963 and in Lion Lake in Norway, 1936 are a good case in point) etc.

The issues concerning landslide-generated wave prediction for large hydraulic power waterworks facilities situated in mountainous regions have been worked out well enough based on a number of both theoretical and experimental studies. However, in the case of relatively small water-storage reservoirs, some currently central problems have not been adequately explored.

The objective and challenge of the research. Mathematical simulation and proper computational techniques is to be worked out in the determination of the parameters of landslide-generated high-wave (including wave amplitude and dam hydrodynamic pressure) in a relatively small water-storage reservoir as well as dam overflow process.

The (scientific) innovation of the present study is as follows:

- **some analytical expressions have been obtained to be used in a series of systematic computerized calculations allowing a link to be established between the pattern of the landslide falling into the water and the intensity of the waves generated;**
- **An approximate analytical relationship has been developed in an effort to ensure fast prediction for the wavelength of landslide-generated plane waves;**
- **The generalized schemes has been obtained enabling to promptly determine maximum rise in water level at the dam.**
- **A techniques has been elaborated to be employed in the prediction of maximum wave dam overflowing process parameters, as well as wave-induced dam loading.**

Practical value of the research. Potential landslide starting downhill motion over the slopes of either hydraulic power storage reservoirs or irrigation reservoirs (which can result from heavy rains, inundation, earthquakes, technogenic reasons etc.) located in mountainous regions calls for effective prediction of landslide-generated wave parameters, which in turn provides a way for the wave process intensity in water-storage reservoir to be properly assessed and the security of the adjacent area to be ensured (dam overflowing, dam wash-out possibility etc.)

The first chapter is dedicated to major approximate theories of wave process research and their fields of application. The theory of long waves or shallow water waves (SW) theory ignores the vertical component of water velocity, the current in waterway cross-section thus being characterized, in particular, by just one mean horizontal velocity. According to another theory, one that is more general, specifically the small amplitude wave (SAW) theory, it is possible for waves of any length to be calculated, with allowance made for all velocity components. On the basis of that theory the boundary problem of hydrodynamics (potential motion) can be solved and velocity potential ϕ can be determined, which makes it possible to define all parameters of wave process (wave amplitude, velocities, hydrodynamic pressures).

The second chapter is concerned with the classification of landslide processes observed on basin shore slopes (including water-storage reservoir slopes.) Consideration is being given to the peculiarities of landslide rocks as well

as to the main reasons of landslide initiation. Certain reported cases of landslide occurrence in water-storage reservoirs and river ravine slopes have also been discussed. Furthermore, a pattern of calculation and design scheme have been presented for block-type landslide motion over the reservoir shore slope.

Using the general analytical solution obtained by of professor T. Gvelesiani's of plane (two-dimensional) wave boundary problem as a building-block, some concrete mathematical relationships have been obtained and duly presented in the third chapter. The formulae mentioned above involve various cases of landslide plunging into water and its motion in water.

The fourth chapter offers the results of calculations carried out for various wave processes. Wave amplitude has been found to be influenced by both wave-generating factors and water-storage reservoir dimensions; further still, the wave experiences changes in shape and length.

The fifth chapter deals with two methods to be employed for the prediction of landslide-induced dam overflowing. The first one (the simpler method) is used with wave maximum amplitude (η^m) being far greater than the freeboard (d) (i.e. height between a dam crest level and water-storage reservoir reference level), when $\eta^m < d$, the simulation of dam overflowing is to be carried out, according to professor Gvelesiani's suggestion, following the method of progressive approximation (iteration method), which makes it possible to determine all overflowing process parameters.

The sixth chapter is dedicated to the evaluation of landslide-generated wave hydrodynamic impact on the dam for a variety of design parameters values.

შესავალი	16
თავი 1. ბუნებრივ და ხელოვნურ წყალსატევებში (წყალსაცავებში) მეწყერით წარმოქმნილი არასტაციონალური ჰიდროდინამიკური პროცესების კვლევის მეთოდები და მათი შედეგები	21
1.1. ტალღური პროცესების კვლევის ძირითადი მიახლოებითი თეორიები და გამოყენებული დაშვებები	21
1.2. არსებული ლიტერატურული წყაროების მიმოხილვა და კრიტიკული ანალიზი	32
თავი 2. წყალსაცავების სანაპირო ფერდობებზე მეწყერული პროცესების დახასიათება.	43
2.1. მეწყერების ძირითადი ნიშნები და მათი კლასიფიკაცია	43
2.2. მეწყერული ქანების მექანიკის თავისებურებები და მეწყერების წარმოქმნის ძირითადი მიზეზები	49
2.3. მეწყერული მოვლენები წყალსაცავებისა და მდინარეების ხეობების ფერდობებზე	58
2.4. წყალსაცავის სანაპირო ფერდობზე ბლოკური მეწყერის მოძრაობის საანგარიშო სქემა	62
თავი 3. საანგარიშო დამოკიდებულებების მიღება წყალსაცავებში მეწყერით წარმოქმნილი ტალღების შესწავლის მიზნით	66
3.1. წყალსაცავში მეწყერით გამოწვეულ ტალღურ პროცესთან დაკავშირებული ჰიდრომექანიკური ამოცანის ფორმულირების ასპექტები	66
3.2. ტალღური პროცესის განმსაზღვრელი კონკრეტული საანგარიშო დამოკიდებულებების მიღება	74
თავი 4. წყალსაცავებში ბენერირებული ტალღების პარამეტრების პრობლემა	82
4.1. მეწყერით გამოწვეული ტალღის ტრანსფორმაციის ძირითადი ნიშნები. მეწყერული ტალღის სიგრძის შეფასება	82
4.2. ტალღის "ფაზური" სიჩქარის შეფასება	94
4.3. მეწყერის კინემატიკური და წყალსაცავის გეომეტრიული პარამეტრების გავლენა ტალღურ პროცესზე	95
4.4. ჰიდროკვანძების კაშხლებთან მეწყერით განპირობებული წყლის დონეების მაქსიმალური აწევის პროგნოზირება	98

თავი 5.	კაშხალზე მაღალი მეწვერული ტალღის გადაღვრის პრობნოზირება	106
5.1.	კაშხალზე მაღალი ტალღის გადაღვრის პარამეტრები	106
5.2.	ტალღის კაშხალზე გადაღვრის მოდელირება იტერაციული მეთოდის გამოყენებით	114
თავი 6.	მეწვერით გამოწვეული ტალღის ჰიდროდინამიკური ზემოქმედება კაშხალზე	121
	პირითადი დასკვნები და რეკომენდაციები	128
	გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხა	131

ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1	გვ. 48
ცხრილი 2	გვ. 84
ცხრილი 3	გვ. 92
ცხრილი 4	გვ. 96
ცხრილი 5	გვ. 97
ცხრილი 6	გვ. 101
ცხრილი 7	გვ. 104
ცხრილი 8	გვ. 109
ცხრილი 9	გვ. 112

ნახაზების ნუსხა

ნახ. 1. საანგარიშო სქემა წყალსატევებში და ღია კალაპოტებში ჰიდროდინამიკური პროცესე შესწავლის მიზნით	გვ. 22
ნახ.2. ა. ექსპერიმენტალური დანადგარის სქემა ნორმალური დატვირთვისა და T ტანგენციალური ძაბვას შორის დამოკიდებულების განსაზღვრისათვის; ბ. $T=f(N)$ დამოკიდებულების გრაფიკები; გ. დატვირთვისა და დეფორმაციას შორის დამოკიდებულების ამსახველი გრაფიკები ქანის სხვადასხვა მასალის შემთხვევაში	გვ. 54
ნახ. 3. ბლოკური ტიპის მეწყერის სანაპირო ფერდობზე მოძრაობის საანგარიშო სქემა	გვ. 62
ნახ. 4. ა) წყალსაცავში მეწყერით გენერირებული ტალღების გავრცელება; ბ) ბრტყელი მეწყერული ტალღების წარმოქმნის საანგარიშო სქემა, სხვადასხვა $F(z)$ ფუნქციის შემთხვევაში; გ) $f(t)$ ფუნქციის სხვადასხვა სახე	გვ. 67
ნახ. 5. მეწყერის სიჩქარის დროში ცვლილების აპროქსიმაციის სხვადასხვა ფუნქცია	გვ. 69
ნახ. 6. ტალღური პროცესები სხვადასხვა დროის მომენტში $f(t)$ ფუნქციის გათვალისწინებით	გვ. 79
ნახ. 7. ტალღური პროცესები სხვადასხვა დროის მომენტში $f(t)$ ფუნქციის გათვალისწინებით	გვ. 80
ნახ. 8. მეწყერული ტალღის ფარდობითი მნიშვნელობის შემცირება x^* სიდიდის მიმართ სხვადასხვა დროის მომენტებისათვის	გვ. 86
ნახ. 9. მეწყერული ტალღის ფარდობითი მნიშვნელობის შემცირება x^* სიდიდის მიმართ სხვადასხვა დროის მომენტებისათვის	გვ. 87
ნახ. 10. ბრტყელი მეწყერული ტალღის პროფილები წყალსაცავის სხვადასხვა x^* უბანზე შესაბამის მნიშვნელობებისათვის ($t^* = 1; 25; 54$); $l^* = 50$; $D = 10$ მ; $t_0^* = 5.0$)	გვ. 88
ნახ. 11. დამოკიდებულება η_{max}/D სიდიდისა და $l^* = l/h$ პარამეტრს შორის სხვადასხვა $f(t)$ ფუნქციის დროს	გვ. 89
ნახ. 12. ტალღის ფარდობითი მაქსიმალური ამპლიტუდის ცვლილება x^* მიხედვით სხვადასხვა t_0^* შემთხვევაში. $f(t) = \cos(\beta \cdot t)$	გვ. 90

ნახ.13. მეწყერული ტალღის კაშხალზე აგორების მაქსიმალური ფარდობითი ამპლიტუდების დამოკიდებულება t_0^* პარამეტრის მნიშვნელობაზე სხვადასხვა l^* სიღიდებისათვის	ბვ. 93
ნახ.14. მეწყერული ტალღის დროის მიხედვით ცვლილების წარმოდგენა ინტეგრალური ფუნქციის სახით	ბვ. 107
ნახ. 15.	ბვ. 109
ნახ. 16. მეწყერის ტალღის ფარდობითი სიგრძის დამოკიდებულება t_0^* პარამეტრზე სხვადასხვა l^* შემთხვევაში	ბვ. 111
ნახ. 17. მეწყერული ტალღის კაშხალზე გადაღვრის პარამეტრები (მათ შორის η_d^{\max} - ამპლიტუდა გადაღვრის გარეშე, $\eta^{1, \max}$ - ამპლიტუდა გადაღვრის შემთხვევაში)	ბვ. 115
ნახ. 18. ტალღის გადაღვრის პროცესის საანგარიშო პარამეტრები (η^* , h_p^*) სხვადასხვა იტერაციის ბიჯის დროს	ბვ. 119
ნახ. 19. მეწყერული ტალღით გამოწვეული ჰიდროდინამიკური წნევის გადანაწილება კაშხალზე	ბვ. 124
ნახ. 20. a) მეწყერით წარმოქმნილი ტალღის პროფილი (η_{\max} - ტალღის მაქსიმალური აგორების (დონის აწევის) სიმაღლე b) ტალღის საერთო ფარდობითი დატვირთვა კაშხალზე (P) და შესაბამისი ჰიდროსტატიკური შემადგენელი	ბვ. 125
ნახ. 21. მეწყერული ტალღით გამოწვეული ჰიდროდინამიკური წნევის გადანაწილება კაშხალზე	ბვ. 126
ნახ. 22. a) მეწყერით წარმოქმნილი ტალღის პროფილი (η_{\max} - ტალღის მაქსიმალური აგორების (დონის აწევის) სიმაღლე b) ტალღის საერთო ფარდობითი დატვირთვა კაშხალზე (P) და შესაბამისი ჰიდროსტატიკური შემადგენელი	ბვ. 127

შესავალი

პრობლემის აქტუალობა. ჰიდროენერგეტიკისა და სოფლის მეურნეობის განვითარების ამოცანების წარმატებით გადაწყვეტის ერთ-ერთ აუცილებელ და ქმედით საშუალებას სხვადასხვა დანიშნულების ჰიდროკვანძები წარმოადგენენ მათი საიმედო ფუნქციონირების პირობებში. საქართველოში, რომელიც მთა-გორიანი რელიეფით ხასიათდება, ეს ჰიდროკვანძები, განლაგებულია უმეტესწილად, მთის ან მთისწინა რაიონებში, რომლებიც ხშირად, რთული გეოლოგიური პირობებით განირჩევიან, რაც გამოიხატება კერძოდ, ინტენსიური მეწყერული პროცესებით მთის ფერდობებზე.

ამასთან დაკავშირებით, სამელიორაციო ჰიდროკვანძების დაგეგმარებისა და ექსპლუატაციის დროს, მათი საიმედო ფუნქციონირებისა და მიმდებარე რაიონის ეკოლოგიური უსაფრთხოების უზრუნველყოფის მიზნით, აუცილებელია, გათვალისწინებული იყოს აღნიშნული პირობებისათვის დამახასიათებელი სპეციფიკური ფაქტორების ზემოქმედება.

ერთ-ერთ ასეთ მნიშვნელოვან ფაქტორს წარმოადგენს ჰიდროკვანძის წყალსაცავის სანაპირო ფერდობიდან ამა თუ იმ მიზეზით, მეწყერის წყალში ჩამონგრევის შედეგად წყლის ზედაპირზე აღძრული ინტენსიური ტალღური პროცესი. საკმარისად მაღალი ტალღების გენერაციის შემთხვევაში, შეიძლება მოხდეს მათი გადაღინება კაშხალზე, რაც თავის მხრივ, გამოიწვევს კაშხლის ნაწილობრივ ან მთლიან წარეცხვას (თუ მივიღებთ მხედველობაში, რომ საირიგაციო დანიშნულების ჰიდროკვანძების კაშხლები, როგორც წესი აიგება ადგილობრივი მასალისაგან, რომელიც ინტენსიური წარეცხვის თვისებით ხასიათდება). ამ დროს ქვედა ბიეფში გავრცელების შედეგად აღნიშნული ტალღები შენობა-ნაგებობების, საირიგაციო და სატრანსპორტო სისტემებისა და სხვ. დანგრევის მიზეზი ხდება, ზოგჯერ კი, განაპირობებენ ადამიანთა მსხვერპლს (ამის მაგალითებია, იტალიაში ვაიონტის წყალსაცავში, 1963 წ. და ნორვეგიაში ლიონის ტბაში, 1936 წ. მეწყერით წარმოქმნილი ტალღების კატასტროფული შედეგები) და სხვ.

ამჟამად, მთის რეგიონებში განლაგებული დიდი ჰიდროენერგეტიკული დანიშნულების ჰიდროკვანძების პირობებისათვის, მეწყერთ გენერირებული ტალღების პროგნოზირების საკითხები საკმაოდ კარგად არის დამუშავებული, მთელი რიგი თეორიული, აგრეთვე ექსპერიმენტალური კვლევების შედეგად. ამის მიუხედავად, შედარებით მცირე ზომის წყალსაცავების შემთხვევაში, რაც დამახასიათებელია საირიგაციო დანიშნულების წყალსაცავებისათვის, ზოგიერთი აქტუალური საკითხი არასაკმარისად არის შესწავლილი.

კერძოდ, საირიგაციო დანიშნულების წყალსაცავებში სანაპირო ფერდობზე წარმოქმნილი მეწყერული კერები ჩვეულებრივ, უფრო ახლოს არიან (აბსოლუტურ მასშტაბში) განლაგებული კაშხლიდან, ვიდრე დიდი (ჰიდროენერგეტიკული ან კომპლექსური დანიშნულების) წყალსაცავების შემთხვევაში. ამიტომ, მათემატიკური მოდელირებისას საირიგაციო წყალსაცავში კაშხალთან მოსული მეწყერული ტალღის (ანუ იმპულსური ტალღის) ამპლიტუდის ზუსტი განსაზღვრის საჭიროება მოითხოვს წყალში მეწყერის შემოსვლის პროცესის დეტალურ ანალიზსა და შესაბამისი ტალღური მოძრაობის შეძლებისდაგვარად, ადეკვატურად ასახავს. კერძოდ, აღნიშნული მოთხოვნა სათანადოდ უნდა აისახოს, როგორც მეწყერული ტანის მოძრაობის მათემატიკურ მოდელში, ასევე განსახილველი ტალღების პარამეტრების განმსაზღვრელ შესაბამის საანგარიშო დამოკიდებულებებში.

კვლევის ობიექტი. შესწავლის ძირითადი ობიექტია ტალღები სხვადასხვა დანიშნულების წყალსაცავებში, კაშხალი და სანაპირო ფერდობები, სადაც წყლის დონემ შეიძლება აიწიოს არასასურველ ნიშნულამდე მეწყერის წყალში ჩამონგრევის შედეგად. შესწავლის საგანია აგრეთვე, სანაპირო ფერდობზე მეწყერული ტანი (ბლოკე) მისი მოძრაობის პროცესში.

ნაშრომის მიზანია. მეცნიერულად დასაბუთებული მეთოდის დამუშავება, რომლის საფუძველზე შესაძლებელია განხორციელდეს წყალსაცავებში მეწყერთ წარმოქმნილი ბრტყელი იმპულსური ტალღების ძირითადი პარამეტრების (სიმაღლე, პერიოდი) ოპერატიული პროგნოზირება, რაც საფუძველი იქნება ჰიდროკვანძის საიმედო

ფუნქციონირებისა და მის ბიეფში ეკოლოგიური უსაფრთხოების პირობების უზრუნველყოფისათვის.

დასახული მიზნის მისაღწევად დასმულია შემდეგი ამოცანები:

- წყალსაცავის სანაპირო ფერდობზე მეწყერის მოძრაობის მათემატიკური მოდელის დამუშავება, წყალში მისი შემოსვლის პროცესში წარმოქმნილი ამომგდები ძალის ცვლილების გათვალისწინებით.
- საანგარიშო დამოკიდებულებების მიღება იმ შემთხვევებისათვის, როდესაც მეწყერული ტანის შემოსვლა წყალსაცავში ხდება არა მთელ სიღრმეზე, არამედ წყლის თავისუფალ ზედაპირთან ახლოს მდებარე ზონაში;
- წყალსაცავში ტალღური პროცესის ინტენსივობაზე იმ გავლენის დადგენა, რომელსაც ახდენს მეწყერული მასის წყალსაცავში ჩამონგრევის სხვადასხვა ხასიათი, შესაბამისი კომპიუტერული გაანგარიშებების შედეგების ანალიზის საფუძველზე;
- წყალსაცავში მეწყერით გენერირებული ბრტყელი ტალღის სიგრძის განსაზღვრა, გაანგარიშებათა შედეგად მიღებული ტალღური პროფილების დამუშავების საშუალებით;
- კაშხალთან მოსული ტალღის მაქსიმალური ამპლიტუდის პროგნოზირება მეწყერული პროცესის სხვადასხვა ხანგრძლივობისა და წყალსაცავის ზომების გათვალისწინებით.

ნაშრომის სამეცნიერო სიახლე მდგომარეობს შემდეგში:

- დამუშავებულია მათემატიკური მოდელი, რომლის საშუალებით ოპერატიულად ხორციელდება ბლოკური ტიპის მეწყერის კინემატიკური პარამეტრების (სიჩქარე, ხანგრძლივობა) განსაზღვრა; ამასთან გამოიყენება ახალი საანგარიშო სქემა, რომლის მიხედვით გარკვეული ფორმის მეწყერული ტანის წყალში თანდათან შემოსვლის პროცესში წარმოქმნილი წყლის ამომგდები ძალის აღწერა ხდება უფრო კორექტულად (სხვა არსებულ საანგარიშო სქემებთან შედარებით);
- მიღებულია ანალიზური გამოსახულებები და მათ საფუძველზე ჩატარებულია სისტემური კომპიუტერული გაანგარიშებათა ციკლი, რის მიზანია იმ გავლენის დადგენა, რომელსაც ახდენს

მეწყერის წყალში შემოსვლის ხასიათი წარმოქმნილ ტალღების ინტენსივობაზე;

- მიღებულია ანალიზური დამოკიდებულება მეწყერით გამოწვეული ბრტყელი ტალღის სიგრძის სწრაფი პროგნოზირების მიზნით;
- მიღებულია ფორმულა, რომლის საშუალებით შესაძლებელია კაშხალთან წყლის დონის აწვევის მაქსიმალური სიდიდის სწრაფი დადგენა.

ნაშრომის პრაქტიკული ღირებულება. მთიან რეგიონებში განლაგებული ჰიდროენერგეტიკული და საირიგაციო დანიშნულების წყალსაცავების ფერდობებზე პოტენციური მეწყერის აქტივიზაციის დროს (რაც შეიძლება გამოწვეული იყოს უხვი წვიმებით, წყალმოვარდნით, მიწისძვრით, ტექნოგენური მიზეზებით და სხვ.), აუცილებელია ჩატარდეს აღნიშნული მეწყერის კინემატიკური პარამეტრების სიდიდის ოპერატიული პროგნოზირება, რაც თავის მხრივ არის საფუძველი იმისათვის რომ კორექტულად შეფასდეს ტალღური პროცესის ინტენსივობა წყალსაცავში და უსაფრთხოების პირობები კაშხლის ფუნქციონირებისათვის (კაშხალზე ტალღის გადაღვრის, კაშხლის წარცხვის შესაძლებლობა და სხვ.). სწორედ, ამით არის განპირობებული ნაშრომში მიღებული შედეგების პრაქტიკული მნიშვნელობა. კერძოდ, ნაშრომში დამუშავებული მეთოდიკა საშუალებას იძლევა სწრაფად ჩატარდეს, როგორც მეწყერის მოძრაობის პარამეტრების (ფერდობზე მისი სიჩქარისა და მოძრაობის ხანგრძლივობის) დადგენა, ასევე წარმოქმნილი მაღალი ტალღების გაანგარიშება, რის საფუძველზე შესაძლებელი ხდება ჰიდროკვანძის ძირითადი ნაგებობების საიმედო ფუნქციონირებისა და მიმდებარე რაიონში უსაფრთხო ეკოლოგიური პირობების პროგნოზირება.

ნაშრომის შედეგების უტყუარობა. ნაშრომის შედეგები ეფუძვნება მექანიკის და ჰიდრომექანიკის ცნობილი კანონების (კინემატიკური ენერჯის, მასის, მოძრაობის შენახვის კანონები) გამოყენებას.

ნაშრომში ჩვენს მიერ წარმოდგენილი კონკრეტული სახის საანგარიშო ფორმულები მიღებულია შესაბამისი სასაზღვრო ამოცანის პროფ. თ. გველესიანის მიერ მიღებული ზოგადი ამონახსნის საფუძველზე. აღნიშნული ამონახსნის უტყუარობა და გამოყენების ფარგლები

კარგად არის ცნობილი (იხ. ცნობილი ლიტერატურული წყაროები), ამიტომ ნაშრომში მიღებული ფორმულებით სარგებლობის შესაძლებლობა მოიაზრება აღნიშნული გამოყენების ფარგლებში.

ნაშრომში მიღებული ფორმულები წარმოდგენილია შედარებით ცუდად კრებადი მწკრივების ჯამის სახით. ამიტომ გაანგარიშებათა სიზუსტის უზრუნველყოფის მიზნით ხდებოდა საჭირო რაოდენობის შესაკრებთა რიცხვის აღება, რის დადგენაც წარმოებდა სათანადო პროცედურის მიხედვით.

ნაშრომის აპრობაცია. საერთაშორისო სიმპოზიუმზე “წყალდიდობები და მათგან ბრძოლის ღონისძიებები და თანამედროვე მეთოდები”, თბილისი, 23-28 სექტემბერი, 2009 წ., აგრეთვე სადოქტორო პროგრამით გათვალისწინებულ ორ სემინარზე (საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი).

პუბლიკაცია. სადისერტაციო ნაშრომის თეორიული და პრაქტიკული ხასიათის კვლევათა შედეგები გამოქვეყნებულია 7 სამეცნიერო ნაშრომში.

ნაშრომის სტრუქტურა. სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლისაგან, 6 თავისაგან, დასკვნებისაგან და გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხისაგან. ნაშრომი შეიცავს 138 ნაბეჭდ გვერდს, 9 ცხრილსა და 22 ნახაზს. გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხა შეიცავს 110 დასახელებას.

**თავი I. ბუნებრივ და ხელოვნურ წყალსატევებში
(წყალსაცავებში) მეწყვრით წარმოქმნილი არასტაციონალური
ჰიდროდინამიკური პროცესების კვლევის მეთოდები**

**1.1. ტალღური პროცესების კვლევის ძირითადი მიახლოებითი
თეორიები და გამოყენებული დაშვებები**

ჰიდროტექნიკური (მათ შორის საირიგაციო ჰიდროკვანძების) დაგეგმარების დროს აუცილებელია ჰიდროტექნიკურ ნაგებობებზე და უპირველესად ყოვლისა კაშხალზე იმ ზეგავლენის განსაზღვრა, რომელიც წყლის ნაკადთან და ტალღურ მოძრაობებთან არის დაკავშირებული.

ამ მიზნით საჭიროა შესაბამისი ჰიდროდინამიკური ამოცანების განხილვა, რომელთა ამოხსნა საშუალებას იძლევა დადგენილ იქნას მთავარი ჰიდროდინამიკური პარამეტრები, რომლებიც აღნიშნულ ზეგავლენას განაპირობებენ. ეს პარამეტრებია:

- სიჩქარეები წყლის ნაკადში;
- ჰიდროდინამიკური წნევები;
- წყლის ზედაპირზე წარმოქმნილი ტალღების სიმაღლეები (ან ამპლიტუდები).

კონკრეტული საინჟინრო ამოცანის გადაწყვეტისას, ზოგ შემთხვევაში საკმარისია, ზემოაღნიშნულ პარამეტრებიდან, მხოლოდ ერთი პარამეტრის განსაზღვრა, რაც ამ ამოცანის სპეციფიკური, პრაქტიკიდან გამომდინარე მოთხოვნილებით არის განპირობებული.

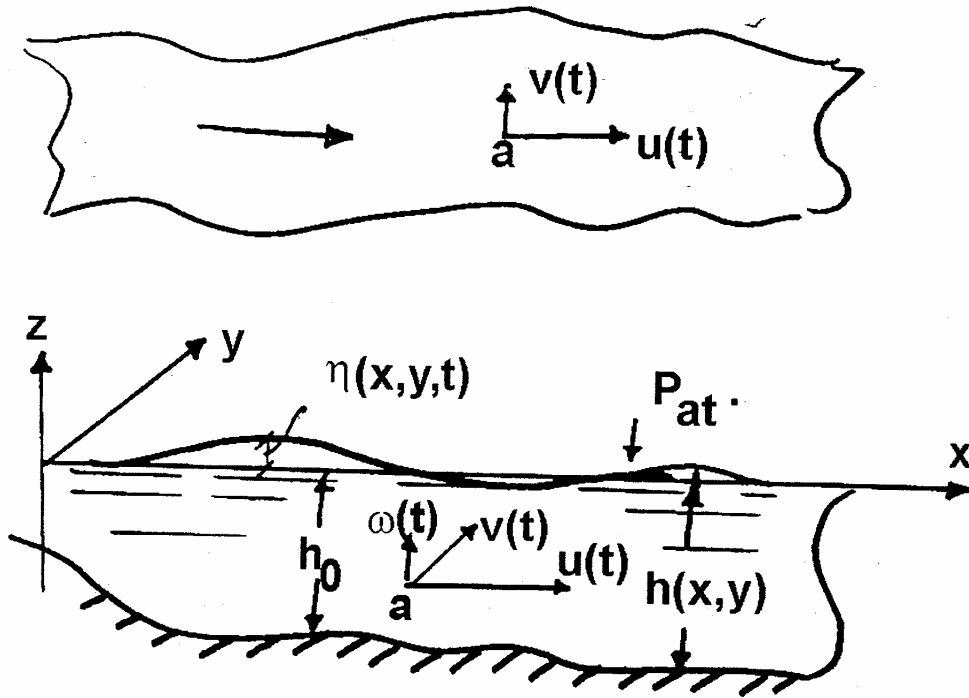
სითხის მოძრაობის შესწავლის ერთ-ერთ ძირითად მეთოდს წარმოადგენს ეილერის მეთოდი [1, 2], რომელიც მიუთითებს, თუ რა გზით უნდა აღიწეროს მოძრავი სითხის ნებისმიერ $a(x,y,z)$ წერტილში არსებული ჰიდროდინამიკური პარამეტრები, კერძოდ სიჩქარეები (\vec{V}) და წნევები (p), როგორც t დროის ფუნქციები

$$\vec{V} = F(x,y,z,t)$$

$$\text{ანუ } u = f_1(x,y,z,t); \quad v = f_2(x,y,z,t); \quad w = f_3(x,y,z,t);$$

$$\text{და } p = F_0(x,y,z,t)$$

სადაც u, v, w არის სიჩქარის ვექტორის (\vec{V}) მდგენელები შესაბამისად x,y,z – კოორდინატთა ღერძის მიმართ (ნახ.1).



ნახ. 1. საანგარიშო სქემა წყალსატევებში და ღია კალაპოტებში ჰიდროდინამიკური პროცესების შესწავლის მიზნით

მაშასადამე, სითხის მოძრაობა იქნება სრულად აღწერილი $a(x, y, z)$ წერტილში თუ შესაძლებელია \vec{V} და p სიდიდეთა წარმოდგენა სივრცითი და დროის ფუნქციების სახით. ამიტომ ჰიდროდინამიკის ამოცანების ამოხსნისათვის საჭიროა ორი განტოლება, ამასთან ერთი – ვექტორული ფორმით (\vec{V} სიჩქარის მიმართ). თუ \vec{V} ვექტორი წარმოდგენილია u, v, w კომპონენტების სახით, მაშინ სითხის მოძრაობის აღწერის მიზნით საჭიროა ოთხი სკალარული განტოლებათა სისტემა [2, 3].

იმ ამოცანების ამოხსნისათვის, რომლებიც დაკავშირებულია თავისუფალი ზედაპირის მქონე ნაკადების შესწავლასთან, უცნობი სიდიდის სახით გვევლინება აგრეთვე, თავისუფალი ზედაპირის ამადლება სითხის სტატიკური დონის მიმართ $\eta(x, y, t)$ ანუ ნაკადის სიღრმე $h(x, y, t)$. მაგრამ, ამ შემთხვევაში ცნობილია სიდიდე p , რომელიც ტოლია ატმოსფერული წნევისა (ნახ.1).

ჰიდროდინამიკის ამოცანების განხილვისას, გამოიყენება ძირითადი განტოლებები, რომლებიც ასახავენ ცნობილ ფიზიკურ კანონებს. კერძოდ, არაკუმშვადი სითხისათვის ესაა – უწყვეტობისა და მოძრაობის რაოდენობის (იმპულსის) შენახვის კანონები [2].

არაკუმშვადი სითხისათვის უწყვეტობის კანონი გამოხატავს სითხის მოცულობის შენახვის პირობას და ამყარებს დამოკიდებულებას u, v, w სიჩქარის ვექტორის მდგენელებსა და x, y, z კოორდინატებს შორის.

მოძრაობის რაოდენობის შენახვის კანონი ასახავს დამოკიდებულებას ρ სიმკვრივის მქონე სითხის მოცულობის ერთეულებზე (W_0) მოდებულ F ძალებსა და ამ მოცულობაზე მოქმედი ინერციის ძალებს – $\rho \frac{d\bar{V}}{dt}$ შორის, რაც გამოიხატება ცნობილი კანონის საფუძველზე, შემდეგნაირად

$$\begin{aligned} F_x &= M_0 \frac{du}{dt} = \rho \frac{du}{dt}, \\ F_y &= M_0 \frac{dv}{dt} = \rho \frac{dv}{dt}, \\ F_z &= M_0 \frac{dw}{dt} = \rho \frac{dw}{dt}. \end{aligned} \quad (1.1)$$

სადაც F_x, F_y, F_z – არის \bar{F} ძალის კომპონენტები შესაბამის კოორდინატთა ღერძებს მიმართ; $M_0 = \rho W_0 = \rho$ (სადაც $W_0 = 1$) – ერთეული მოცულობის მასაა.

ბევრი ჰიდროდინამიკური ამოცანის ამოხსნისას, იგულისხმება, რომ იდეალური სითხის შემთხვევაში, ერთეულ მოცულობაზე მოქმედებს მხოლოდ სიმძიმის ძალა, რომლის მდგენელებია $G_x = 0, G_y = 0$ და

$$G_z = -\rho g = -\frac{\partial(\rho GZ)}{\partial z} \text{ და წნევის ძალა } p \text{ [4, 5] (ნახ. 1).}$$

ვინაიდან სიჩქარე რთული ფუნქციაა t ცვლადის მიმართ და დამოკიდებულია აგრეთვე x, y, z ცვლადებზე, ამიტომ კერძო შემთხვევაში $\frac{du}{dt}$ წარმოებული ასე შეიძლება ჩაიწეროს [1].

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \quad (1.2)$$

ანალოგიურად ჩაიწერება $\frac{dv}{dt}$ და $\frac{dw}{dt}$ წარმოებულებიც.

ზემოაღნიშნულთან დაკავშირებით, (1.1) განტოლებათა სისტემა შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი სახით [6]

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= - \frac{\partial p}{\partial x}, \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= - \frac{\partial p}{\partial y}, \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= - \frac{\partial(p + \rho g z)}{\partial z}. \end{aligned} \quad (1.3)$$

რაც შეეხება უწყვეტობის განტილებას, როგორც ცნობილია, არაკუმშვადი სითხის შემთხვევაში, ზოგადი სახით, ის შემდეგნაირად ჩაიწერება [1]

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{ანუ} \quad \text{div } \vec{V} = 0 \quad (1.4)$$

ღია კალაპოტებისათვის, ერთგანზომილებიანი (x ღერძის მიმართ) ნაკადისათვის, ამ განტოლების შემდეგი სახე აქვს [6]

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0. \quad (1.5)$$

ნაკადის სიღრმე h შეიძლება წარმოდგენილ იქნას შემდეგნაირად

$$h = h_0 + \eta \quad (1.6)$$

სადაც h_0 – სიღრმეა ათვლილი წყლის პორიზონტალური (სტატიკური დონიდან),

ხოლო η - ტალღის ამპლიტუდაა (ათვლილი ამავე დონიდან) (ნახ. 1).

(1.6) გამოსახულების გათვალისწინებით, უწყვეტობის (1.5) გამოსახულება შეიძლება ჩაიწეროს, აგრეთვე, ასეთი სახითაც

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + h_0 \frac{\partial u}{\partial x} + \eta \frac{\partial u}{\partial x} = 0. \quad (1.7)$$

მოძრაობის განტოლებათა სისტემა (1.3) და უწყვეტობის განტოლება (1.4), როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, წარმოადგენს ჰიდროდინამიკური ამოცანების ამოხსნისათვის საჭირო ძირითად განტოლებათა სისტემას იმ შემთხვევაში, როდესაც სითხე განიხილება როგორც იდეალური (ანუ როდესაც ხახუნის წინააღობის ძალებით უგულებელყოფა პრაქტიკულად

შეიძლება). ამასთან, ყოველი კონკრეტული ამოცანის ამოხსნისას, მხედველობაში უნდა იყოს მიღებული შესაბამისი საწყისი და სასაზღვრო პირობები, რომლებსაც მოკლედ ქვემოთ შევგებთ [6, 5].

მიუხედავად ამჟამად არსებული მძლავრი გამოთვლითი ტექნიკისა და ეფექტური რიცხვითი მეთოდებისა, (1.3) და (1.4) განტოლებათა სისტემის ამოხსნა დაკავშირებულია მთელ რიგ მათემატიკურ სიძნელესთან. განსაკუთრებით რთულია ტალღური ამოცანების ამოხსნა იმ ფაქტის გათვალისწინებით, რომ ჰიდროდინამიკური პარამეტრების (სიჩქარეები, წნევები, ტალღის ამპლიტუდები და სხვ.) განსაზღვრის არე წინასწარ ცნობილი არ არის, თავისუფალ ზედაპირზე ცვალებადი ტალღური პროცესების არსებობის პირობებში [6].

ამის გამო პრაქტიკაში, საინჟინრო ჰიდროდინამიკური ამოცანების ამოხსნისას ჩვეულებრივ, გამოიყენება მიახლოებითი თეორიები, რომლებიც გარკვეული გამარტივებისა და დაშვებების საფუძველზე აიგება [4, 5, 6]. სახელდობრ, ეს არის:

I. მცირე ამპლიტუდების ტალღების (მატ) თეორია;

II. მარჩხი წყლის (ანუ გრძელი ტალღების) თეორია.

მატ თეორია [71, 109] ეფუძვნება იმ დაშვებას, რომ:

ა) სითხის მოძრაობისას, გრიგალური მდგენელი ნულის ტოლია $\text{rot}\vec{V} = 0$, ანუ სითხის მოძრაობა პოტენციურია და ხასიათდება ერთი $\eta(x,y,z,t)$ ფუნქციით, რომელსაც სიჩქარის პოტენციალი ეწოდება:

ბ) სითხე იდეალურია;

გ) სითხეში წარმოქმნილი სიჩქარეები მცირეა;

დ) ტალღის ამპლიტუდის ფარდობა ამ ტალღის სიგრძესთან (ან წყალსატევის სიღრმესთან) მცირე სიდიდით ხასიათდება.

აღნიშნული დაშვებების გათვალისწინებით, შესაძლებელი ხდება ამა თუ იმ კონკრეტული ჰიდროდინამიკური ამოცანის ამოხსნისას, მოიძებნოს შესაბამისი ფუნქცია (სიჩქარის პოტენციალი), რის შედეგად, ამ ფუნქციის საშუალებით შეიძლება განისაზღვროს წყალსატევეში წარმოქმნილი სიჩქარის ყველა მდგენელი (კერძოდ, სიჩქარეთა ეპიურები ნაკადის ვერტიკალურ სიბრტყეში) და ჰიდროდინამიკური წნევები, აგრეთვე, ტალღების ამპლიტუდები და პროფილები (ჰორიზონტალური ღერძების გასწვრივ) და სხვ.

მწ თეორიის თანახმად [5], მიიღება, რომ:

ა) მოძრავ სითხეში სიჩქარის ვერტიკალური მდგენელი (w) ნულის ტოლია (ნახ.1), ხოლო ჰორიზონტალური მდგენელების (u, v) მნიშვნელობები ვერტიკალური ღერძის მიმართ უცვლელია (ანუ შესაბამის კვეთებში აიღება სიჩქარეთა გასაშუალოებული მნიშვნელობები);

ბ) სითხის მოძრაობაზე გავლენას ახდენს წინაღობის ძალა, რომელიც განპირობებულია სითხისა და მყარ საზღვარს (წყალსატარის ფსკერი, ფერდობები) შორის არსებული ხახუნის ძალით, აგრეთვე ტურბულენტური მოძრაობის ზეგავლენით:

გ) არასტაციონარული (დაუმყარებელი) მოძრაობის დროს აღნიშნულ წინაღობის ძალას მიახლოებით მიეკუთვნება ის მნიშვნელობა, რომელიც სითხის მხოლოდ თანაბარი მოძრაობის შემთხვევისათვის არის სამართლიანი [6].

როგორც აღინიშნა, სითხის პოტენციური მოძრაობის შემთხვევაში, ფ-ფუნქციის საშუალებით შესაძლებელია წერტილში სიჩქარის ვექტორის მდგენელების განსაზღვრა, რაც შემდეგნაირად ხორციელდება

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (1.8)$$

ამიტომ, ამ შემთხვევაში ფ-ფუნქციის მიმართ ჩაწერილი (1.4) უწყვეტობის განტოლება, შემდეგ სახეს იღებს

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (1.9)$$

ანუ $\Delta \varphi = 0 \quad (1.10)$

სადაც $\Delta = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z^2}$ არის ლაპლასის ოპერატორი. ეს განტოლება ცნობილია მათემატიკურ ფიზიკაში, როგორც ლაპლასის განტოლება [5, 7].

მატ თეორიის თანახმად სწორედ (1.9) განტოლებაა ის ძირითადი განტოლება, რომლის ამოხსნის შედეგად, შესაბამისი საწყისი და სასაზღვრო პირობების დაკმაყოფილებისას, ხდება ფ-ფუნქციის განსაზღვრა ანუ დასმული ჰიდროდინამიკური ამოცანის საძიებელი ამონახსნის მიღება.

სასაზღვრო პირობები სითხის მომცველი არისათვის (კერძოდ, წყალსატევისათვის) დამოკიდებულია მისი საზღვრის სახეზე, სახელდობრ, საზღვრის ერთ ნაწილს წარმოადგენს მყარი ზედაპირი, როგორცაა წყალსატევის ფსკერი, ფერდობები, კაშხალი (წყალსაცავის შემთხვევაში), მეორე ნაწილს კი – წყლის თავისუფალი ზედაპირი (ანუ წყლის ჰაერთან შემხები ზედაპირი).

იმ შემთხვევაში, როდესაც სითხე იდეალურია, სიჩქარეს მხოლოდ მხები მდგენელი (მყარი ზედაპირის გასწვრივ) v_{τ} გააჩნია; ამ დროს სიჩქარის მდგენელები მყარი ზედაპირის ნორმალური (n) მიმართულებით (v_n) არის ნულის ტოლი, ანუ

$$v_n = \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0. \quad (1.11)$$

თავისუფალ ზედაპირზე წნევა ცნობილია და ატმოსფერული წნევის ტოლია, მაგრამ თავისუფალი ზედაპირის მდებარეობა “ნულოვანი” ჰორიზონტალური (სტატიკური) დონის მიმართ, ზოგად შემთხვევაში უცნობია. ამგვარად, საჭიროა დაისვას შემდეგი ორი სასაზღვრო პირობა:

ა) დინამიკური სასაზღვრო პირობა, რომელიც მიიღება მოძრაობის განტოლებიდან;

ბ) კინემატიკური სასაზღვრო პირობა, რომელიც გამოხატავს იმ ფაქტს, რომ სითხის ნაწილაკი, რომელიც მდებარეობს თავისუფალ ზედაპირზე, შემდგომშიც რჩება ამ ზედაპირზე [4, 5, 6].

თუ მოძრაობის (1.3) განტოლება ჩაწერილია φ -ს მიმართ, ის ასე შეიძლება იქნეს წარმოდგენილი

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) + gz + \frac{p}{\rho} = 0, \quad \text{როდესაც } z = \eta \quad (1.12)$$

ანუ

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] + gz + \frac{p}{\rho} = 0, \quad \text{როდესაც } z = \eta \quad (1.13)$$

ეს არის დინამიკური სასაზღვრო პირობა.

ვინაიდან თავისუფალი ზედაპირი შეიძლება გამოისახოს შემდეგი ფუნქციის სახით

$$z = \eta(x,y,t)$$

(სადაც η – ტალღური ზედაპირის ამალეებაა თავისუფალი დონის მიმართ), მისი t -ცვლადით გაწარმოების შედეგად, მიიღება შემდეგი განტოლება

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{dy}{dt}, \text{ როდესაც } z = \eta \quad (1.14)$$

მაგრამ, თუ გავითვალისწინებთ იმ პირობას, რომ

$$\frac{dx}{dt} = u = \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad \frac{dy}{dt} = v = \frac{\partial \phi}{\partial y}, \quad \frac{dz}{dt} = w = \frac{\partial \phi}{\partial z}, \quad (1.15)$$

მაშინ, განტოლება (1.14) შეიძლება წარმოდგენილ იქნას შემდეგი სახით

$$\frac{d\phi}{dz} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{d\phi}{dx} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{d\phi}{dy}, \text{ როდესაც } z = \eta \quad (1.16)$$

ეს არის კინემატიკური სასაზღვრო პირობა [6].

სწორედ აღნიშნული დინამიკური და კინემატიკური პირობები (1.13) და (1.16) გამოიყენება იმ ამოცანების განხილვისას, რომლებიც ტალღურ პროცესების შესწავლასთან არიან დაკავშირებული. ეს განტოლებები არაწრფივია და უკვე ეს ფაქტორი ქმნის გარკვეულ სიძნელეებს აღნიშნული ტალღური ამოცანების ამოხსნისას; მაგრამ კიდევ უფრო დიდ სირთულეებს ვაწყდებით, თუ მხედველობაში მივიღებთ შემდეგ ფაქტორს: საძიებელი სიჩქარის პოტენციალი - ϕ , როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, უნდა აკმაყოფილებდეს პირობებს თავისუფალ ზედაპირზე, როდესაც $z = \eta(x,y,t)$, ამასთან თვით ფუნქცია $\eta(x,y,t)$ უცნობია; ამავე დროს ის შედის (1.13) და (1.16) განტოლებებში ანუ ამოცანის სასაზღვრო პირობებში.

სწორედ ამის გამო, კონკრეტული ტალღური ამოცანების განხილვისას, აღნიშნული არაწრფივი თეორიის მაგივრად გამოიყენება მისი გამარტივებული მოდიფიკაცია – მაშ ტეორიის სახით.

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, მაშ თეორიის თანახმად მიიღება, რომ ფარდობითი η სიდიდე და მისი წარმოებულები, აგრეთვე ფარდობითი სიჩქარის მდგენელები მცირე სიდიდეებია, ამიტომ მათი ნამრავლები დინამიკური და კინემატიკურ განტოლებებში შემავალ სხვა წევრებთან შედარებით იქნება უფრო მაღალი რიგის მცირე სიდიდეები,

რომელთა უგულებელყოფა შესაძლებელია. ამის თანახმად, აღნიშნული დინამიკური და კინემატიკური განტოლებები წარმოდგენილი იქნება, როგორც წრფივი განტოლებები. ამის გარდა, თუ მიიღება დაშვება, რომ $z = 0$ ($z = \eta$ პირობის მაგივრად) თავისუფალი ზედაპირისათვის, მაშინ (1.13) და (1.16) განტოლებების წარმოდგენა შეიძლება გამარტივებული სახით, შემდეგნაირად [4, 5, 6]:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad \text{როდესაც } z = 0 \quad (1.17)$$

$$-g\eta = \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad \text{როდესაც } z = 0 \quad (1.18)$$

თუ (1.18) განტოლებას გავაწარმოებთ t -თი და დავუმატებთ (1.17) გამოსახულებას, მივიღებთ ერთ განტოლებას ანუ ერთი სასაზღვრო პირობას თავისუფალ ზედაპირზე, რომელსაც კოში-ლაგრანჟის სახე აქვს:

$$g \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0, \quad \text{როდესაც } z = 0 \quad (1.19)$$

ამგვარად, მათ თეორიის თანახმად $\varphi(x,y,z,t)$ ფუნქციის განსაზღვრა შესაძლებელი ხდება ერთი $\Delta\varphi = 0$ წრფივი განტოლებიდან (იხ. (1.10)), როდესაც მყარ საზღვარზე შესრულებულია (1.11) პირობა, ხოლო თავისუფალ ზედაპირზე – (1.19) პირობა.

თუ ცნობილია φ ფუნქცია, მაშინ (1.13) გამოსახულების საშუალებით შეიძლება განისაზღვროს ჰიდროდინამიკური წნევა

$$p(z,t) = \rho \frac{\partial \varphi(x,y,z,t)}{\partial t} - \rho g z \quad (1.20)$$

ხოლო ტალღების ამპლიტუდის მნიშვნელობების განსაზღვრა შესაძლებელია წყალსატევის წყლის სარკის ნებისმიერ (x,y) წერტილში (1.18) განტოლების საშუალებით, შემდეგნაირად:

$$\eta(x,y,t) = -\frac{1}{g} \frac{\partial \varphi(x,y,z,t)}{\partial t} \Big|_{z=0} \quad (1.21)$$

თეორიული გაანგარიშებათა შედეგების და ექსპერიმენტალური მონაცემების შედარების საფუძველზე, ბევრი მეცნიერი ასკვნის, რომ მცირე ამპლიტუდის თეორიის გამოყენება მიუხედავად ზემოთ აღნიშნული დაშვებებისა, შესაძლებლობას იძლევა პრაქტიკისათვის

საკმარისი სიზუსტით ამოიხსნას მთელი რიგი საინჟინრო ამოცანები იმ შემთხვევაშიც კი, როდესაც ტალღები მნიშვნელოვანი სიმაღლით ხასიათდებიან [6].

ასე მაგალითად, ცნობილი საბჭოთა მეცნიერი ლ.ი. სრეტენსკი თავის მონოგრაფიაში [4] აღნიშნავს, რომ “მცირე ამპლიტუდების თეორია, მიუხედავად თავისი ძირითადი დებულებათა თითქოსდა უზუსტობისა, მთავარ როლს თამაშობს იმ საკითხების ანალიზში, რომლებიც დაკავშირებულია ტალღურ მოძრაობებთან. ამ აზრის სამართლიანობის საფუძველს წარმოადგენს ის, რომ მცირე ამპლიტუდის თეორია მნიშვნელოვან დადასტურებას პოულობს მრავალრიცხოვან ცდებში”.

ამასთან, ბევრ საინჟინრო ამოცანების გადაჭრისას, წყალსატევებსა და ღია წყალსატარებში წარმოქმნილი ტალღების ამპლიტუდა არ შეიძლება მიღებული იყოს, როგორც მცირე სიდიდე წყლის სიღრმესთან შედარებით. ხშირად, საჭირო ხდება აგრეთვე, ტალღურ პროცესებზე ისეთი ფაქტორის გათვალისწინებაც, როგორცაა წყლის მოძრაობის დროს წარმოქმნილი წინაღობა. ასეთ შემთხვევაში ჩვეულებრივ გამოიყენება, ზემოთ აღნიშნული მარჩხი წყლის (მწ) თეორიის წინამძღვრები.

მწ თეორიის ძირითადი დაშვების თანახმად, სიჩქარის ვერტიკალური მდგენელი (w) იმდენად მცირეა, რომ მისი მოქმედება p წნევაზე უმნიშვნელოა, რის გამოც წნევის განაწილება მოძრავ სითხეში ემორჩილება ჰიდროსტატიკურ კანონს ანუ

$$p = \rho g(\eta - z) \quad (1.22)$$

ამ გამოსახულების თანახმად, როდესაც $z = \eta$ (ტალღურ ზედაპირზე), მაშინ $p = 0$; როდესაც $z = 0$ (სტატიკურ დონეზე), $p = \rho g\eta$; როდესაც $z = -h_0$ (ფსკერზე), $p = \rho g(\eta + h)$ (ნახ.1).

ამ შემთხვევაში p სიდიდის ცვლილება x ღერძის (ასევე y ღერძის) მიხედვით არ არის დამოკიდებული z ცვლადზე. კერძოდ (1.22) გამოსახულების დიფერენცირება x ცვლადით, გვაძლევს

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho g \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (1.23)$$

სითხის ერთგანზომილებიანი მოძრაობის შემთხვევაში (x ღერძის

გასწავრივ), თუ გავითვალისწინებთ (1.23) გამოსახულებას და იმას, რომ $u \frac{\partial w}{\partial x} = 0$, მაშინ მოძრაობის განტოლება (1.3) ასე ჩაიწერება

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad (1.24)$$

უნდა აღინიშნოს, რომ ამ შემთხვევაში უწყვეტობის განტოლება, ზემოთ მოყვანილი (1.5) გამოსახულების სახეს ინარჩუნებს.

მწ თეორიის თანახმად, (1.24) განტოლებაში შემავალი u სიჩქარის მდგენელის მაგივრად უნდა იყოს აღებული მისი გასაშუალებული (ცოცხალ კვეთში) მნიშვნელობა, ანუ

$$\bar{u} = \frac{1}{\omega} \int \int_{\omega} u d\omega \quad (1.25)$$

სადაც ω – ცოცხალი კვეთია.

მდინარეებისა და არხების შემთხვევაში, რეინოლდსის რიცხვი ჩვეულებრივ დიდია [1], ამიტომ ნაკადი ტურბულენტურია. ამ შემთხვევაში შეიძლება ჩაითვალოს, რომ მოძრავ სითხეში წარმოქმნილი მხები ძაბვები (τ) კვადრატულ დამოკიდებულებაშია ნაკადის გასაშუალებულ სიჩქარესთან [6] ანუ

$$\tau = \rho f \bar{u}^2 \quad (1.26)$$

სადაც f – ხახუნის კოეფიციენტი და აიღება $f = \frac{g}{C^2}$ ტოლი;

C – შეზის კოეფიციენტი, რომლის მნიშვნელობები ექსპერიმენტალურად დადგენილია გარკვეულ ფარგლებში ნაკადის თანაბარი მოძრაობის შემთხვევისათვის [1, 6].

ერთეულ სითხის მოცულობაზე ($M_0 = \rho$) და სველი პარამეტრის ერთეულ სიგრძეზე მოქმედი τ ძაბვა ტოლი იქნება $\tau_0 = \frac{\tau}{\rho h}$ იმ

შემთხვევაში თუ ჰიდრაულიკური რადიუსი $R = h$, ანუ მაშინ, როდესაც კალაპოტის სიგანე ბევრად აღემატება მის სიღრმეს [1]. ამ დროს, ერთგანზომილებიანი ნაკადის მოძრაობის განტოლება მწ თეორიის აღნიშნული წინამძღვრების გათვალისწინებით ჩაიწერება შემდეგნაირად

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau}{\rho h} \quad (1.27)$$

თუ τ სიდიდს მნიშვნელობას ავიღებთ (1.26) გამოსახულების სახით, მაშინ მოძრაობის განტოლება (1.27), ასეთ სახეს მიიღებს

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{C^2} \frac{\bar{u} |\bar{u}|}{h} \quad (1.28)$$

ამ განტოლებაში შემავალი $\frac{\partial \eta}{\partial x}$ წარმოებული, თუ მხედველობაში მიიღება ტოლობა, რომ $\eta = h - h_0$ (ნახ. 1), შეიძლება წარმოდგენილი იყოს შემდეგნაირად, (ნახ.1).

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{dh_0}{dx} = \frac{\partial h}{\partial x} - i \quad (1.29)$$

სადაც $i = \frac{dh_0}{dx}$ არის კალაპოტის ფსკერის ქანობი [1].

(1.29) განტოლების გათვალისწინებით, მოძრაობის განტოლება (1.28) ეხლა შეიძლება წარმოდგენილი იყოს შემდეგნაირი სახითაც:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = -gi - \frac{g}{C^2} \frac{\bar{u} |\bar{u}|}{h} \quad (1.30)$$

ეს განტოლება ცნობილია სენ-ვენანის განტოლების სახელით და წარმოადგენს კერძოწარმოებულებიან არაწრფივ დიფერენციალურ განტოლებას [1, 6].

12. არსებული ლიტერატურული წყაროების მიმოხილვა და კრიტიკული ანალიზი

პირველ ნაშრომებს, რომელიც შეეხება წყალსაცავში მიწისძვრის დროს წამოქმნილ ბრტყელი ტალღური ამოცანის ანალიტიკურ ამოხსნას მათ თეორიის საფუძველზე, ეკუთვნის პროფ. თ. გველესიანს [8, 9]. ოდნავ მოგვიანებით მეწყერით გამოწვეული ბრტყელი ტალღების თეორიული და ექსპერიმენტალური კვლევის შედეგები გამოქვეყნებული იყო აშშ-ში [10,11]. შემდგომში, მეწყერებითა და მიწისძვრებით წყალსაცავში გენერირებული ტალღების შესწავლა წარმოებდა ძირითადად, საქართველოს ენერგეტიკისა და ენერგეტიკულ ნაგებობათა სამეცნიერო-კვლევით ინსტიტუტში პროფ. თ. გველესიანის (თემატიკის ხელმძღვანელი), გ. მამრაძის [12-16, 17], პროფ. ი. მუზავეის [18-20], გ. ჯინჯიხაშვილის [21-23], ლ. როზენტურის [24, 25] და სხვ. მიერ. ეს

კვლევები ხორციელდებოდა, როგორც თეორიულ (უმეტესად მათ თეორიის გამოყენებით), ასევე ექსპერიმენტალური მეთოდების საფუძველზე. მათ თეორიაზე დაყრდნობით რამდენიმე შრომა იყო აგრეთვე, გამოქვეყნებული ს. ოსტროვერხის და ე. ლემბერგის (უკრაინის ჰიდროდინამიკის ინსტიტუტი) მიერ [26]. აღნიშნული თეორიული კვლევები წარმოებდა აგრეთვე საქართველოს სახელმწიფო აგრარულ უნივერსიტეტში პროფ. რ. დანელიას და ლ. დათუნაშვილის მიერ [27-30].

საქართველოს ენერგეტიკისა და ენერგეტიკულ ნაგებობათა სამეცნიერო-კვლევით ინსტიტუტში ჩატარებული კვლევების შედეგები აღნიშნულ საკითხზე გამოყენებული იყო მთელი რიგი მაღალი კაშხლების დაპროექტებისას, ყოფილ საბჭოთა კავშირის სხვადასხვა რესპუბლიკაში: რუსეთში (საიანო-შუშენის ჰესი), სომხეთში (გეტიკის ჰესი), საქართველოში (ჟინვალისა და ხუდონის ჰესები), აგრეთვე დაგესტანში (შიატლის და ირგანაის ჰესები) და სხვ. [31 -36]. აღნიშნული შედეგები დანერგილი იყო აგრეთვე ყოფილ საბჭოთა კავშირში მოქმედ ნორმატიულ სამშენებლო მასალებში, მათ შორის “საკავშირო მშენებლობისა და ნორმების წესებში” (“სნიპ“-ებში) [13-15, 37, 38].

პირველი გაანგარიშება მწ თეორიის საფუძველზე რიცხვითი (სასრულ-სხვაობიანი) მეთოდის გამოყენებით იმ ტალღისა, რომელიც წარმოიქმნება წყალსაცავში მეწყერის დროს, ჩატარებული იყო პროფ. ე. ლიატხერისა და პროფ. ა. მილიტევეის მიერ ყოფილ საკავშირო “ჰიდროპროექტის” სამეცნიერო-კვლევით ცენტრში [39]. მათ მიერ შესწავლილი იყო, აგრეთვე სხვა ტალღური ამოცანებიც [40-43] სასრულ-სხვაობითი მეთოდის საფუძველზე.

მწ ტეორიის და რიცხვითი მეთოდების მეშვეობით მეწყერით გამოწვეულ ტალღებს იკვლევენ აგრეთვე პროფ. კ. მელაძე, ნ. ჯღამაძე, ს. შკოლნიკოვი, დ. სტეფანიშინი და მ. სლადკევიჩი [44-46] ვიგელი, კოუტიტასი, რონი და ბატლერი (აშშ-ში) [47-49] და სხვ.

ზემოთ ციტირებული ლიტერატურული მასალის ანალიზი საშუალებას გვაძლევს დავასკვნათ შემდეგი. ამა თუ იმ წყალსაცავში (წყალსაცავი, ტბა და სხვ.) ტალღების წარმოქმნა შეიძლება გამოწვეულ იქნას, როგორც ბუნებრივი (სტიქიური) მოვლენების (მიწისძვრა, მეწ-

ყერი, ღვარცოფი, წყალმოვარდნა და სხვ.), ასევე ხელოვნური (მაგალითად, აფეთქება) მიზეზით. ტალღების წარმოქმნის, გავრცელების, ფერდობებიდან (ამ კაშხლიდან) არეკვლისა და ინტერფერენციის პროცესები მკვეთრად გამოხატული არასტაციონალურობით განიხივებენ. ამ ტალღების შესწავლისადმი მიდგომები ამა თუ იმ (მატ ან მწ) თეორიის გამოყენების საფუძველზე, დამოკიდებულია პირველ რიგში, როგორც წყალსაცავის ფორმაზე და მის სიღრმეზე, ასევე გარე ზემოქმედების ინტენსივობაზე. ამასთან, აღნიშნული ტალღური პროცესები შეიძლება აღიწეროს:

ა) ერთგანზომილებიანი სითხის მოძრაობის მოდელით, მწ არაწრფივი თეორიის გამოყენებით;

ბ) ორგანზომილებიანი (ვერტიკალურ სიბრტყეში) მოძრაობის მოდელით, წრფივი მატ თეორიის გამოყენებით ან ორგანზომილებიანი (გეგმაში) მოძრაობის მოდელით, მწ თეორიის საშუალებით;

გ) სამგანზომილებიანი (სივრცითი) მოძრაობის მოდელით, მატ თეორიის საფუძველზე.

მატ თეორიის საფუძველზე ფორმულირებული ტალღური წრფივი სასაზღვრო ამოცანის ამოხსნისას, წყალსატევის ფორმის წარმოდგენა ჩვეულებრივ ხდება გამარტივებული (სქემატიზირებული) სახით (მაგალითად, სწორკუთხედით ან სწორკუთხა პარალელებიპედით – შესაბამისად ბრტყელი ან სივრცითი ამოცანის განხილვის დროს). ამ შემთხვევაში, აღნიშნული ტალღური ამოცანის ამოხსნა ბევრ შემთხვევაში შესაძლებელია ანალიზური მეთოდების გამოყენებით, რის შედეგად მიიღება ამონახსენი გარკვეული ანალიზური გამოსახულების (ფორმულის) სახით. თუმცა, ეს ამონახსენი საკმაოდ რთულია თავისი ფორმით და რიცხვითი მონაცემების მიღება ხორციელდება მხოლოდ კომპიუტერული პროგრამისა "Mathcad 14.0" დახმარებით.

მწ თეორიის საფუძველზე ფორმულირებული სასაზღვრო ამოცანა არის არაწრფივი: მისი ანალიზური ამოხსნა უმეტეს შემთხვევაში შეუძლებელია. ამიტომ, მისი ამოხსნის მიზნით გამოიყენება ესა თუ ის რიცხვითი (სასრულ-სხვაობითი ან სასრულ ელემენტების) მეთოდი, რომლის საშუალებით, მოცემული არაწრფივი კერძო-წარმოებულებიანი დიფერენციალური განტოლების ამოხსნა დაიყვანება ალგებრული

განტოლებების სისტემის ამოხსნამდე. აღნიშნული მიდგომა საშუალებას იძლევა ბევრ შემთხვევაში, გათვალისწინებული იყოს (გარკვეული შეზღუდვებით) წყალსატევის რეალური ფორმა (განივკვეთშიც და გეგმაშიც).

როგორც ანალიზური, ასევე რიცხვითი მეთოდების საფუძველზე მიღებულ ამონახსნებს გააჩნია თავისი დადებითი და უარყოფითი მხარეები. სახელდობრ, ანალიზური ამონახსენი ადვილად გამოსაყენებელია გათვლების ციკლის ჩატარებისას, რომლის შედეგად შესაძლებელია დადგენილ იქნას განსახილველი პროცესის ძირითადი კანონზომიერებანი; ის აგრეთვე აუცილებელია ტესტური ანალიზების დროს; ითვალისწინებს სიჩქარის ვერტიკალურ მდგენელის გავლენას ტალღის პარამეტრებზე და სხვ., მაგრამ ზუსტ შედეგებს იძლევა მხოლოდ სქემატიზირებული არეებისათვის. რაც შეეხება რიცხვით ამონახსნებს, მისი მიღება დაკავშირებულია რიგ მატემატიკურ პრობლემასთან (მდგრადობის, კრებადობის უზრუნველყოფა, დაგროვილ ცდომილებათა შეფასება და სხვ.); მისი გამოყენების არე შემოფარგლულია შედარებით მცირე სიღრმის წყალსატევებით, ამასთან ერთად, ის ითვალისწინებს განსახილველი მოვლენის რიგ მნიშვნელოვან ფაქტორს, როგორცაა წყალსატევის ფორმა, ტალღის არაწრფივობა, წინაღობის ძალები.

წყალსატევის ზედაპირზე გარე ძალების ზემოქმედების, კერძოდ კი მეწყერის შედეგად გენერირებული ტალღების არაწრფივობის ხარისხი განპირობებულია მეტწილად, მეწყერის გეომეტრიული და კინემატიკური პარამეტრების სიდიდით (მეწყერის მოცულობით და მისი სიჩქარით). სახელდობრ, რაც უფრო დიდია თავისი მნიშვნელობით ეს პარამეტრები, მით უფრო მკვეთრად გამოიხატება ტალღის არაწრფივობის ხასიათი. ტალღის არაწრფივ ეფექტის შესახებ მიახლოებითი შეფასებები შეიძლება გაკეთდეს ურსელის პარამეტრის R_u სიდიდეზე დაყრდნობით [6]. აღნიშნული პარამეტრი ტოლია

$$R_u = I_{\text{ფ}} \left(\frac{\lambda}{h} \right)^3$$

სადაც $I_{\text{ფ}} = \frac{\eta}{\lambda}$; λ - არის ტალღის სიგრძე.

ზემოთ აღნიშნული ორი ძირითადი ტალღური თეორიის გამოყენების არე პირველ მიახლოებაში, ასე შეიძლება განისაზღვროს:

გამოყენება

ა) მატ თეორია, როდესაც $R_u < 1$;

ბ) მატ და მწ თეორიები, როდესაც $1,0 < R_u < 500$;

გ) მწ თეორია, როდესაც $R_u \geq 500$.

ბევრი ავტორის მიერ, კერძოდ კი [50] ნაშრომში, აღინიშნება, რომ აუცილებელია ჩატარდეს სპეციალური გამოკვლევები აღნიშნული თეორიების გამოყენების უფრო ზუსტი საზღვრების დადგენის მიზნით, წყალსაცავებში მეწყერით წარმოქმნილი პროცესების შესწავლის დროს.

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, მატ თეორიის საფუძველზე მიღებული ამოცანების ამონახსნები შეიძლება გამოყენებული იყოს მხოლოდ რეგულარული (სწორი) ფორმის პრიზმატული კალაპოტებისათვის. საკითხი იმის შესახებ, თუ რამდენად მისაღებია ამ ამონახსნების გამოყენება პრაქტიკაში, რეალური სახის წყალსატევების (წყალსაცავების) შემთხვევაში, შეიძლება გადაჭრილი ყოფილიყო, მხოლოდ კომპლექსური კვლევების შედეგად, რომლებიც გულისხმობდნენ თეორიულ გაანგარიშებების (მატ და მწ თეორიების საფუძველზე) და მათი შედეგების შედარებას შესაბამის ექსპერიმენტალურ მონაცემებთან.

ექსპერიმენტები სწორი გეომეტრიული ფორმის ღარებში, ჩატარებული იყო (ძირითადად 70-იან წლებში) რ. ვიგელის და ე. ნოდას [10, 11], ა. ხუბერის [51], ვ. ბარონინის [52-55], თ. გველესიანისა და გ. ჯინჯინაშვილის [56], ს. იაზიკოვის [57] და სხვ. მიერ.

ა. ხუბერის მიერ ჩატარებული ექსპერიმენტების მიზანი იყო იმ ტალღური პროცესების ზოგიერთ კანონზომიერებათა დადგენა, რომლებიც აღიძვრება ტბებში დიდი მასის ქანების ჩამოქცევის შედეგად. გამოყენებული ექსპერიმენტალური სწორკუთხა ღარის ზომები იყო $30,4 \times 0,5 \times 0,5$ მ³. “მეწყერული” მასალის ჩაშვება ღარში წარმოებდა სპეციალური დამცავი სარქველის გაღების შედეგად. ეს მასალა შედგებოდა წვრილი ხრეშისაგან და მისი მოძრაობა, როგორც ავტორი [51] აღნიშნავს, უფრო ნაკადის მოძრაობას ჰგავდა, ვიდრე კომპაქტური კვლევანი ქანის, მყინვარის ან ზვავის მოძრაობას.

ექსპერიმენტებში იცვლებოდა “მეწყერული” მასის მოცულობა და ჩამონაქცევის სიჩქარე, განისაზღვრებოდა წარმოქმნილი ტალღის ფარდობითი სიდიდე $\frac{\eta}{h}$ და ტალღის ფარდობითი სიგრძე $\frac{\lambda}{h}$ ღარის სხვადასხვა წერტილში $\frac{x}{h}$ (ჩამონაქცევის ადგილიდან). კინოგადაღებების საშუალებით განისაზღვრებოდა ტალღის ფორმა, დახრილ ბორტზე მისი აგორების ხასიათი და სხვ.

1974-1975 წწ. ჰიდროტექნიკისა და მელიორაციის ყოფილ საკავშირო სამეცნიერო-კვლევით ინსტიტუტში ვ.ვ. ბარონინის მიერ ჩატარებული იყო ექსპერიმენტები ბრტყელი “მეწყერული” ტალღების შესწავლის მიზნით. ექსპერიმენტები ჩატარებული იყო ვიწრო ჰიდრაულიკურ ღარში, რომლის სიგრძე იყო 3 მ, ხოლო სიგანე აღწევდა 0,5 მ. ღარის ერთ ბოლოში (ბორტის კვეთში) ხდებოდა პარალელოგრამის ფორმის ყუთის წყალში ჩაშვება (ჩაძირვა), რომელიც ქვიშით იყო შევსებული. ეს “მეწყერული ტანი” წყალში იძირებოდა სხვადასხვა სიჩქარით, რაც მისი წონით იყო განპირობებული. ამ ტანის სისქე აიღებოდა $D_0 = 0,05; 0,101; 0,202; 0,404$ მ ტოლი. ამასთან, წყლის სიღრმე h ღარში აღწევდა 0,202 მ. ღარში აღძრული ბრტყელი ტალღების რეგისტრაცია წარმოებდა კინოფირზე. გარდა ამისა, წყლის მაქსიმალური რყევების ამპლიტუდების ფიქსაცია ხდებოდა ღარის სხვადასხვა კვეთში, ცარციანი სახაზავის მეშვეობით. ღარის მეორე ბოლოში განლაგებული ბორტის (კედლის) სიმაღლე იყო ისეთი, რომ მასზე უმეტესწილად, ხდებოდა წარმოქმნილი ტალღების გადადინება, რის შედეგად მათ არეკვლას ძირითადად, ადგილი არ ჰქონდა. აღნიშნული ექსპერიმენტების შედეგად დადგენილი იყო შემდეგი:

ა) ტალღის გავრცელების სიჩქარე “მეწყერული კერიდან” (ყუთის ჩამოგდების ადგილიდან) დამოკიდებულია “მეწყერის” მოცულობაზე;

ბ) კედლის (ზღუდის) თხემის სიგანე (რომელზედაც ტალღის გადადინება ხდებოდა) გავლენას ახდენდა ტალღის სიმაღლეზე, კერძოდ უფრო დიდი სიგანის შემთხვევაში, მასთან მისული ტალღის სიმაღლე უფრო დიდი იყო, ვიდრე უფრო მცირე სიგანის თხემის დროს;

გ) ტალღის ძალისმიერი ზეგავლენა ზღუდეზე იყო საკმაოდ მნიშვნელოვანი. კერძოდ, იმ შემთხვევაში, როდესაც $D_0 = 0,101$ მ (ე.ი. $\frac{D_0}{h} = 0,5$) ექსპერიმენტალური და პროფ. თ. გველესიანისა და სხვ. მიერ ჩატარებული თეორიული (მატ თეორიის საფუძველზე) გათვლების მონაცემები კარგად ემთხვევიან ერთმანეთს [56]; როდესაც $D_0 = 0,202$ მ, მწ თეორიის საფუძველზე მიღებული რიცხვითი მონაცემები უკეთესად ემთხვევიან ექსპერიმენტების შედეგებს, ვიდრე ანალიზურ ამონახსენის საშუალებით მიღებული გაანგარიშებათა მონაცემები, რაც მეტყველებდა იმაზე, რომ ამ დროს წარმოქმნილი ტალღები არაწრფივობით ხასიათდებოდნენ; როდესაც $D_0 = 0,404$ მ (ე.ი. $\frac{D_0}{h} = 4,0$) თეორიულ გაანგარიშებათა შედეგები საგრძნობლად განსხვავდებიან ექსპერიმენტალური მონაცემებისაგან, ვინაიდან წარმოქმნილი ტალღები ხასიათდებოდნენ მკვეთრად გამოსატული არაწრფივობით, გარდა ამისა, ამ დროს წყლის მოძრაობის სიჩქარის ვერტიკალური მდგენელის სიდიდე მნიშვნელოვანი იყო. აღვნიშნოთ, რომ ამ ფაქტორებს ერთობლივად ვერ ითვალისწინებს ვერც მატ და ვერც მწ თეორიის გამოყენებით მიღებული ამონახსენები.

რ. ვიგელისა და ე. ნოდას მიერ ჩატარებული იყო ექსპერიმენტები ბრტყელ ღარში (სიგრძე 32 მ, სიგანით 0,305 მ), როდესაც $h = 0,2 \pm 0,61$ მ, ხოლო $D_0 = 0,075 \pm 0,0305$ მ. ამ ექსპერიმენტების მონაცემების შედარება თეორიული გათვლების შედეგებთან [56] ადასტურებს ზემოთ აღნიშნულ დასკვნებს. კერძოდ იმას, რომ როდესაც $\frac{D_0}{h} < 0,7 \pm 1,0$ თეორიული გათვლები საკმარისად კარგად აღწერენ ტალღურ პროცესებს.

1975-1976 წ. საქართველოს ენერგეტიკის ინსტიტუტში პირველად იყო ჩატარებული ექსპერიმენტები განიერ (სიგანით 2 მ, სიგრძით 7,7 მ) "სამგანზომილებიანი" ღარის პირობებში [56, 71]. ამ შემთხვევაში, "მეწყურული ტანის" – ჩაშვება წყალში (რომლის სიღრმე იცვლებოდა $h = 0,08 \pm 0,005$ მ ფარგლებში) ხდებოდა არა ბორტის, არამედ გვერდითი კედლის ("ფერდობის") მხრიდან და ტალღები ვრცელდებოდნენ,

როგორც გასწვრივი, ისე განივი მიმართულებით ანუ ადგილი ჰქონდა სივრცითი ტალღების წარმოქმნას. ექსპერიმენტალური და თეორიული კვლევების ანალიზის შედეგად, პროფ. თ. გველესიანის მიერ დადგენილ იქნა შესაბამისი კრიტერიუმები [38, 56]. თეორიულ გაანგარიშებათა სიზუსტის ხარისხის და მათი გამოყენების არის დადგენის მიზნით.

ზოგ შემთხვევაში, საჭირო ხდებოდა მეწყერის შედეგად წარმოქმნილი ტალღური პროცესების შესწავლისათვის ძვირადღირებული ექსპერიმენტალური კვლევების ჩატარება სპეციალურად ამ მიზნებისათვის შექმნილ ფიზიკურ მოდელზე. ეს ექსპერიმენტები წარმოებდა რეალური წყალსაცავების მოდელებზე, რომლებიც უზრუნველყოფილი იყო სპეციალური მოწყობილობებით მეწყერის მოსალოდნელი კინემატიკური პროცესის იმიტირების მიზნით.

ლიტერატურიდან ცნობილია რამდენიმე ასეთი ექსპერიმენტი, რომელთა ჩატარების აუცილებლობა განპირობებული იყო არსებულ ან დასაგეგმარებელ წყალსაცავების სანაპირო ფერდობებზე კაშხლის მახლობლად, არამდგრადი პოტენციური მეწყერული კერების აქტივაციის მიზეზებით და ამის გამო შექმნილ საშიშ პირობებით. კერძოდ, ასეთი ექსპერიმენტები ჩატარებული იყო ლიბის წყალსაცავისათვის (აშშ, შტ. მონტანა) კაშხლის სიმაღლე შეადგენდა 127 მ, ხოლო სიგრძე თხემის გასწვრივ, კი - 750 მ; კაშხლის ახლოს (100-650 მ-ის დაშორებით) ოთხი პოტენციური მეწყერული კერა არსებობდა [56].

ავსტრიაში აგებული ჰეპაჩის წყალსაცავისათვის (მისი სიგრძეა დაახლოებით 400 მ, ხოლო კაშხლის სიმაღლეა 115 მ) მოდელური ექსპერიმენტის მეშვეობით იკლევდნენ 5 მლნ.ნ³ მოცულობის მეწყერის წყალში ჩამოხვავების შედეგად წარმოქმნილ ტალღას და მის ზემოქმედებას კაშხალზე. მეწყერი კაშხლიდან დაშორებული იყო დაახლოებით 1 კმ მანძილზე. ანალოგიური სახის ექსპერიმენტები ჩატარებულ იქნა ნორვეგიაში ორი ტბის ფიზიკურ მოდელებზე [56].

მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ ამ რეალურ წყალსატევებისათვის ჩატარებული ექსპერიმენტების შედეგები ბევრ შემთხვევაში, საკმარისი სიზუსტით იყო პროგნოზირებული თ. გველესიანის და სხვ. მიერ თეორიული გათვლების საშუალებით [56].

შეიძლება აღინიშნოს აგრეთვე ზოგიერთი სხვა მიდგომაც მეწყერით გამოწვეული ტალღების საკითხის თეორიული შესწავლისადმი. ასე მაგალითად, პროფ. თ. ვონინი-სიანოუენსკისა და ე. ავალიანის ნაშრომში [58] განიხილებოდა, მოძრაობის რაოდენობის შენახვის კანონის საფუძველზე, მეწყერული მასის წყალში შემოსვლით გამოწვეული ეფექტის საწყისი სტადია. კერძოდ, მიღებული იყო ანალიზური გამოსახულება, რომლის მეშვეობით შეიძლება შეფასდეს ტალღის მაქსიმალური ამპლიტუდა მეწყერის წყალსაცავში უშუალოდ შემოსვლის ადგილას (კვეთში). აღნიშნული ფორმულა არ იძლევა საშუალებას აღიწეროს ტალღის წყალსაცავში შემდგომი გავრცელების პროცესი.

პრაქტიკულად ანალოგიური მეთოდით წარმოებდა “მეწყერული ტალღის” მხოლოდ მაქსიმალური ამპლიტუდის (სიმაღლის) დადგენა პროფ. ა. მიშუევის და სხვ. ნაშრომებში [59, 60].

უნდა აღინიშნოს [61] ნაშრომიც, რომელიც ეხება სპეციფიკური ტიპის ტალღის ე.წ. ბორის თეორიულ და ექსპერიმენტალურ შესწავლას. აღნიშნული ტალღა ხასიათდება იმით, რომ ის თავის ფორმას პრაქტიკულად არ იცვლის გავრცელების პროცესში; აქვს ციკაბო ფრონტი, ხოლო მისი თხემი – ბრტყელი და გაშლილია. ასეთი ტიპის ტალღა შეიძლება წარმოიქმნას მაგალითად კაშხლის უეცარი გარღვევისას ან საირიგაციო ზოლში (ან კვალში) წყლის მიწოდების საწყის ეტაპზე და სხვ.

მთელ რიგ ნაშრომებში შესწავლის საგანს წარმოადგენდა ტალღის დახრილ სიბრტყეზე (ფერდობზე) მიგორვითი მოძრაობის პროცესი [62-67]; ამ პროცესის შესწავლა მოიცავს აგრეთვე ტალღის მსხვრევის ასპექტებსაც. ვინაიდან ჰიდროკვანძების ადგილობრივი მასალისაგან აგებულ კაშხლის სადაწნეო (ზედა) ფერდობის ქანობები ჩვეულებრივ ხასიათდება, როგორც $\Theta = ctg\beta \leq 5,0$ (სადაც β – კუთხეა ფერდოსა და ჰორიზონტს შორის), ამიტომ ექსპერიმენტალური მონაცემების თანახმად, გრძელი ტალღების კაშხლის ზედა სადაწნეო ფერდობზე მიგორვის პროცესი წარმოებს მათი მსხვრევის გარეშე. აღნიშნულ გრძელ ტალღებს შეიძლება მივაკუთვნოთ მეწყერით გამოწვეული ტალღები, რომლებიც შედარებით დიდი სიგრძით ხასიათდებიან, ამიტომ წინამდებარე ნაშრომში ტალღების მსხვრევის საკითხი არ

განიხილება. დაუმსხვრევადი მეწყერული ტალღების დახრილ ფერდობზე მოძრაობის საკითხს შეეხება, აგრეთვე, თ. გველესიანის, რ. დანელიას და სხვ. ნაშრომი [68]. ამ ნაშრომში განიხილება ბრტყელი სასაზღვრო ამოცანა, რომელიც შეეხება წყალსატევის ან წყალსადინარის (წყალსაცავი, არხი, მდინარის კალაპოტი) განივ კვეთში ტალღური რყევების საკითხს. ეს ტალღები შეიძლება გამოწვეული იყოს არასტაციონარული ნაკადის (ხარჯის) გვერდითი შენაკადიდან შემოდინებით ან წყალსატევში ერთ-ერთ ფერდობზე მეწყერის ჩამოზვავებით და სხვ.

განსახილველი ამოცანის ფორმულირება წარმოებს ცილინდრულ კოორდინატებში (R, Θ) , ვინაიდან წყალსაცავის ფორმა განივკვეთში სქემატიზირებულია სამკუთხედის ან ტრაპეციის სახით. წყალსაცავის ერთ-ერთ დახრილ ფერდოს მხრიდან (რომლის კუთხე ჰორიზონტთან შეადგენს β) ხდება წყლის შემოდინება განსაზღვრული t_0 დროის მონაკვეთში. ამასთან შემოდინებული წყლის მოცულობა შეადგენს $W = VSt_0$ (სადაც V – შემოდინების სიჩქარეა, S – ფერდობის იმ ნაწილის სიმაღლეა, რომელზეც ადგილი აქვს შემოდინებას). მათ თეორიაში მიღებული დაშვებების გათვალისწინებით, აღნიშნული ამოცანის ამოხსნა დაიყვანება ლაპლასის განტოლების ამოხსნამდე $\varphi(R, \Theta, t)$ – სიჩქარის პოტენციალის მიმართ, შესაბამისი საწყისი და სასაზღვრო პირობების დაცვით. ამასთან, პირობა თავისუფალ ზედაპირზე აიღება მიახლოებითი სახით.

მიღებულია დასმული ამოცანის ამონახსენი, რომლის საშუალებით გამოითვლება ჰიდროდინამიკური წნევები ფერდობებზე. წყლის სიჩქარეთა ეპიურები და წყლის რყევების ამპლიტუდები თავისუფალ ზედაპირზე $\eta(\Theta, t)$, ანალიზის შედეგად კეთდება დასკვნა, რომ მიღებული ამონახსენის სიზუსტე გარანტირებულია მხოლოდ საკმაოდ ციცაბო ფერდობების დროს ($\beta \geq 60^\circ$).

[69] ნაშრომში ჩატარებული ანალიზის შედეგად, ნაჩვენებია, რომ მიღებული ამონახსენის [68] სათანადოდ მოდიფიკაციის შემთხვევაში, მისი გამოყენების არეალი ფართოვდება, სახელდობრ გაანგარიშებათა შედეგები სწორი იქნება მაშინაც, როდესაც $\beta \geq 45^\circ$.

[68, 69] ნაშრომებში მოყვანილი გრაფიკული მასალა საშუალებას იძლევა დავასკვნათ რომ:

ა) ერთი და იგივე მოცულობის მეწყერის შემთხვევაში მოპირდაპირე ფერდობებზე ტალღის მიგორვის სიმაღლე მცირდება β კუთხის შემცირებასთან ერთად; რაც უფრო განიერია წყალსაცავი (მისი განივკვეთი), მით უფრო ნაკლებად მჟღავნდება ფერდობების დახრილობის ფაქტორი;

ბ) წყლის რყევათა ინტენსივობა სამკუთხედოვანი ფორმის წყალსაცავის განივკვეთში უფრო მაღალია, ვიდრე იმავე ფართობის სწორკუთხოვანი ფორმის განივკვეთში;

გ) სამკუთხოვანი და სწორკუთხა წყალსაცავებში მეწყერით გენერირებული ტალღების პერიოდები (ანუ მათი სიგრძეები) საგრძნობლად განსხვავდებიან ერთი-მეორისაგან, ისევე როგორც შესაბამისი ტალღური პროფილები.

ზემოთქმულიდან გამომდინარეობს ის დასკვნა, რომ კანიონის ტიპის, მათ შორის სამელიორაციო წყალსაცავებში, რომლებიც ხშირად ხასიათდებიან შედარებით მცირე სიგანით და ციცაბო ფერდობებით, მეწყერით წარმოქმნილი ტალღის მოპირდაპირე ფერდობზე აგორვის სიმაღლის განსაზღვრის მიზნით, მიზანშეწონილია ვისარგებლოთ [68, 69] ნაშრომებში მიღებული ამონახსენით, რომელიც ითვალისწინებს სანაპირო ფერდობების დახრილობას. გაანგარიშებათა შედეგები იმ ამონახსენის საფუძველზე, რომელიც მიღებულია სწორკუთხოვანი ფორმის განივკვეთისათვის (ან ფერდობების დახრილობის გაუთვალისწინებლად) უნდა იყოს სათანადოდ კორექტირებული, აღნიშნულ ნაშრომებში მიღებული შედეგების გათვალისწინებით.

თავი 2. წყალსაცავების სანაპირო ფერდობებზე მეწყერული პროცესების დახასიათება

2.1. მეწყერების ძირითადი ნიშნები და მათი კლასიფიკაცია

მეწყერები, რომლებიც მთის ფერდობზე წარმოიქმნებიან ხასიათდებიან სხვადასხვა ნიშნით, კერძოდ ისინი შედგებიან სხვადასხვა მასალისაგან, განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან მოძრაობის მექანიზმით, მათი მოძრაობის გამოწვევის მიზეზებით და სხვ. [70-73]. ამჟამად, არსებობს მეწყერის სხვადასხვა კლასიფიკაცია, ქვემოთ შევეხებით ამ კლასიფიკაციების ზოგიერთ მთავარ ასპექტს.

ერთ-ერთი მთავარი ნიშანი, რომლითაც შეიძლება გავარჩიოთ სხვადასხვა მეწყერი ესაა მათი შედგენილობის ხასიათი [70]. ზოგი მათგანი მთლიანად კლდოვანი მასალისაგან შედგება, სხვები კი – მხოლოდ ნიადაგური შრის მასალისაგან. არის აგრეთვე მეწყერები, რომელთა მასალა წარმოადგენს ქვის, თიხისა და ყინულის ერთობლიობას. აღნიშნული თვისების მიხედვით შეიძლება გავარჩიოთ მეწყერები, მათი შემადგენელი მასალის მდგომარეობის გათვალისწინებითაც [70, 72].

სახელდობრ, შეიძლება განვასხვავოთ მეწყერები, რომლებიც შედგებიან კლდოვანი მასალისაგან (გრანიტისაგან, გნეისისაგან, ქვიშაქვისაგან), მაგრამ თვით ეს მასალა შეიძლება იყოს მტკიცე ან ბზაროვანი (ნაპრალოვანი), ახალი ან გამოფიტული და ა.შ.

მეორეს მხრივ, თუ მეწყერული მასალა წარმოქმნილია ქვის ქანებისა და მინერალების ნატეხებისაგან, მაშინ შესაბამის მეწყერებს შეიძლება ეწოდოს ნიადაგური შრის მეწყერები. ისინი შედგებიან ძლიერ წვრილმარცვლოვანი მასალისაგან ე.ი. თიხისაგან ან შედარებით უფრო მსხვილმარცვლოვანი მასალისაგან, როგორცაა ქვიშა, ხრეში და სხვ. მთელი ეს მასალა შეიძლება იყოს მშრალი ან წყალნაჯერი, ერთგაგვაროვანი ან შრე-ფენოვანი.

აღნიშნული კლასიფიკაცია თავისთავად, არ არის საკმარისი, ვინაიდან მექანიზმი ქვიანი ან ნიადაგური მასის მოძრაობისა არ შეიძლება დახასიათდეს მხოლოდ მეწყერის მასალის აღწერით. დამატებითი კრიტერიუმის სახით, რომელიც განასხვავებს მეწყერის სხვადასხვა ტიპს, გვევლინება მეწყერის სიჩქარე.

მეწყერის ეს მახასიათებელი წარმოადგენს ფრიად მნიშვნელოვანს, თუ გავითვალისწინებთ მეწყერის ზემოქმედების ასპექტებს მოსახლეობაზე და მშენებლობის ობიექტებზე. ძალიან ძნელია მონახოს საიმედო დაცვის საშუალებები სწრაფად მოძრავი და დიდი მოცულობის მქონე მთის ქანების საწინააღმდეგოდ. მხედველობაში მისაღებია ის ფაქტორიც, რომ ეს მოვლენა მოულოდნელად ხდება. მართლაც, იმ დროს, როდესაც მეწყერი მოძრაობს ნელა (თვეების ან წლების განმავლობაში), ის იშვიათად თუ იწვევს უბედურ შემთხვევებს. ამ შემთხვევაში შეიძლება ადვილად მიღებული იყოს სათანადო წინასწარი პრევენტიული ზომები.

ამრიგად, მეწყერული მოვლენის განვითარების სიჩქარე განაპირობებს ამ პროცესის პროგნოზის შესაძლებლობას, მართლაც, მეწყერის ამოცნობა ხშირად უფრო ადვილია იმ ბზარებზე (ამ ნაპრალებზე) დაკვირვებების შედეგად, რომლებიც წარმოიქმნიან მიწის ზედაპირზე და მეწყერული მოვლენის უშუალო მაუწყებლობის როლს თამაშობენ [74, 75]. მაგრამ ხშირად, არამდგრად ფერდობებზე (მათ შორის წყალსაცავის ფერდობებზე), ეს პირველადი ბზარები (ნაპრალები), შეიძლება წარმოიქმნან ისე სწრაფად ან იმდენად მიუვალ ადგილებში, რომ მათი თვალთ შემჩნევა შეუძლებელია, რის შედეგად მთის ქანობის დიდი მასების ჩამონგრევას მოულოდნელი ხასიათი აქვს [70].

მეწყერის სიჩქარე დამოკიდებულია მისი წარმოქმნის მექანიზმზე, ასევე შემადგენელი მასალის თვისებებზე. კერძოდ, მთიან რეგიონებში მეწყერები შეიძლება წარმოიქმნან მიწისძვრების შედეგად. საკმაოდ ციცაბო რელიეფისას და ფერდობების არამდგრადობის შემთხვევაში, სეისმოგენური მეწყერები განსაკუთრებით ხშირი მოვლენაა. ასე მაგალითად, ცნობილი სან-ფერნანდოს მიწისძვრის დროს (კალიფორნია, 1971 წ.), აღნიშნული იყო ათასზე მეტი მეწყერი და ზვაავი [70, 76].

მეორე მიზეზი, რომელიც ხშირად განაპირობებს მთის ქანების ჩქარ გადანაცვლებას, ფერდობის ძირის გამორეცხვა მდინარის ნაკადით ან წყალსატევებში (ან ზღვაში) წარმოქმნილი ტალღებით [77-79].

ზოგ შემთხვევაში, ჩქარი მეწყერები (ან ზვაავები) გრძელდება რამდენიმე წამის ან წუთის განმავლობაში; საშუალო სიჩქარის მეწყერები ხდება დროის იმ მონაკვეთში, რომელიც წუთებით ან

საათებით განიზომება; ნელი მეწყერების ფორმირება და მოძრაობა ხორციელდება ჩვეულებრივ, რამდენიმე დღის, ხანდახან კი რამდენიმე წლის განმავლობაში. ზემოაღნიშნული კლასიფიკაციის შემთხვევაში, მხედველობაში უნდა იყოს მიღებული შემდეგი ფაქტორი: როდესაც მსხვილი მეწყერი ვითარდება წუთების ან საათების განმავლობაში, მაგრამ მისგან მიყენებული ზარალისაგან თავის აცილება, ძნელია, მაშინ ასეთი მეწყერი კლასიფიცირებისას, უნდა განეკუთვნებოდეს ჩქარი მეწყერების რიგს, მიუხედავად იმისა, რომ ამ მეწყერის სიჩქარე აბსოლუტური მნიშვნელობის, შედარებით მცირეა.

მეწყერის მნიშვნელოვან მახასიათებელს, რომელიც დაკავშირებულია მის სიჩქარესთან, წარმოადგენს ის მანძილი, რომელსაც მეწყერი გადის თავის სრულ გაჩერებამდე. სწორედ ამას ემყარება მეწყერის კლასიფიკაციის კიდევ ერთი საშუალება [70].

ბუნებაში მომხდარი მოვლენები მოწმობს იმას, თუ რამდენად განირჩევა მეწყერები თავისი გადაადგილების სიდიდის მიხედვით, რაც თავის მხრივ განპირობებულია უმთავრესად, როგორც მოვლენის მასშტაბით და ადგილის რელიეფით, ასევე მეწყერის მასალითა და მისი სიჩქარით [80, 81].

განსაკუთრებით დიდ მანძილზე გადაადგილებით ხასიათდებიან მეწყერები იმ შემთხვევაში, როდესაც მათი შემადგენელი მასალა წყლით არის გაჯერებული. მშრალ რაიონებში, ასეთი მეწყერების მიზეზი შეიძლება იყოს ძლიერი (კოკისპირული) წვიმები. ამ დროს ადგილი აქვს თხელ ნიადაგურ შრეში წყლის ინტენსიურ შეღწევას, რის შედეგად წარმოიქმნება სელური ნაკადები (ღვარცოფები), რომლებიც მაღალი მობილურობით განირჩევიან [39, 80-83].

წყალქვეშა კანიონების ამაღლებულ ნაწილებში დაგროვილმა (დალექილმა) მასალამ შეიძლება წარმოქმნას ე.წ. წყალქვეშა მეწყერები. ზოგ შემთხვევაში, ეს მეწყერები იმდენად სწრაფად მოძრაობენ, რომ თან წაიტაცებენ გარემომცველი წყლის გარკვეულ რაოდენობას, რის შედეგად მეწყერული მასის სიმკვრივე მცირდება. თუ ამ პროცესს გააჩნია გარკვეული ხანგრძლივობა, მაშინ მეწყერი ბოლოს და ბოლოს გარდაიქმნება სითხის ნაკადად, რომელსაც უფრო დიდი სიმკვრივე

გააჩნია, წყალთან შედარებით. ასეთი მღვრიე (ტურბიდიტური) ნაკადები წარმოადგენენ ნივთიერების გადატანის მნიშვნელოვან მექანიზმს [70].

გარკვეულწილად, ანალოგიური გათხევადების პროცესი შეიძლება განიცადოს, აგრეთვე, ნიადაგური ფენის მეწყერმა, იმ შემთხვევაში, თუ ის დიდი სიჩქარით შედის სანაპირო ფერდობიდან წყალსაცავში და ვრცელდება მის ფსკერზე წყალქვეშ [76].

ზოგ შემთხვევაში, ზედაპირული მეწყერების გადაადგილების მნიშვნელოვანი მასშტაბი, ანალოგიურად ზემოაღნიშნულისა, შეიძლება აიხსნას იმით, რომ ჩქარ მეწყერულ მასებს გააჩნიათ ჰაერისა და წყლის წატაცების უნარი. ამის შედეგად, მეწყერული პროცესი შეიძლება დახასიათდეს, როგორც ნაკადის მოძრაობა და არა როგორც მყარი მასალის გადაადგილება.

როდესაც წყალგაჯერებული მეწყერი წარმოქმნება ციცაბო მთის ფერდობზე, ან ხეობის დასაწყისში, სადაც მისი მოძრაობისას წარმოქმნილი წინაღობის ძალები მცირეა, მეწყერმა შეიძლება გაიაროს მნიშვნელოვანი მანძილი, რომელიც კილომეტრებით განისაზღვრება, იმ შემთხვევაშიც კი, თუ მისი მასა საკმაოდ რაოდენობის მყარ მასალას შეიცავს [70, 76].

როგორც წესი, მეწყერული მოვლენის შემთხვევაში, განარჩევენ იმ მეწყერულ მასას, რომელიც უშუალოდ მოძრაობს და მდგრად ქვენაფენას (ან სტაბილურ ქანების შრეს), რომელიც არ მონაწილეობს აღნიშნულ მოძრაობაში. მათ შორის განლაგებულია სრიალის (რღვევის) ზედაპირი. თუმცა, იმ შემთხვევაში, როდესაც მოძრაობა ატარებს ძლიერ ბლანტი სითხის დინების ხასიათს, მათ შორის მკვეთრი გარდამავალი შრის დადგენა ძნელი ხდება. მეწყერული მოძრაობის აღნიშნულ პირველ სახეს, სრიალით მოძრაობას უწოდებენ, ხოლო მეორეს – დინებას.

ქვემოთ, მოყვანილია მოკლე აღწერა მეწყერებისა, რომლებიც ძირითადად განიხივიან თავისი მოძრაობის სახით.

ა) მეწყერული ტანი ხასიათდება დიდი ზომებით (ფერდობის გასწვრივი და განივი მიმართულებით) მის სისქესთან შედარებით. ამ შემთხვევაში, გამყოფი ზედაპირი, რომელზედაც წარმოებს მეწყერის მოძრაობა, წარმოადგენს პრაქტიკულად, სწორ ზედაპირს. რაც შეეხება

თვით გადაადგილების ხასიათს – ესაა მეწყერული ტანის გადატანითი მოძრაობა (სრიალი) ფერდობის გასწვრივ თავისი ფორმის შეუცვლელად.

იმ შემთხვევაში, როდესაც სრიალის ზედაპირი წარმოადგენს შედარებით სწორ ზედაპირს, მაშინ მოძრაობაში მოდის მხოლოდ ერთი ბლოკი (კონსერვენტული მეწყერი) [70, 72-74].

სხვა შემთხვევებში, თუ სრიალის ზედაპირი არასწორია, მაშინ მოძრავი მეწყერული მასა იყოფა რამდენიმე ბლოკად. ჩვეულებრივ, მეწყერულ კერაში რღვევა იწყება ფერდობის ძირში, მაგალითად, გარეცხვის შედეგად: შესაბამისი ქვედა ბლოკი კარგავს მდგრადობას და გადაადგილდება გარკვეული მანძილით. ეს იწვევს სტაბილიზაციის პირობების დარღვევას ფერდობზე განლაგებული ზედა ბლოკების მიმართაც; კარგავენ რა საყრდენს, ეს ბლოკები თანმიმდევრობით გადაადგილდებიან ქვევით ფერდობის გასწვრივ. ამ პროცესს, რეგრესულ ეროზიას უწოდებენ. ის შეიძლება იყოს, როგორც ჩქარი, ასევე ნელი [70].

ბ) მეწყერი შედგება ერთგვაროვანი წვრილმარცვლოვანი გრუნტებისაგან. ამ შემთხვევაში სრიალის ზედაპირს, როგორც წესი აქვს მიახლოებით ცილინდრული ან სფერული ფორმა. ამის გამო, მეწყერული მასა ჩამონგრევის დროს განიცდის ბრუნვით მოძრაობას, რომელიმე ბრუნვის ცენტრის მიმართ [70, 72, 84].

გ) ნიადაგისა და ძირის (ფუძე) ქანებს გააჩნიათ ბზარებისა და ნაპრალების რთული სისტემა. ამ შემთხვევაში, მეწყერის დროს შეიძლება წარმოიქმნას სრიალის ზედაპირის სერია, ამასთან, სუბჰორიზონტალური ბზარები ენაცვლება იმ ბზარებს, რომლებსაც ციცაბო დაქანება აქვთ. ამ დროს მეწყერული მასის ნაწილი განიცდის თითქმის ჰორიზონტალური მიმართულების მოძრაობას, ხოლო მეორე ნაწილი ეშვება ქვევით, ციცაბო ნაპრალების წარმოქმნით [70].

დ) მეწყერული მასისა და ფერდობის მდგრად ქანებს შორის მკვეთრი გამყოფი ზედაპირი არ აღინიშნება. ამ შემთხვევაში, მეწყერის გადაადგილების სურათი ემსგავსება მეწყერული მასის დინებას, რომელსაც სითხის თვისებები გააჩნია. ამასთან, ამ ნაკადში აღინიშნება

სიჩქარეების თანდათან შემცირება მისი ზედაპირიდან სიღრმისაკენ [73, 74, 82, 85].

იმ შემთხვევაში, როდესაც აღნიშნული დინება ძლიერ მცირე სიჩქარეებით ხასიათდება, მაშინ ამ პროცესს ეწოდება ცოცვალობა (ან კრიპი). ამ პროცესს ხშირად, ადგილი აქვს სხვადასხვა ფერდობზე, თუმცა მისი გამოვლენა შესაძლებელია მხოლოდ სპეციალური ზუსტი გაზომვების შედეგად [71, 76].

ე) ციცაბო ფერდობზე განლაგებულია ნაპრალოვანი (ბზაროვანი) მყიფე ქანები. ამ შემთხვევაში, ჩამონგრევის პროცესი წარმოებს მასალის ვარდნის და არა სრიალის გზით. ხშირად, ეს ახასიათებს ძირეულ მთის ქანებს, ნიადაგური შრის ქანებისაგან განსხვავებით. ასეთ მოვლენას ზვავს ან ჩამოქცევას უწოდებენ [72, 73, 75].

ქვემოთ, ცხრილ 1-ში წარმოდგენილია მეწყერის კლასიფიკაციის გამარტივებული სქემა.

მეწყერების კლასიფიკაცია

ცხრილი 1

დასახელება	მოძრაობის სახე	მასალის დახასიათება (სიმტკიცე ძერაზე)	მასალის სახე	მოძრაობის დახასიათება სიჩქარის მიხედვით
ზვავი	ვარდნა	მყიფე	კლდოვანი ქანები; ყინული; გამყარებული (დაცემენტებული) ნიადაგები	ჩქარი
ბრტყელი ბლოკური მეწყერი; "ცილინდრული" მეწყერი; ფილის ფორმის ზვავი	სრიალი	არამდგრადი	კლდოვანი ქანები; ნიადაგები; თოვლი	ჩქარი; საშუალო სიჩქარით ნალი
ქვა-ქვიშოვანი ნაკადი; გრუნტის დინება; დვარცოფული ნაკადი; შვავი	დინება	მდგრადი	მთის ქანების ნატეხები; ქვიშა; ლამი; თიხა; თოვლი	ჩქარი; საშუალო სიჩქარით; ნელი

2.2. მეწყერული ქანების მექანიკის თავისებურებები და მეწყერების წარმოქმნის ძირითადი მიზეზები

მეწყერის წარმოქმნის პროცესს რიგი სპეციფიკური მექანიკური მიზეზი გააჩნია, რაც უნდა იყოს გათვალისწინებული ცალკეული მოვლენის შესწავლისას და შესაბამისი საგანგებო (ექსტრემალური) სიტუაციის პროგნოზირების დროს [75, 86]. ერთ-ერთ ასეთ მთავარ პირობას, ფერდობის არსებობა წარმოადგენს. მართლაც, იმისათვის რომ წარმოიქმნას მხები დაძაბულობა, რომელიც განაპირობებს მეწყერის მოძრაობას (სრიალს), აუცილებელია სიმძიმის ძალის მდგენელის არსებობა, რომელიც ფერდობის ზედაპირისადმი ტანგენციალურად იქნება მიმართული. მიწისძვრის დროს წარმოქმნილმა ჰორიზონტალურმა აჩქარებამ შეიძლება, აგრეთვე, გამოიწვიოს ზემოთაღნიშნული დაძაბულობა, რაც მეწყერის მოძრაობის დაწყებისათვის ერთგვარ ბიძგის როლს ასრულებს [71, 76].

მეწყერი წარმოიქმნება მაშინ, როდესაც ფერდობის გასწვრივ მიმართული სიმძიმის ძალის მდგენელი, რომელიც მოქმედებს ფხვიერი გრუნტის ან კლდოვანი ქანის გარკვეულ მასაზე, თავისი სიდით მეტი ხდება მეწყერული მასალის სიმტკიცეზე ან მის წინააღმდეგ ქანის ჩამოხეთქვის (ახლეჩის) მიმართ. მდგრადი მდგომარეობიდან მეწყერის გადასვლა სრიალით მოძრაობაზე განპირობებულია შემდეგი ორი ძირითადი მიზეზით:

- ძაბვის გაზრდით, რომელიც მოქმედებს ფერდობზე მდებარე მთის ქანებზე;
- ქანების წინააღმდეგ უნარის შემცირებით.

ამასთან, მექანიკის ძირითადი კანონის თანახმად, მეწყერის მოძრაობის გამომწვევე ძაბვის გაზრდა განპირობებულია:

- მეწყერული ტანის მასის გაზრდით, ან ($G = mg$ სიმძიმის ძალა);
- სიმძიმის ძალის ტანგენციალური მდგენელის გაზრდით (G_t).

ვინაიდან, სიმძიმის ძალა არ იცვლება, მისი ტანგენციალური მდგენელის გაზრდა განპირობებული იქნება ფერდობის დახრილობის (ქანობის) გაზრდით, რაც თავის მხრივ შეიძლება იყოს ეროზიის ან იმ ფაქტორის შედეგი, რომელსაც ფერდობის თხემზე დამატებით

რაოდენობის გრუნტის გაჩენა იწვევს (ბუნებრივი ან ხელოვნური მიზეზების გამო).

რაც შეეხება მეწყერული ქანის მასის გაზრდას, ის შეიძლება განპირობებული იყოს მის ზედაპირზე მონატეხი მასალის თანდათან დაღეკვის პროცესით. ამის გარდა, შეიძლება გაიზარდოს მეწყერული მასალის საიმპერივეც (ე.ი. მისი მასაც $m = \rho V$), წვიმის ან წყლის სხვადასხვა წყაროს ზემოქმედებისას, რაც გარკვეული მეწყერის შემადგენელი კომპონენტების გამორეცხვის შედეგი შეიძლება გახდეს.

მეორეს მხრივ, ფერდობის ჩამოქცევას შეიძლება ადგილი ჰქონდეს ტანგენციალური ძალის ცვლილების გარეშეც, მაგრამ ამ შემთხვევაში, ცვლილება უნდა განიცადოს მეწყერის ქვესაგები მასალის მახასიათებელმა. შეიძლება ითქვას, რომ მასალა რომელიც წარმოქმნის ფერდობს, მდგრად მდგომარეობაში იმყოფება იმის გამო, რომ მის ქვესაგებ ფენას გააჩნია გარკვეული წინაღობა ჩამოხეთქვის (ახლეჩვის) მიმართ. ამ წინაღობის სიდიდეზე შეიძლება გავლენა იქონიოს ისეთმა ფაქტორებმა, როგორცაა ნიადაგის გამოფიტვა, ქიმიური პროცესები, ფიზიკური პირობების ცვლილება (მაგალითად, წნევის გაზრდა მთის ქანების ნაპრალებსა და სიცარიელებში ან ნიადაგური შრის ფორისებრ მასალაში) და სხვ. უნდა აღინიშნოს, აგრეთვე, ისიც რომ წინაღობის სიდიდე ძვრაზე ზოგიერთი გრუნტისათვის, შეიძლება შემცირდეს გამოწვეული რხევითი ზემოქმედების შედეგად. ამგვარად, ასეთი გრუნტებისათვის დამახასიათებელია ის რომ, მათი დინამიკური სიმტკიცე ძვრაზე უფრო დაბალია ვიდრე სტატიკური [70].

აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ კაშხლის მშენებლობის შედეგად შეტბორილი წყალი ასველებს სანაპირო ფერდობებს. ამ დროს, ფერდოს ქვედა ნაწილი განიცდის წყლით გაჯერების პროცესს, რაც განაპირობებს მასალის სიმტკიცის შემცირებას [70, 87]. ასეთივე ეფექტს იწვევს ფერდოს ფუძის გარეცხვა წყალსაცავში წარმოქმნილი ტალღების ეროზიული ზემოქმედების წყალობით [77-79]. ხანდახან, საკმარისია ფერდობიდან მოცილებული იყოს უმნიშვნელო რაოდენობის მასალა, რომ ამან გამოიწვიოს ფერდობის დიდი უბნების არამდგრადობა. წყალსაცავის არსებობის ფაქტორი მოქმედებს, აგრეთვე, რაიონის ჰიდროლოგიურ რეჟიმზე (ნალექების რაოდენობაზე, წყლის

ჩამონადენზე და სხვ.), რაც თავის მხრივ არახელსაყრელ პირობებს ქმნის ფერდობების მდგრადობის დარღვევის თვალსაზრისით [88].

ქვემოთ, მოკლედ შევეხებით საკითხებს, რომლებიც დაკავშირებულია ფხვიერი და კლდოვანი ქანების სიმტკიცესთან ძვრის მიმართ. როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, ნიადაგური შრის ქანები ხასიათდებიან გარკვეული თავისუფალი სივრცეების არსებობით, რომლებსაც ფორები ან სიცარიელები ეწოდებათ. რაც შეეხება კლდოვან ქანებს, მათ თავისუფალ სივრცეს ბზარები (ან ნაპრალები) შეადგენს [89].

აღნიშნული ფორები და ბზარები შეესებულება გაზით (ჰაერით) ან სითხით (ჩვეულებრივი წყლით) ან შეიცავენ ერთად აღებულ ორივე ამ კომპონენტს. ამის გამო, ფორები და ბზარები იმყოფებიან ჰიდროსტატიკური წნევის ქვეშ. ამ წნევას ფოროვან (ფლუიდალურ) წნევას (P_w) უწოდებენ [70].

თუ ფხვიერი ან კლდოვანი (ბზარებიანი) გრუნტის ნიმუში მოთავსებული იქნება რეზინის გარსში, რომელიც გარე წნევის ზემოქმედების ქვეშ არის და ეს წნევა იცვლება, მაშინ შეიძლება დადგინდეს იყოს იმ ცვლილების გავლენის ხარისხი ფოროვან წნევაზე გრუნტში [70]. ამასთან დაკავშირებით, საინტერესოა განხილულ იქნას შემდეგი სამი შემთხვევა:

1. ფორები ან ბზარები ქანის ნიმუშში შეიცავენ გაზს (ჰაერს), რომელიც კარგი კუმშვადობით ხასიათდება

ამ შემთხვევაში, გარე წნევის ზემოქმედებისას, ადგილი აქვს ქანის მოცულობის ცვლილებას. ეს განპირობებულია იმით, რომ კუმშვადობის უნარი გაზისა და ქანის მკვრივ ნაწილს (კარკასის ან ტექსტურას) შორის, მნიშვნელოვნად განსხვავდება ერთმანეთისაგან. გარე წნევის გაზრდა იწვევს იმას, რომ ფორების მოცულობა მცირდება, ხოლო ქანის მარცვლები უახლოვდებიან ერთმანეთს, რაც განაპირობებს ქანის სიმტკიცის ზრდას. პირობით ეს შემდეგნაირად შეიძლება იყოს წარმოდგენილი

$$F + G = V$$

$$\Delta N \rightarrow \Delta V = F + \Delta G$$

$$P_F \approx \text{const}$$

სადაც V – ქანის საერთო მოცულობა;

G – გაზის (ჰაერის) მოცულობაა ფორებში ან ბზარებში;

F – არის ქანის მყიფე შემადგენლის (კარკასის) მოცულობა;

ΔN – ახასიათებს გარე მოქმედი ძალის გაზრდას;

ΔV – ქანის მოცულობის ცვლილებაა ძალის მოქმედების შედეგად;

P_F – არის წნევა, რომელსაც განიცდის ქანის კარკასი, ΔN წნევის ზემოქმედებისას (განხილულ შემთხვევაში P_F , პრაქტიკულად არ იცვლება);

ΔG – გაზის მოცულობის ცვლილებაა (ΔN წნევის ზემოქმედებისას).

2. ფორები ან ბზარები ნიადაგური ქანის ნიმუშში, გაჯერებულია წყლით.

ამ შემთხვევაში, გარე წნევის ცვლილება იწვევს ფორებში წყლის წნევის ცვლილებას. ამ ცვლილების ხარისხი დამოკიდებულია, თავის მხრივ, ნიადაგის მყარი და თხევადი შემადგენლების (კომპონენტების) ფარდობით კუმშვადობის უნარზე.

ა) ნიადაგური ქანის შემთხვევაში, ვინაიდან წყალი უფრო ნაკლებად კუმშვადია, ნიადაგის მყარ მასალასთან შედარებით, ამიტომ გარედან მოდებული ჰიდროსტატიკური წნევის ზემოქმედების შედეგად, მოხდება ფოროვანი წნევის (P_w) გაზრდა. ვინაიდან, წყალი მცირე კუმშვადობით ხასიათდება, ამ დროს ნიადაგის ნიმუშის მოცულობა შეიცვლება მცირე სიდიდით. ამგვარად, აღნიშნულ შემთხვევაში, გარე წნევის მომატება არ ახდენს გავლენას ქანის სიმტკიცის გაზრდაზე. ზემოაღნიშნული, შეიძლება გამოისახოს შემდეგნაირად:

$$F + W = V$$

$$\Delta N \rightarrow \Delta P_w ; V \approx \text{const}$$

სადაც W – წყლის მოცულობაა ქანის ფორებში;

ΔP_w – ფოროვანი (წყლის) წნევის გაზრდაა, ΔN წნევის ზემოქმედებისას.

ბ) კლდოვანი ქანის შემთხვევაში, როდესაც ბზარების შედარებით მცირე მოცულობაა შევსებული წყლით, მყარი და თხიერი შემადგენლების კუმშვადობა თითქმის ერთნაირია.

ამიტომ, გარე ჰიდროსტატიკური წნევის გაზრდა იწვევს, როგორც ქანის მყარი შემადგენელი მასალის (კარკასის) წნევის (P_F), ასევე სითხის ფოროვანი წნევის (P_w) გაზრდას. ამასთან, ქანის სიმტკიცის გაზრდა განპირობებულია მხოლოდ ქანის მყარი შემადგენლის ძაბვის (წნევის) გაზრდით.

ზემოაღნიშნული ასე ჩაიწერება

$$F + W = V$$

$$\Delta N = \Delta P_w + \Delta P_F ; V \approx \text{const}$$

სადაც ΔP_F არის ქანის მყარ შემადგენლებზე (კარკასზე) მოსული წნევის გაზრდა, გარე ΔN წნევის ზემოქმედებისას.

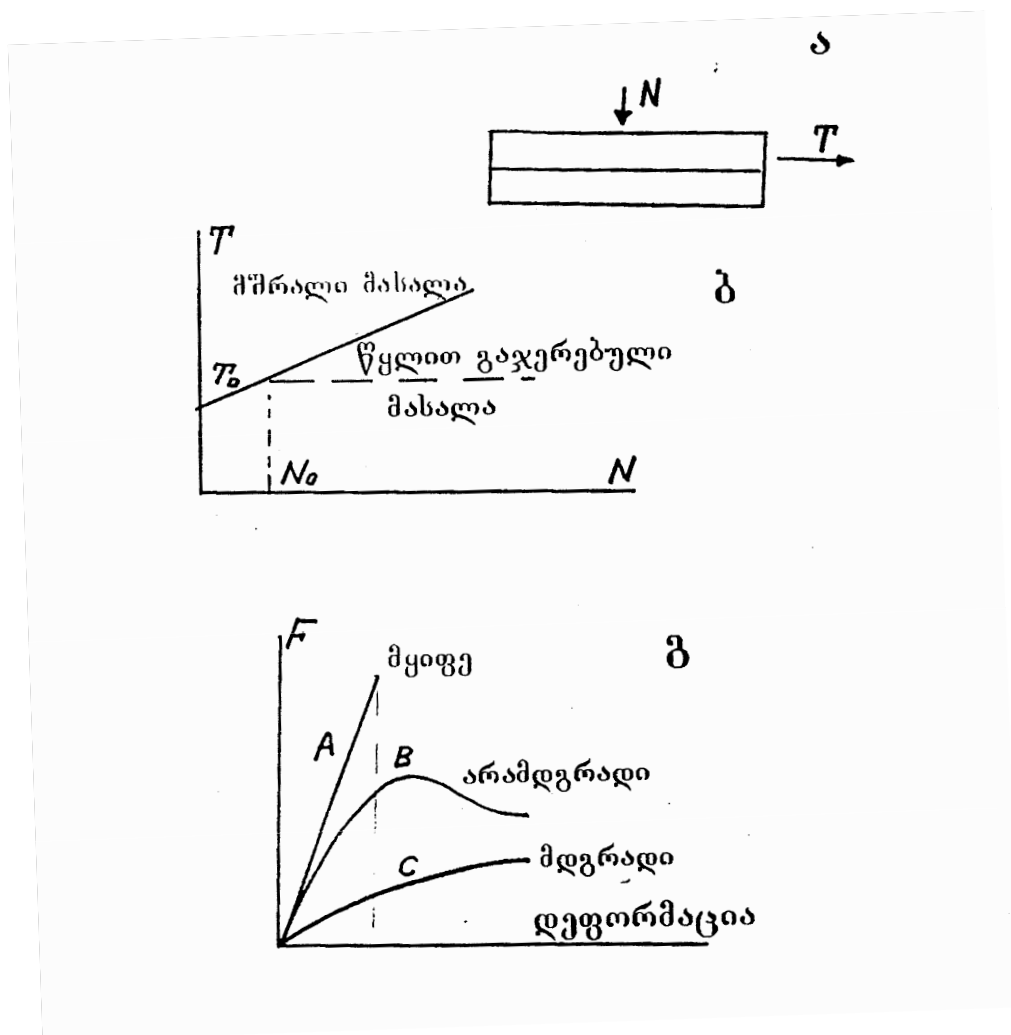
ამგვარად, ქანის სიმტკიცის ცვლილება დამოკიდებულია იმ ძაბვის სიდიდეზე, რომელიც მოდებულია მის მყარ შემადგენელზე (ანუ ძაბვის იმ წილზე, რომელიც მოდის მყარ შემადგენელზე). ამ ძაბვას (ან წნევას) ეფექტური ძაბვა ეწოდება.

ამ დასკვნებს ადასტურებს სპეციალური ცდები, რომლებიც მოკლედ, ქვემოთ არის აღწერილი. ნიადაგის ან ქვის ქანის ნიმუშს ათავსებენ ყუთში, რომელიც შუაში ორად არის გაყოფილი და სწორედ ამ ჰორიზონტალურ ზედაპირზე ხდება გრუნტის მასალის (ზედა და ქვედა ნაწილების) კონტაქტი; ყუთზე მოქმედებს ნორმალური დატვირთვა N . ყუთს გვერდიდან მოდებული აქვს მხები ძალა T და მიმართულია ჰორიზონტალური მიმართულებით (ნახ.2, ა).

მხები ძალა თანდათანობით იზრდება კრიტიკულ მნიშვნელობამდე, როდესაც ქანის ნიმუშში (საკონტაქტო ზედაპირზე) იწყება რღვევა. ამ დროს ყუთის ზედა და ნაწილები იწყებენ სრიალს (ერთმანეთის მიმართ), თუმცა T ძალის გაზრდას ადგილი აღარ აქვს.

ა) აღნიშნული ცდების შედეგები აჩვენებენ, რომ მშრალი (გაუწყლოებული) ნიადაგური ან კლდოვანი ქანის შემთხვევაში, ნორმალური დატვირთვის ყოველ მნიშვნელობას შეესაბამება გარკვეული მხები ძალა T , რომელიც იწვევს ნიმუშის რღვევას. ამ დროს, მთელი N დატვირთვა მოდის იმაზე, რომ ქანის მყარი ნაწილის დაწნეხვა მოახდინოს, ხოლო მხები ძალა, რომელიც საჭიროა რღვევისათვის, დატვირთვის პროპორციული ხდება $T = Ntg\phi = NK$

(სადაც φ - არის მასალის ხახუნის კუთხე, $K = \operatorname{tg} \varphi$ - ხახუნის კოეფიციენტი). ამის საფუძველზე, თუ ქანის რღვევის მომენტისათვის N_0 დატვირთვას შეესაბამება ტანგენციალური დატვირთვა T_0 , გვექნება რომ $T_0 = N_0 \operatorname{tg} \varphi$ (ნახ.2, ბ). თუ გავითვალისწინებთ ზემოაღნიშნულს, შეიძლება დავასკვნათ, რომ მშრალი ქანის შემთხვევაში, დატვირთვა იწვევს მასალის სიმტკიცის გაზრდას და სწორედ ეს დატვირთვაა აუცილებელი ეფექტური ძაბვის წარმოქმნისათვის.



ნახ.2. ა. ექსპერიმენტალური დანადგარის სქემა ნორმალური დატვირთვისა და T ტანგენციალური ძაბვას შორის დამოკიდებულების განსაზღვრისათვის;

ბ. $T=f(N)$ დამოკიდებულების გრაფიკები;

გ. დატვირთვასა და დეფორმაციას შორის დამოკიდებულების ამსახველი გრაფიკები ქანის სხვადასხვა მასალის შემთხვევაში

ბ) განსხვავებით ამისა, წყლით გაჯერებული ქანის შემთხვევაში, მხები ძალა T , რომელიც იწვევს ქანის რღვევას, აღარ არის გარედან მოდებული N ძალის პროპორციული. ამ დროს ის მხოლოდ ეფექტური ძაბვის პროპორციულია. ეს ნიშნავს იმას, რომ თუ N_0 დატვირთვა შეესაბამება P_F ეფექტურ ძაბვას, დატვირთვის შემდგომი მატება $N_0 + \Delta N$, აღარ გამოიწვევს გრუნტში ეფექტური ძაბვის (და შესაბამისად მასალის სიმტკიცის) ზრდას. მართლაც, თუ ნიმუშის გამოცდისას, მასზე მოქმედებს $N_0 + \Delta N$ დატვირთვა, ნიმუშის რღვევას ადგილი ექნება არა $T_0 + \Delta T$ მხები ძაბვის დროს, არამედ ისევ T_0 -ის დროს, ე.ი. დატვირთვის გაზრდისას ($N_0 > \Delta N$), რღვევის მხები ძაბვა არ იცვლება ანუ $T_0 = \text{const}$ (ნახ.2, ბ), რაც შეეხება დამატებით ΔN დატვირთვას, ის ფოროვანი წნევის (P_w) გაზრდაზე მოდის.

როგორც ზემოაღნიშნულიდან ჩანს, ნიადაგის ან ფორისებური ქანების დეფორმაციული და სიმტკიცის მახასიათებლები, დამოკიდებულია მხოლოდ, ეფექტურ დაძაბულობაზე. ამას დიდი მნიშვნელობა აქვს გრუნტებისა და კლდოვანი ქანების გამოყენებითი მექანიკის საკითხების კვლევისას.

რეალურ პირობებში, ქანებზე მოქმედი N დატვირთვა უმთავრესად სიმძიმის ძალის სახით გვევლინება, ამიტომ ეს დატვირთვა დროის განმავლობაში უცვლელი რჩება. ამავე დროს, არსებულმა ფოროვანმა წნევამ (P_w) ქანებში შეიძლება ესა თუ ის ცვლილება განიცადოს. ამ შემთხვევაში, შესაბამისად შეიცვლება ეფექტური ძაბვაც (P_F) გრუნტის მასებში, ვინაიდან $N - P_w = P_F$. ეს თავის მხრივ გავლენას მოახდენს ქანის სიმტკიცისა და მისი დეფორმაციული ხარისხის ცვლილებაზე.

მხედველობაში მისაღებია ის გარემოება, რომ ფოროვანი წნევის (P_w) ცვლილების შემჩნევა ვიზუალურად ძნელია, განსხვავებით სრული დატვირთვისაგან. მართლაც, გრუნტის შიგნით შეიძლება ხდებოდეს ამ წნევების ცვლილება, თუმცა ეს გრუნტის გარე სახეზე სრულებით არ ახდენს რაიმე გავლენას. ამიტომ, აღნიშნული ცვლილებები შეიძლება გამოვლენილი იყოს მხოლოდ გულდასმით შესწავლისა და გაზომვების შედეგად [70].

ამგვარად, ფოროვანი წნევისა და მასზე დამოკიდებული ეფექტური ძაბვების ცვლილება შეიძლება გახდეს ფერდობებზე განლაგებული ბეგრი მეწყერის წარმოქმნის ძირითადი მიზეზი.

გრუნტის მასალის კიდევ ერთ მნიშვნელოვან მახასიათებელს წარმოადგენს მისი რეაქცია გარე ზემოქმედებაზე: “ძაბვა-დეფორმაცია” ან “ძალა-გადაადგილება”. ამასთან, გასარჩევია ამ რეაქციის სამი ეტაპი; შესაბამისად ეს ეტაპები შეესაბამებიან დროის ინტერვალს მასალის რღვევამდე, რღვევის პროცესს და მის შემდგომ პერიოდს.

ექსპერიმენტების მონაცემები მოწმობენ იმას, რომ დატვირთვასა და გადაადგილებას შორის დამოკიდებულების გამოვლენა სხვადასხვა სახით ხდება ქანის მასალის მიხედვით. შესაბამისად, შეიძლება განხილული იყოს შემდეგი სამი შემთხვევა:

ა) კლდოვანი ქანი: მოქმედი გარე დატვირთვა შედარებით მცირეა (რაც შეესაბამება მიწის ზედაპირთან არსებულ პირობებს).

ამ შემთხვევაში, დეფორმაცია ქანში თანდათან იზრდება დაახლოებით დატვირთვის პროპორციულად, მანამ ეს დატვირთვა არ აღწევს გარკვეულ მაქსიმალურ სიდიდეს. ამ დროს ხდება ქანის ნიშნის გახლეჩა ან უეცარი რღვევა (A-მრუდი, ნახ.2, გ). ამ შემთხვევაში, ქანის მასალა ხასიათდება, როგორც მყიფე.

ბ) მკვრივი ქვიშა, ხრეში, თიხა (რომელმაც ადრე განიცადა მნიშვნელოვანი ეფექტური დატვირთვა).

ამ შემთხვევაში, გადაადგილება (დეფორმაცია) ქანში თანდათან იზრდება დაახლოებით დატვირთვის პროპორციულად და აღწევს გარკვეულ მაქსიმალურ მნიშვნელობას, რომელიც უფრო მცირეა შესაბამის სიდიდესთან (ა შემთხვევასთან) შედარებით. ამის შემდეგ დატვირთვის სიდიდე მცირდება და აღწევს გარკვეულ მუდმივ ზღვარს, რომლის დროს ხდება ქანის მასალის ყველაზე უფრო ინტენსიური დეფორმაცია (იხ. B-მრუდი, ნახ. 2, გ).

გ) ფხვიერი ქვიშა, ხრეში, თიხა (რომელმაც უკვე მხოლოდ ზომიერი ეფექტური დატვირთვა განიცადა).

ამ შემთხვევაში, დეფორმაცია ქანში იზრდება დატვირთვის მატებასთან ერთად, დატვირთვის ცვლილების მრუდს (C-მრუდი, ნახ.2,გ) არ გააჩნია მკვეთრად გამოხატული მაქსიმუმი (ბ. შემთხვევისგან

განსხვავებით). აღნიშნული მრუდი თანდათან უახლოვდება იმ ზღვარს, როდესაც ადგილი აქვს მკვეთრ დეფორმაციას, დატვირთვის გაზრდის გარეშე (ნახ.2,გ).

მექანიკის ტერმინების შესაბამისად A და B მრუდები შეესაბამებიან მასალის არამდგრად თვისებას, ხოლო C-მრუდი – მდგრად თვისებას.

მართლაც, ამ შემთხვევაში, როდესაც მთის ფერდობზე განლაგებულია მეწყერული მასა, რომელიც შედგება ფხვიერი ქვიშისაგან ან რბილი (ზომიერი სიხისტის) თიხისაგან, ამ მასის სრიალით მოძრაობა ვითარდება თანდათან, მასზე დატვირთვის ზრდასთან ერთად (C-მრუდი, ნახ.2, გ). ამ შემთხვევაში, დეფორმაცია არ ამცირებს მასალის სიმტკიცეს ძვრის მიმართ. ვინაიდან მეწყერის მოძრაობისას, მოქმედი ძალის სიდიდე მცირდება. ამიტომ, ამ დროს, ძაბვასა და დეფორმაციას შორის გარკვეულ თანაფარდობისას და მეწყერის გეომეტრიული ფორმის ცვლილების შედეგად (მას შემდეგ, რაც ის მოძრაობას იწყებს), შეიძლება მოხდეს მეწყერის ფერდობზე გაჩერება. ამგვარად, აღნიშნული პროცესი მდგრადია, ვინაიდან, დატვირთვის უმნიშვნელო ცვლილება იწვევს შესაბამის მცირე გადაადგილებას.

როდესაც მეწყერი შედგება მასალისაგან, რომლის არამდგრად თვისებებს ახასიათებს B-მრუდი (ნახ.2, გ), დატვირთვის ზრდის შედეგად მასალის სიმტკიცე ძვრაზე მცირდება. ამასთან, მასალის სიმტკიცე შეიძლება შემცირდეს უფრო ჩქარა ვიდრე მოქმედი დატვირთვა. ამის შედეგად მეწყერული მასის სრიალის პროცესი ვითარდება პროგრესულად; მეწყერი იძენს სიჩქარეს, რომელიც აძლევს მას საშუალებას გადალახოს მნიშვნელოვანი მანძილი.

მესამე შემთხვევაში (A მრუდი, ნახ. 2,გ), გარკვეული (მაქსიმალური) დატვირთვის დროს, მეწყერული მასა გახლეჩას (რღვევას) განიცდის, რის შედეგად ის გამოიყოფა გარემომცველი ქანებისაგან და იწყებს ფერდობზე სრიალით ან დაგორებით მოძრაობას. აღნიშნული ტიპის მეწყერებსა და ზვავებს ახასიათებთ ჩქარი წარმოქმნისა და ხელშემწყობის რელიეფის პირობებში, დიდი მანძილების გავლის თვისება. აღნიშნული პროცესი არამდგრადობით ხასიათდება.

2.3. მეწყერული მოვლენები წყალსაცავებისა და მდინარეების ხეობების ფერდობებზე

ქვემოთ მოყვანილია მოკლე ცნობები რამდენიმე ტიპური მეწყერის შესახებ, რომლებსაც ადგილი ჰქონდათ ხეობების ან წყალსატევების (ტბების, წყალსაცავების) ფერდობებზე. ამ მეწყერული მოვლენების თავისებურება მდგომარეობდა იმაში, რომ ისინი ჩამოზვავების შედეგად მდინარის ხეობებში ან წყალსატევებში, შესაბამისად ბუნებრივი კაშხლებისა და წყლის საგუბრების (ანუ ახალი ტბების) და მაღალი დონის დამანგრეველი წყლის ტალღების წარმოქმნის მიზეზები ხდებოდნენ. ქვემოთ, აღწერილია აგრეთვე, იმ მეწყერის შემთხვევა, რომელიც განვითარდა მიწის კაშხლის ზედა (დაწვევით) ფერდობე-ყველა აღნიშნულ მოვლენას თან ახლდა კატასტროფული შედეგები, რაც განპირობებული იყო, როგორც მეწყერის უშუალო, ასევე არაპირდაპირი ზემოქმედებით. მეწყერების აღნიშნული კონკრეტული შემთხვევების განხილვა საინტერესოა იმ მხრივ, რომ მოცემული ნაშრომის თეორიული კვლევის საკითხები დაკავშირებულია ბუნებაში მომხდარ ამ მოვლენებთან.

1. 1911 წ. პამირის მთებში დაბა უსოის მახლობლად, მიწისძვრის შედეგად წარმოიქმნა უზარმაზარი მეწყერი (მოცულობით 2,5 მლრდ.მ³) [70, 76]. მეწყერი შედგებოდა თიხისა და დამსხვრეული კლდოვანი ქანისაგან. მეწყერმა მთლიანად მოსპო აღნიშნული დაბა თავისი 54 მცხოვრებით და გადაფარა მდ. მურგაბი, რის შედეგად წარმოიქმნა დიდი ტბა. ამ ტბაში წყლის დონე თანდათან მატულობდა, რამაც მალე გამოიწვია მეორე დაბა სარეზის მთლიანი დატბორვა. ახალი სარეზის ტბის ფორმირება დასრულდა მას შემდეგ, რაც წყალმა მეწყერულ მასაში გაჭრა ახალი კალაპოტი და ტბაში შემონადენი წყალი გაუთანაბრდა მდინარის ჩამონადენს. მეწყერით წარმოქმნილი კაშხლის (დამბის) სიმაღლემ შეადგინა 301 მ, ხოლო მაქსიმალურმა სიღრმემ ტბაში კი, – 284 მ. რაც შეეხება ტბის სიგრძეს, მან მიაღწია 53 კმ-ის. შედარებისათვის, შეიძლება აღინიშნოს, რომ ხელოვნურად შექმნილი ნურეკის მიწის კაშხლის სიმაღლე (უზბეკეთში) შეადგენს 310 მ, ხოლო ამ კაშხლის მოცულობა აღწევს 58 მლნ.მ³.

აღნიშნულ მეწყერს ადგილი ჰქონდა მყიფე ძირეულ ქანებში, რომლებიც განლაგებული იყვნენ მთის ფერდობზე არამდგრად მდგომარეობაში. სწორედ სეისმური რხევები გახდა ის მიზეზი, რომელმაც გამოიწვია მეწყერული მასების მოძრაობა. ვინაიდან, მეწყერი წარმოიქმნა კლდოვან ქანებში, ნაკლებ საგარაუდოა, რომ ამ პროცესზე ფოროვან წნევის გავლენას ჰქონდა რაიმე მნიშვნელობა. მიწისძვრის სიმძლავრე შეფასებული იყო მაგნიტუდით $M = 7,6$ (რიხტერის შკალით), რაც მიაკუთვნებს მას ძალიან ძლიერი მიწისძვრების რიგს.

2. პამირის მეწყერის მსგავსი მოვლენები თან სდევდა ბევრ სხვა მიწისძვრას, თუმცა ისინი ასეთი დიდი მასშტაბით არ ხასიათდებოდნენ. ასე მაგალითად, 1959 წ. აგვისტოში, შტ. მონტანაში (აშშ) მომხდარი მიწისძვრა აღწევდა მაგნიტუდას 7,1 [70, 91]. ამ დროს წარმოქმნილმა მეწყერმა (მოცულობით 27 მლნ.მ³) გადახურა მდინარის ვიწრო ხეობის (კანიონის) ფერდობები საკმაოდ ციცაბო იყო, ხოლო მეწყერის მასა ძირითადად, ძლიერ ბზაროვან მასალისგან შედგებოდა. მეწყერმა დაანგრია ტურისტული ბანაკი, რასაც 47 ადამიანი შეეწირა. მეწყერის მასის მდინარეში ჩამონგრევის შედეგად შეიქმნა ბუნებრივი კაშხალი, ხოლო წარმოქმნილ საგუბარში წყლის დონემ დაიწყო სწრაფი მატება. აღნიშნული მეწყერული კაშხლის წყლის მიერ გარღვევის შემთხვევაში წარმოქმნილი დამანგრეველი ტალღა შეუქმნიდა საშიშროებას, როგორც მოსახლეობას, ასევე შენობა-ნაგებობებს, განლაგებულს მდ. მედისონის ქვედა წელში. ამიტომ, მიღებული იქნა სასწრაფო ზომები, რის შედეგად საინჟინრო ჯარების ნაწილებმა გათხარეს მეწყერულ კაშხალში არხი შეტბორილი წყლის გასაყვანად. ამის შედეგად, შესაძლო კატასტროფა თავიდან იქნა აცილებული.

3. შვეიცარიაში, ს. ფლინსის მახლობლად, წარმოქმნილმა მეწყერმა გადაღობა მდ. რეინი და წარმოქმნა ტბა, რომლის სიღრმე აღწევდა 200 მ. ამჟამად ეს ტბა არ არსებობს, ვინაიდან მდინარემ შეძლო თანდათან ახალი კალაპოტის გაჭრა.

4. ინდოეთში, დელისგან ჩრდილო-აღმოსავლეთით განლაგებულ ს. გოხნას მახლობლად, ჰიმალაის ერთ-ერთ მთაზე წარმოქმნილი მეწყერი შედგებოდა დოლომიტებისაგან. ის ჩამოზავდა მდ. ბირეჰინგანგას ხეობაში და ამ ხეობის გადახურვის შედეგად წარმოქმნა 300 მ

უზარმაზარი სიმაღლის კაშხალი, რომელიც სიგანეში 3 კმ-ს აღწევდა. ამ კაშხლის უკან წარმოიქმნა ტბა, რომელშიც წყლის დონემ თანდათან აწვეა დაიწყო. ქმედითი ზომების მიღება, რომელიც მთლიანად ააშორებდა დასახლებულ ობიექტებს ზარალსა და ხიფათს ვერ მოხერხდა. ამიტომ, ქალაქებიდან და დაბეებიდან, რომლებსაც საშიშროება ემუქრებოდა, მოსახლეობის მასობრივი ევაკუაცია აღამიანთა მსხვერპლის აცილების ძირითადი საშუალებას წარმოადგენდა. კაშხლის ნაწილობრივი გარღვევის შედეგად წარმოქმნილი ტალღა მცხოვრებლების მიერ მიტოვებული სახლების მთლიანი დანგრევის მიზეზი გახდა [70].

5. მდ. გრო-ვენტრის ხეობა მდებარეობს განთქმული იელოუსტონის ნაციონალური პარკის (აშშ) სამხრეთით [76]. 1925 წ. 25 ივნისს, ძლიერი წვიმებისა და თოვლის დნობის შედეგად, შიპ-მაუნტინის მაღლობიდან ხეობაში ჩამოზავდა კირქვის ქანების მასა, სიგრძით (ფერდობის გასწვრივ) 1,5 კმ; მისი სიმაღლე აღწევდა 60 მ, ხოლო სიგანე – 600 მ. ამ მასამ გადაღობა მდინარე და შექმნა 70 მ-იანი სიმაღლის კაშხალი. საინტერესოა აღინიშნოს, რომ ეს უზარმაზარი მოცულობის მეწყერი მოძრაობდა ძირითადად, როგორც ერთი მონოლითური მასივი (ბლოკი), ისე რომ ტყემ, რომელიც ფარავდა შიპ-მაუნტინის მაღლობს, მეწყერის შედეგად გადაინაცვლა პრაქტიკულად უცვლელად, გრო-ვენტრის ხეობაში.

მეწყერით მდინარის შეტბორვის შედეგად წარმოქმნა ტბა, რომელმაც წყლით დატბორა რამდენიმე ფერმა ხეობის ზედა ნაწილში [76]. თითქმის ორი წლის განმავლობაში არსებობდა ბალანსი მდინარეში მოდინებული და მეწყერულ მასაში გაჟონილი წყლის ხარჯებს შორის. მაგრამ 1927 წელს, გაზაფხულის წყალმოვარდნამ დაარღვია ეს ბალანსი. დაიწყო კაშხლის გარეცხვა. ქვედა ბიეფში მცხოვრები მოსახლეობის უმეტესობამ მოასწრო თავისი სახლ-კარის მიტოვება. მაგრამ, კაშხლის გარკვეული უბნიდან (ნაღვარევიდან) მოვარდნილმა ტალღამ მთლიანად დაფარა სოფელი კელი და 6 კაცის დახრჩობის მიზეზი გახდა.

6. 1936 წ. 13 სექტემბერს, ძლიერმა წვიმებმა ნორვეგიაში გამოიწვიეს მეწყერი, რომელიც შეიცავდა კლდოვან (გრანიტისა და გნეისის) ქანებს

[70]. ამ მეწყერულ მასას, რომელიც მოწყდა ციცაბო მთის ფერდობს მართალია, არ გამოუწვევია უშუალოდ რაიმე ნგრევა, მაგრამ აღნიშნული მთის ქანი ჩამოინგრა ლოენის ტბაში და წარმოქმნა მაღალი ტალღა, რომელმაც ჩამორეცხა ტბის მოპირდაპირე ნაპირზე განლაგებული სოფელი და გამოიწვია მისი მოსახლეობის უმეტესი ნაწილის დაღუპვა.

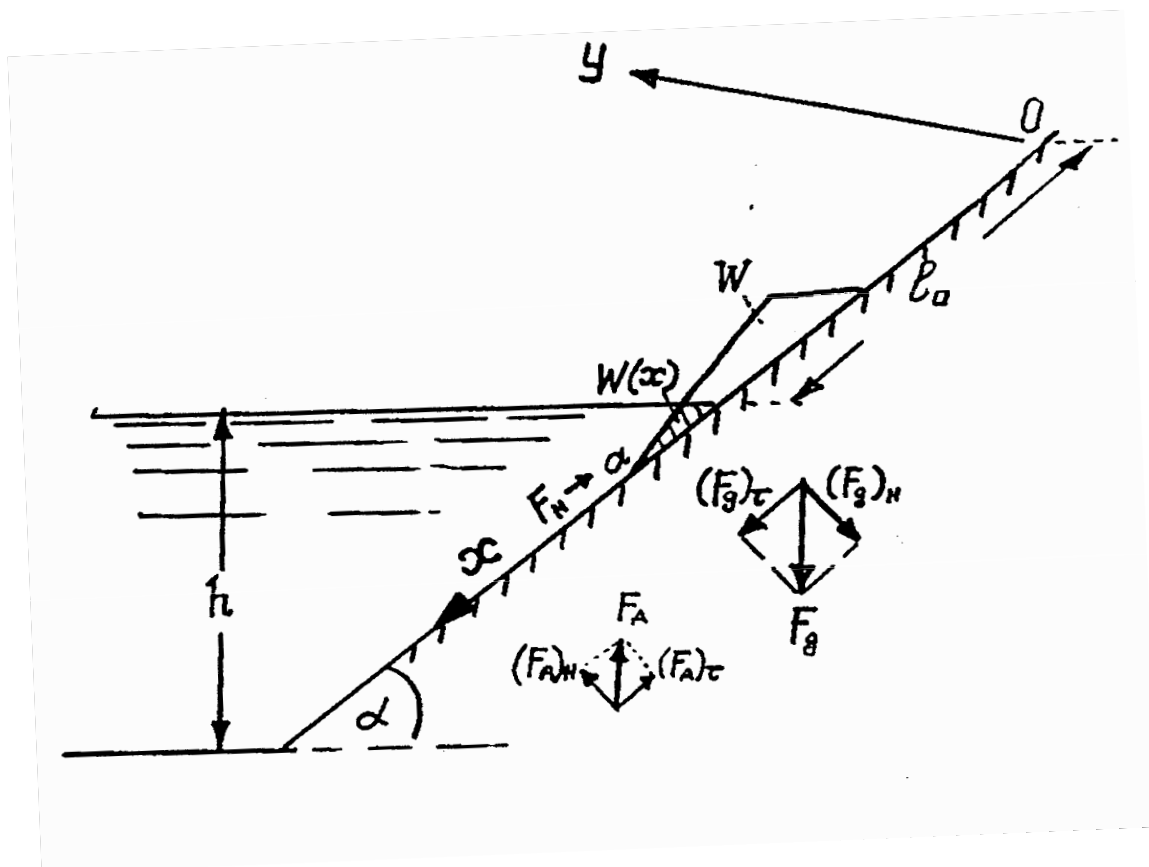
7. ანალოგიურ, მაგრამ უფრო დიდი მასშტაბის მოვლენას ადგილი ჰქონდა იტალიაში (1963 წ. ოქტომბერში), ვაიონტის წყალსაცავის ფერდობიდან უზარმაზარი მეწყერული მასის (250 მლნ მ³) უეცარი ჩამოქცევის შედეგად [92, 93]. ეს წყალსაცავი შექმნილი იყო მაღალი (სიმაღლით 267 მ) თაღოვანი კაშხლის აგების (1960-1962 წწ.) შემდეგ. აღნიშნულ ჩამოქცევამდე შემჩნეული იყო ფერდობებზე გრუნტის ნელი მოძრაობა, თუმცა ამ მოვლენამ არ მისცა ბიბი სპეციალისტ-გეოლოგებს გაეკეთებინათ პროცესის განვითარების სწორი და ღროული პროგნოზი. მეწყერის მასების წყალსაცავში ჩამონგრევამ გამოიწვია უზარმაზარი (კატასტროფული) ტალღა. ამ ტალღის ენერგია იმდენად დიდი იყო, რომ მან გადაუარა კაშხალს (ამ დროს წყლის ფენამ 70 მ მიაღწია), გავრცელდა უზარმაზარი სიჩქარით ქვედა ბიეფში და სულ რაღაც 3-4 წუთში წალეკა ქალაქი ლანჟერონე და რამდენიმე სოფელი თავისი მცხოვრებლებით. ტალღა ავარდა აგრეთვე, წყალსაცავის მოპირდაპირე ფერდობზე 250 მ სიმაღლემდე და აქაც, სოფელ კასოს ნაწილი ჩამორეცხა.

8. 1971 წ. მიწისძვრამ სან-ფერნანდოს ხეობაში (კალიფორნია) გამოიწვია დიდი რაოდენობის სხვადასხვა ზომის მეწყერი, მაგრამ მათ შორის ყველაზე მნიშვნელოვანი იყო ის, რომელიც წარმოიქმნა სან-ფერნანდოს 60 მ-იან კაშხლის ზედა ბიეფის ფერდობზე [70]. საბედნიეროდ ამ დროს წყალი წყალსაცავში იდგა საკმაოდ დაბალ დონეზე, ასე რომ ნაწილობრივად დანგრეული კაშხლის მხრიდან არ მოხდა წყალსაცავიდან წყლის ნაკადის გავრცელება ქვედა ბიეფში. ამის მიუხედავად, შეიქმნა იმდენად საშიში პირობები, რომ ქვედა ბიეფიდან 80 ათასიანი მოსახლეობის ევაკუაცია გახდა საჭირო. როგორც ავარიის შემდეგ ჩატარებულმა ანალიზმა და კვლევებმა აჩვენეს, კაშხლის მიწაყრილის ზონაში მოხდა მასალის გათხევადება

და მისი სიმტკიცის დაკარგვა, რის შედეგად კაშხლის ფერდო ჩამოინგრა წყალში. საინტერესოა აღინიშნოს, რომ ამ მასამ წყალსაცავის ფსკერზე გადაინაცვლა კაშხლიდან თითქმის 200 მ მანძილზე. აღნიშნულმა მიწისძვრამ წყალსაცავის სანაპირო ფერდობებზეც გამოიწვია რამდენიმე მეწყერი, თუმცა მათი გავლენის ხარისხი შედარებით მცირე იყო.

2.4. წყალსაცავის სანაპირო ფერდობზე ბლოკური მეწყერის მოძრაობის საანგარიშო სქემა

განვიხილოთ მეწყერული ტანის ბრტყელი მოძრაობა (სრიალი) სანაპირო ფერდობის გასწვრივ (ნახ.3). მეწყერულ ტანზე მოქმედი ძალები სხვადასხვაა იმისდა მიხედვით, თუ სად იმყოფება ის თავის მოძრაობისას ფერდობზე.



ნახ. 3. ბლოკური ტიპის მეწყერის სანაპირო ფერდობზე მოძრაობის საანგარიშო სქემა

ამის შესაბამისად, განიხილება შემდეგი შემთხვევები:

ა) მეწყერული ტანი მოძრაობს ფერდობის “მშრალ” მონაკვეთზე; ამ დროს მოქმედი ძალებია:

$$- \text{გრავიტაციული ძალა } F_g = G = mg = \rho Wg = \gamma W$$

სადაც m არის მეწყერული ტანისა მასა, ρ - მისი სიმკვრივეა;

$$g - \text{სიმძიმის ძალის აჩქარება } g = 9,81 \text{ მ/წმ}^2;$$

$$W - \text{მეწყერული ტანის მთლიანი მოცულობა};$$

$$\gamma = \rho g - \text{მეწყერული ტანის მოცულობითი წონა.}$$

- კულონის ხახუნის ძალა, რომელიც წარმოიქმნება მეწყერული ტანის ძირისა და ფერდობის (სრიალის) ზედაპირს შორის

$$F_f = fF_N$$

სადაც F_N არის სრიალის ზედაპირის მართობულად მოქმედი ძალების ტოლქმედი;

f - ხახუნის კოეფიციენტი.

ბ) მეწყერული ტანი იწყებს წყალში შესვლას (ჩაძირვას). ამ დროს გრავიტაციული და კულონის ხახუნის ძალების გარდა, მოქმედებენ აგრეთვე

- წყლის წინაღობის ძალა (ანუ შუბლური წინაღობის) ძალა

$$F_H = K_H \Omega \frac{\rho_0}{2} V$$

სადაც K_H არის შუბლური წინაღობის კოეფიციენტი;

Ω - “მიდელური” კვეთი, ანუ მეწყერული ტანის განიგვეთის ფართობი;

ρ_0 - წყლის სიმკვრივე;

V - მეწყერული ტანის მოძრაობის სიჩქარე.

- წყლის ამომგდები (ანუ არქიმედეს) ძალა

$$F_A = \gamma_0 W(x) = \rho_0 g W(x)$$

სადაც γ_0 - წყლის მოცულობითი წონაა $\gamma_0 = \rho_0 g$;

$W(x)$ - მეწყერული ტანის “დასველებული” მოცულობაა, რომელიც იცვლება მეწყერული ტანის წყალში ჩაძირვის მიხედვით; კერძოდ ის ტოლია

$$W(x) = \begin{cases} 0, & \text{როდესაც } x = l_0 \\ W, & \text{როდესაც მეწყერული ტანი მოლიანად დაიფარება წყლით} \end{cases}$$

კოორდინატა ღერძის საწყისი წერტილია O, რომელიც მეწყერული ტანის წინა a წერტილს (ნახ.3) ემთხვევა.

მეწყერული ტანის მოძრაობის შესწავლის მიზნით შეიძლება გამოყენებულ იქნას კინეტიკური ენერჯის შენახვის კანონი, რომელიც ასე ჩაიწერება

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{mV^2}{2} \right) = (F_g)_\tau - F_f - (F_A)_\tau - F_H \quad (2.1)$$

სადაც $F_f = F_{Nf} = [(F_g)_N - (F_A)_N]f$; ინდექსები τ და N ნიშნავს იმას, რომ აიღება შესაბამისად ძალების მდგენელები სანაპირო ფერდოს (x ღერძის) გასწვრივ და მის მართობულად (ნახ. 3).

აღნიშნული ძალების τ და N მდგენელების მნიშვნელობები შემდეგია

$$(F_g)_N = G_N = G \cos \alpha = mg \cos \alpha = \rho W \cos \alpha$$

$$(F_g)_\tau = G_\tau = G \sin \alpha = mg \sin \alpha = \rho W \sin \alpha$$

$$(F_A)_N = F_A \cos \alpha = \gamma_0 W(x) \cos \alpha = \rho_0 g W(x) \cos \alpha$$

$$(F_A)_\tau = F_A \sin \alpha = \gamma_0 W(x) \sin \alpha = \rho_0 g W(x) \sin \alpha$$

სადაც $W(x)$ – მეწყერის წყალში ჩაძირვის მოცულობათა მახასიათებელი ფუნქციაა.

ამ გამოსახულებათა გათვალისწინებით (2.1) განტოლება ჩაიწერება შემდეგი სახით

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \left(\frac{mV^2}{2} \right) &= G \sin \alpha - (G - F_A)f \cos \alpha - F_A \sin \alpha - F_H = \\ &= mg \sin \alpha - mgf \cos \alpha + \rho_0 g W(x) g \cos \alpha - \rho_0 g W(x) \sin \alpha - F_H \end{aligned} \quad (2.2)$$

ანუ

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{mV^2}{2} \right) = mg(\sin \alpha - f \cos \alpha) + \rho_0 g(f \cos \alpha - \sin \alpha)W(x) - F_H \quad (2.3)$$

სადაც

$$F_H = K_H \Omega \frac{\rho_0}{2} V = K_H \Omega \frac{\rho_0}{m} \frac{mV^2}{2} = K_H \Omega \frac{\rho_0}{m} N_K = B N_K \quad (2.4)$$

$$B = K_H \Omega \frac{\rho_0}{m} \quad (2.5)$$

$$N_k - \text{მეწყერული ტანის კინემატიკური ენერჯიაა } N_k = \frac{mV^2}{2}.$$

ნაშრომში [94] მიღებული იყო (2.3) დიფერენციალური განტოლების ამონახსენი იმ შემთხვევისათვის, როდესაც სანაპირო ფერდობზე ხდება მეწყერული ტანის სიმძიმის ცენტრის მოძრაობა (ანუ $W(x)$ ფუნქციის ცვლილება არ მიიღებოდა მხედველობაში).

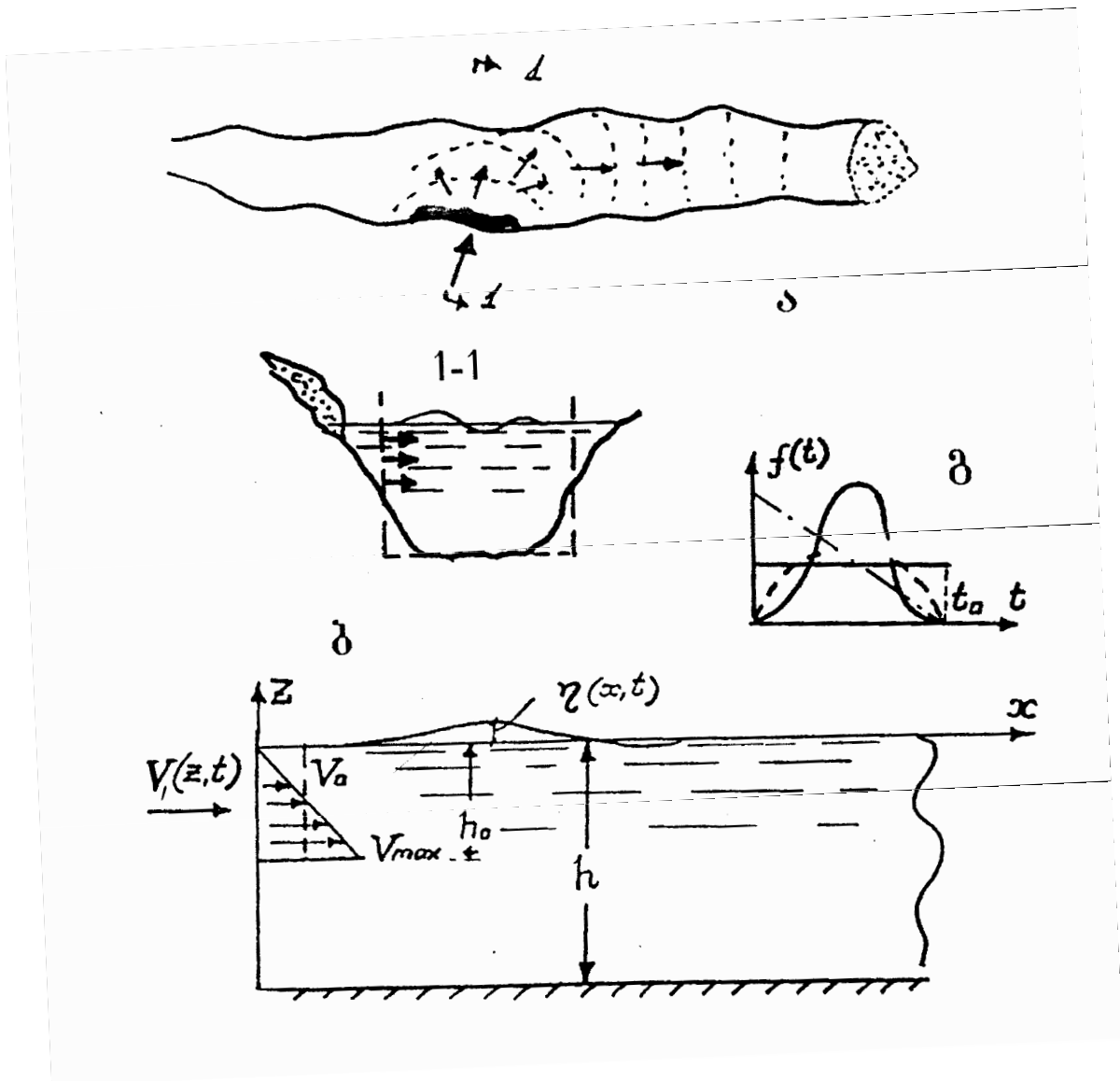
წყლის ამომგდები ძალის ცვლილება მეწყერული ტანის წყალში ჩაძირვის დროს გაითვალისწინება [95] წიგნში. აღვნიშნოთ, რომ იმ შემთხვევაში, როდესაც სანაპირო ფერდობზე მოძრაობს არა ბლოკური ტიპის მეწყერი, არამედ საკმაოდ თხიერი გრუნტის მასა გამოიყენება ე.წ. "ჰიდრაგლიკური" მოდელი [94, 96, 97-99].

**თავი 3. საანგარიშო დამოკიდებულებების მიღება
წყალსაცავებში მეწყერით წარმოქმნილი ტალღების
შესწავლის მიზნით**

**3.1. წყალსაცავში მეწყერით გამოწვეულ ტალღურ პროცესთან
დაკავშირებული ჰიდრომექანიკური ამოცანის ფორმულირების
ასპექტები**

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, წყალსაცავში მეწყერით წარმოქმნილი ტალღის აღწერა შესაძლებელია განხორციელდეს შესაბამისი ჰიდროდინამიკური ამოცანის ამოხსნის საფუძველზე, როგორც ანალიზური გზით (მატ ტეორიის გამოყენებით), ასევე მწ თეორიაზე დაყრდნობით (რიცხვითი მეთოდების საშუალებით). ამ ამოცანის ანალიზური ამონახსნი საშუალებას იძლევა მის საფუძველზე ჩატარდეს გაანგარიშებათა ფართო ციკლი. მიღებული მონაცემების ანალიზის შედეგად, შეიძლება დადგენილ იქნას, როგორც განსახილველი მოვლენის საანგარიშო პარამეტრების გავლენის ხარისხი ტალღურ პროცესზე, ასევე ამ პროცესის ძირითადი დამახასიათებელი ნიშნები და კანონზომიერებანი.

ამოცანის ანალიზური ამონახსნისათვის ჩვეულებრივ, მიიღება პირობები, რომლებიც ამარტივებენ განსახილველ მოვლენას (იხ. თავი 1). კერძოდ ითვლება, რომ სითხე იდეალურია, ტალღურ მოძრაობისას სითხეში წარმოქმნილი ფარდობითი სიჩქარეები, აგრეთვე ტალღის ამპლიტუდები სიღრმესთან შედარებით მცირეა, ხოლო წყალსაცავის არე განიხილება მარტივი გეომეტრიული ფორმის სახით. ასე მაგალითად, ბრტყელი ამოცანის განხილვისას, ამ არეს სწორკუთხედის ფორმა აქვს (ნახ. 4,ა). გარდა ამისა იგულისხმება, რომ მეწყერის წყალში ჩამონგრევის შედეგად, წყალსაცავის პირვანდელი კონფიგურაცია არ იცვლება, რაც იმას ნიშნავს, რომ მეწყერის სისქე მცირეა წყალსაცავის ზომებთან (სიგრძესთან ან სიგანესთან) შედარებით. მოვლენის გამარტივების მიზნით იგულისხმება, აგრეთვე ისიც, რომ ტალღების წარმოქმნას წყალსაცავში განაპირობებს არა განსაზღვრული მოცულობის მეწყერული მასის ფერდობიდან უშუალოდ შემოსვლა, არამედ ამავე მოცულობის წყლის მასის შემოდინება, გარკვეული V ჰორიზონტალური სიჩქარით (ნახ. 4, ბ).



ნახ. 4. ა) წყალსაცავში მეწყერით გენერირებული ტალღების გავრცელება;
 ბ) ბრტყელი მეწყერული ტალღების წარმოქმნის საანგარიშო სქემა, სხვადასხვა $F(z)$ ფუნქციის შემთხვევაში;
 გ) $f(t)$ ფუნქციის სხვადასხვა სახე

აღნიშნული ტალღური ამოცანის განხილვისას წყალსაცავში მეწყერის მასის შემოდინების (შემოსვლის) V სიჩქარე მოცემულია სასაზღვრო პირობაში, წყალსაცავის “მყარ საზღვარზე” (ანუ ფერდობზე ან ბორტზე) (იხ. თავი 1). ზოგადი სახით, ბრტყელი სასაზღვრო ამოცანის ფორმულირებისას ეს სიჩქარე შეიძლება

წარმოდგენილი იყოს, როგორც ვერტიკალური z კოორდინატის, ასევე t -ცვლადის ფუნქცია (ნახ. 4, ბ).

$$V(z,t) = VF(z)f(t) \quad (3.1)$$

სადაც V – სიჩქარის მახასიათებელი სიდიდეა.

კერძოდ, იმ შემთხვევაში, თუ სიჩქარის ეპიურა (სიჩქარის განაწილება ვერტიკალის გასწვრივ) ანუ $F(z)$ ფუნქცია არის წარმოდგენილი სამკუთხედის სახით (ნახ. 4, ბ), მაშინ მიიღება

$$V = V_{\max}$$

იმ შემთხვევაში, როდესაც სიჩქარის განაწილება ვერტიკალის გასწვრივ თანაბარია, მაშინ აღნიშნულ ეპიურას სწორკუთხედის ფორმა აქვს (ნახ. 4, ბ), ამასთან მიიღება, რომ

$$V = V_0$$

წყალსაცავში მეწყერის შემოდინების სიჩქარე შეიძლება მოცემული იყოს ბორტის მთელ სიმაღლეზე (რომელიც წყალსაცავის h სიღრმეს შეესაბამება) ან მის ნაწილზე ანუ h_0 სიმაღლეზე (ნახ.4, ბ).

ზემოაღნიშნულთან დაკავშირებით, შემოდინების სიჩქარე სხვადასხვა $F(z)$ ფუნქციისათვის გამოისახება შემდეგნაირად:

ა) სიჩქარის ეპიურას სამკუთხედის ფორმა აქვს, $F(z) = -V_{\max} \frac{z}{h_0}$

$$V(z,t) = V_{\max} F(z)f(t) = -V_{\max} \frac{z}{h_0} f(t) = \begin{cases} 0, & \text{როცა } z = 0 \\ V_{\max} f(t), & \text{როცა } z = -h_0 \end{cases} \quad (3.2)$$

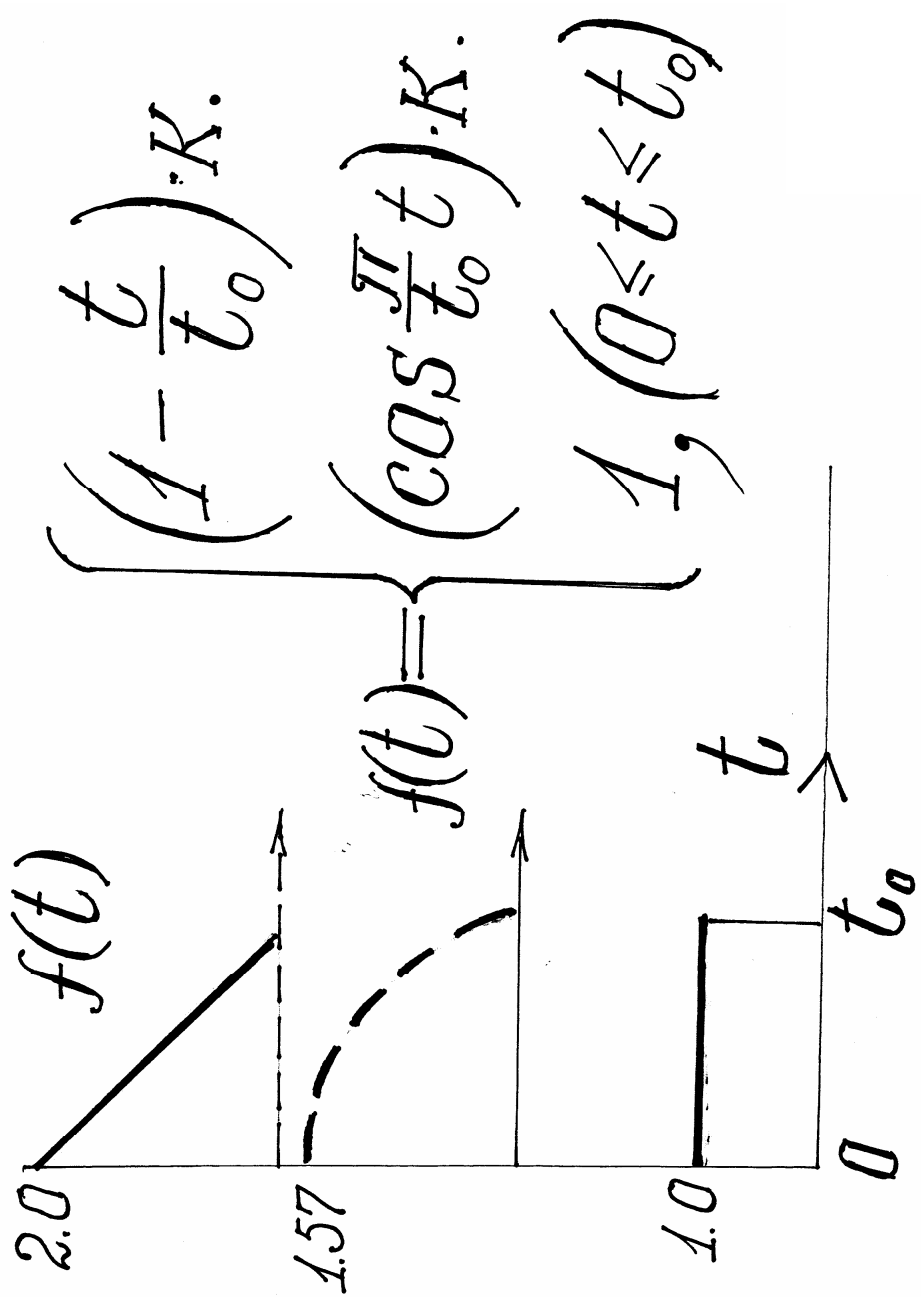
ბ) სიჩქარის ეპიურა სწორკუთხა ფორმისაა $F(z) = V_0$

$$V(z,t) = V_0 F(z)f(t), \quad \text{როცა } 0 \leq z \leq -h_0 \quad (3.3)$$

ამ გამოსახულებაში კერძო შემთხვევაში, შეიძლება მიღებული იყოს, რომ $h_0 = h$.

რაც შეეხება $f(t)$ ფუნქციას, ის ახასიათებს მეწყერის მიერ წყალსაცავიდან წყლის გამოდევნის სიჩქარის ცვლილებას გარკვეული დროის $0 \leq t \leq t_0$ მონაკვეთში.

აღვნიშნოთ, რომ $f(t)$ ფუნქცია შეიძლება აპროქსიმირებული იყოს სხვადასხვა ანალიზური გამოსახულების სახით (ნახ. 5). ვინაიდან $t = t_0$ მომენტი შეესაბამება მეწყერის მოძრაობის (შემოდინების) და წყლის გამოდევნის პროცესის დასასრულს, ამიტომ ამ დროს $f(t) = 0$.



ნახ. 5. მეწეურის სიჩქარის დროში ცვლილების აპროქსიმაციის სხვადასხვა ფუნქცია

აღნიშნული პროცესის საწყის ფაზაში წყლის გამოდევნის სიჩქარეს ახასიათებს მაქსიმალური მნიშვნელობა იმ შემთხვევაში, როდესაც მეწყერი შემოდის წყალში მაქსიმალური სიჩქარით. ამას ექნება ადგილი, კერძოდ, მაშინ, როდესაც მეწყერი იწყებს მოძრაობას ფერდობზე გარკვეული სიმაღლიდან (ათვლის (წყლის თავისუფალ) ზედაპირიდან). ამ შემთხვევაში $f(t)$ ფუნქცია შეიძლება აპროქსიმირებული იყოს სამკუთხედის ან კოსინუსოიდის მონაკვეთის ფორმით (ნახ.5).

მაშინ, როდესაც პოტენციური მეწყერი ნაწილობრივ ან მთლიანად არის დაფარული წყლით, მისი სიჩქარე მოძრაობის დაწყებიდან მაქსიმუმს აღწევს მხოლოდ გარკვეული დროის შემდეგ. ამიტომ, ანალიზურად, $f(t)$ ფუნქცია შეიძლება გამოისახოს, კერძოდ ე.წ. "ზარხუფის" ფორმით.

უფრო უხეშ მიახლოებაში შეიძლება ჩაითვალოს, რომ წყლის გამოდევნის სიჩქარე მეწყერის შედეგად, მთელი $0 \leq t \leq t_0$ დროის განმავლობაში უცვლელია.

ზემოაღნიშნულ სამივე შემთხვევისათვის, $f(t)$ ფუნქციას შემდეგი სახე ექნება.

1. აპროქსიმაცია სამკუთხედის სახით (ნახ.4, ნახ.5).

$$f(t) = 1 - \frac{t}{t_0} = \begin{cases} 1, & \text{როცა } t = 0 \\ 0, & \text{როცა } t = t_0 \\ 0, & \text{როცა } t < 0, t > t_0 \end{cases} \quad (3.4)$$

2. აპროქსიმაცია ხდება კოსინუსოიდის სახით (ნახ.5).

$$f(t) = \cos \omega t = \cos \frac{\pi}{2t_0} t = \begin{cases} 1, & \text{როცა } t = 0 \\ 0, & \text{როცა } t = t_0 \\ 0, & \text{როცა } t < 0, t > t_0 \end{cases} \quad (3.5)$$

3. აპროქსიმაციას აქვს "ზარხუფის" სახე (ნახ.4).

$$f(t) = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{t_0} t \right) = \begin{cases} 0, & \text{როცა } t = 0 \\ 1, & \text{როცა } t = t_0 / 2 \\ 0, & \text{როცა } t = t_0 \\ 0, & \text{როცა } t < 0, t > t_0 \end{cases} \quad (3.6)$$

4. ფუნქცია ინარჩუნებს მუდმივ მნიშვნელობას (ნახ.4, ნახ.5).

$$f(t) = \begin{cases} 1, & \text{როცა } 0 \leq t \leq t_0 \\ 0, & \text{როცა } t < 0, t > t_0 \end{cases} \quad (3.7)$$

ზემოთ აღნიშნული ფაქტორების გათვალისწინებით, წყალსაცავიდან მეწყერით გამოდენილი წყლის მოცულობა ბრტყელი ამოცანის შემთხვევაში, განისაზღვრება ასე

$$W = \int_0^{h_0} \int_0^{t_0} V(\xi, \tau) d\xi d\tau = -V \int_0^{h_0} F(\xi) d\xi \int_0^{t_0} f(\tau) d\tau \quad (3.8)$$

ყველაზე მარტივი შემთხვევისათვის, როდესაც სიჩქარის ეპიურა ვერტიკალური ღერძის მიმართ უცვლელია ანუ $F(z)=1$, ($0 \leq z \leq -h_0$), ხოლო ფუნქცია $f(t)$ მუდმივია, $0 \leq t \leq t_0$ დროის მონაკვეთში, (3.8) გამოსახულება შემდეგი სახით იქნება წარმოდგენილი

$$W = -V_0 \int_0^{h_0} d\xi \int_0^{t_0} d\tau = -V_0 h_0 t_0 \quad (3.9)$$

თუ მივიღებთ მხედველობაში იმას, რომ წყლის ნაწილაკი, მეწყერის წყალში შემოსვლის პროცესის დამთავრების მომენტისათვის ($t = t_0$) გადაადგილდება D მანძილით, მაშინ ეს სიდიდე ტოლი იქნება $D = V_0 t_0$. ამის გათვალისწინებით, გამოსახულება (3.9), ასე იქნება წარმოდგენილი

$$W = Dh_0 \quad (3.10)$$

ანალოგიურად, თუ წყლის გამოდენის სიჩქარის ეპიურა $F(z)$ სამკუთხედის ფორმისაა, მაშინ (3.8) განტოლება, (3.2) გამოსახულების გათვალისწინებით, ასე ჩაიწერება

$$W = \frac{V_{\max}}{h_0} \int_0^{h_0} \xi d\xi \int_0^{t_0} d\tau = \frac{V_m}{h_0} \frac{h_0^2}{2} \cdot t_0 = \frac{1}{2} V_m h_0 t_0 = \frac{1}{2} D_m h_0 \quad (3.11)$$

სადაც $D_m = V_m h_0$.

იმისათვის რომ დაცული იყოს პირობა: $W = \text{const}$ (ანუ მეწყერის მოცულობა ზემო განხილული სხვადასხვა $F(z)$ ფუნქციის შემთხვევაში არის ერთი და იგივე), საჭიროა, V_{\max} სიდიდე მივიღოთ $V_{\max} = 2V_0$ ტოლი, რაც (3.9) და (3.11) გამოსახულებათა შედარების შედეგად დასტურდება.

ანალოგიურად, ზოგად შემთხვევაში, სხვადასხვა $V(z,t) = VF(z)f(t)$ ფუნქციისათვის, ზემოთ აღნიშნული პირობის $W = \text{const}$

უზრუნველსაყოფად, უნდა შევარჩიოთ სიჩქარის ისეთი მნიშვნელობა $V = k_1 k_2 V_0$, რომ მივიღოთ

$$k_1 k_2 \int_0^{h_0} F(\xi) d\xi \int_0^{t_0} f(\tau) d\tau = -V_0 h_0 t_0 = \text{const} \quad (3.12)$$

სადაც k_1 და k_2 კოეფიციენტებია, რომელთა მნიშვნელობა უზრუნველყოფს $W = \text{const}$ პირობას. ამასთან k_1 მნიშვნელობა დამოკიდებულია $F(z)$ ფუნქციის სახეზე, ხოლო k_2 მნიშვნელობა კი $f(t)$ ფუნქციის სახეზე.

ზემოთ განხილული სხვადასხვა შემთხვევებისათვის k_1 და k_2 კოეფიციენტების მნიშვნელობები იქნება შემდეგი:

ა) $k_1 = 2$, როცა $F(z)$ ფუნქცია გამოსახულია (3.2) ფუნქციის სახით (ეპიურა სამკუთხედის ფორმისაა); (3.13)

ბ) $k_1 = 1$, როცა $F(z) = 1$, (ეპიურა სწორკუთხედის ფორმისაა); (3.14)

1. $k_2 = 2$, როცა $f(t)$ გამოსახულია (3.4) სახით;

2. $k_2 = 1,57$ - (3.5) სახით;

3. $k_2 = 2$ - (3.6) სახით;

4. $k_2 = 1$ - (3.7) სახით.

აღვნიშნოთ, რომ k_2 კოეფიციენტების მნიშვნელობები, (3.12)-ის თანახმად, მიღებული იყო ჩვენს მიერ, შემდეგი პირობიდან:

$$\int_0^{t_0} f(\tau) d\tau = t_0 = \text{const}$$

ისეთი რთული მოვლენის ზუსტი პროგნოზი, როგორცაა წყალსაცავში მეწყერის მიერ ტალღების გენერაცია, მთელ რიგ სირთულესთან არის დაკავშირებული. უპირველეს ყოვლისა, ეს შეეხება მეწყერული ტანის წყალსაცავში შემოსვლისა და წყლის გამოდენის პროცესს, რომლის შესახებ მხოლოდ მწირი ინფორმაცია მოიპოვება. ამოცანის ანალიზური ამოხსნის დროს, ეს მოვლენა როგორც ზემოთ აღინიშნა, გამარტივებული სახით უნდა იყოს წარმოდგენილი. ამავე დროს, მისი ძირითადი განმსაზღვრელი ნიშნები უნდა იყოს შეძლებისდაგვარად, კორექტულად გათვალისწინებული.

ვინაიდან, აღნიშნული პროცესის ერთ-ერთ მთავარ პარამეტრად, წყლის გამოდენის სიჩქარე $V(z,t) = VF(z)f(t)$ გვევლინება, ამიტომ

პრაქტიკული თვალსაზრისით, დიდი მნიშვნელობა ენიჭება $F(z)$ და $f(t)$ წინასწარ უცნობი ფუნქციების გავლენის განსაზღვრას წყალსაცავში წარმოქმნილ ტალღურ პრეცესის ხასიათზე (ტალღის ამპლიტუდაზე, მის პერიოდზე და სხვ.).

ამ მიზნის განხორციელება შესაძლებელია შესაბამისი ანალიზური გამოსახულების საფუძველზე რიცხვით გაანგარიშებათა ჩატარებით და მიღებულ გაანგარიშებათა მონაცემების გაანალიზების შედეგად, იმ შემთხვევაში, როდესაც $F(z)$ და $f(t)$ ფუნქციები სხვადასხვა სახით არის წარმოდგენილი. აღნიშნული საკითხის დეტალური შესწავლა გულისხმობს განსახილველ პროცესზე, ანალიზურ გამოსახულებაში შემავალი სხვა პარამეტრის გავლენის ხარისხის დადგენასაც.

ქვემოთ, საანგარიშო გამოსახულებების მიღების მიზნით, ჩვენს მიერ გამოყენებულია იმპულსური ტალღების თეორია, რომელიც დამუშავებულია პროფ. თ. გველესიანის მიერ, კერძოდ ჩვენ ვიყენებდით ბრტყელი სასაზღვრო ამოცანის ზოგად ამონახსენს, რომელიც მიღებული იყო [12] ნაშრომში, მათ თეორიის გამოყენების საფუძველზე.

ამ ნაშრომში განხილულია ბრტყელი სქემატიზირებული წყალსაცავი მუდმივი (გასაშუალებული) სიღრმით, რომლის ერთ-ერთ ბორტის მხრიდან ადგილი აქვს მეწყერული მასის შემოსვლას $V(z,t)$ სიჩქარით. მათ ტეორიის წინამძღვრების თანახმად, ტალღური ამოცანის ამოხსნა დაიყვანება სიჩქარის პოტენციალის $\varphi(z,x,t)$ ფუნქციის მოძებნამდე მეორე ხარისხის კერძო წარმოებულებიან დიფერენციალურ განტოლებიდან (ლაპლასის განტოლებიდან) (იხ. თავი 1), რომელსაც განსახილველი ბრტყელი ამოცანის შემთხვევაში შემდეგი სახე აქვს:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.16)$$

ვინაიდან, როგორც ცნობილია

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad w = \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (3.17)$$

ამიტომ, ამ ამოცანის სასაღვრო პირობები (იხ. თავი 1) ზოგადი სახით შემდეგნაირად არის წარმოდგენილი [12].

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{z=0} = V(z, t), \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{z=l} = 0, \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} \Big|_{z=-h} = 0, \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + \frac{1}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad (3.21)$$

სადაც

$$V(z, t) = \begin{cases} 0, & \text{როცა } t < 0 \text{ და } t > t_0 \\ VF(z)f(t), & \text{როცა } 0 < t < t_0, 0 < z < -h_0 \end{cases}$$

სადაც l – წყალსაცავის სიგრძეა, h – მისი სიღრმე.

ზემოთ მოყვანილი სასაზღვრო ამოცანა: (3.16), (3.18) – (3.21), შეიძლება ფორმულირებული იყოს შემდეგნაირად: ლაპლასის განტოლებიდან უნდა განისაზღვროს სიჩქარის პოტენციული სქემატიზირებულ (სწორკუთხა ფორმის), წყლით შევსებულ არისათვის (წყალსაცავისათვის), როდესაც მისი ერთ-ერთი საზღვრის (ბორტის) კვეთში ($x=0$), ადგილი აქვს გარკვეული სიჩქარით წყლის მასის შემოდინებას, ფიქსირებულ დროის მონაკვეთში $0 \leq t \leq t_0$. მოპირდაპირე ბორტის, კერძოდ, კაშხლის კვეთში ($x=l$) და წყალსაცავის ფსკერზე ($x=-h$), სრულდება მყარ საზღვარზე წყლის შეუღწევადობის პირობა, ხოლო თავისუფალ ზედაპირზე ($z=0$) – კოში-ლაგრანჟის განტოლება (იხ. თავი 1).

3.2. ტალღური პროცესის განმსაზღვრელი კონკრეტული საანბარიშო დამოკიდებულებების მიღება

[7, 12] ნაშრომებში მიღებულია ზემოთ აღნიშნული სასაზღვრო ამოცანის ამონახსენი, ანუ განსაზღვრულია $\varphi(z, t)$ ფუნქცია ლაპლასის ინტეგრალური გარდაქმისა და ფურიეს სასრული კოსინურ გარდაქმნების მეთოდების საფუძველზე [7, 100, 101]. მიღებული φ ფუნქციის საშუალებით განისაზღვრება წყლის ზედაპირზე

წარმოქმნილი ტალღური პროფილი $\eta(x, t)$. ეს ფუნქცია ზოგადი სახით [12] ნაშრომის მიხედვით, ჩაიწერება ასე

$$\eta(x, t) = -\frac{1}{l} \int_0^t \int_0^{-h_0} V(\xi, \tau) d\xi d\tau - \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos a_n x}{\operatorname{cha}_n h} \int_0^t \int_0^{-h_0} V(\xi, \tau) \operatorname{cha}_n (h + \xi) \cos \gamma_n (t - \tau) d\xi d\tau \quad (3.22)$$

სადაც $a_n = \frac{n\pi}{l}$; $n=1, 2, 3, \dots$

$$\gamma_n = \sqrt{a_n g t h a_n h}$$

ეს გამოსახულება იმის გათვალისწინებით, რომ $V(z, t) = VF(z)f(t)$, ჩვენს მიერ წარმოდგენილია შემდეგნაირად:

$$\eta(x, t) = -\frac{V}{l} \int_0^t f(\tau) d\tau \int_0^{-h_0} F(\xi) d\xi - \frac{2V}{l} \sum_{n=1}^{\infty} E_n \int_0^t f(\tau) \cos \gamma_n (t - \tau) d\tau \int_0^{-h_0} F(\xi) \operatorname{cha}_n (h + \xi) d\xi \quad (3.23)$$

სადაც $E_n = \frac{\cos a_n x}{\operatorname{cha}_n h}$

ანუ

$$\eta(x, t) = -\frac{V}{l} I_0(t) J_0(z) - \frac{2V}{l} \sum_{n=1}^{\infty} E_n \cdot J_n(t) J_n(z) \quad (3.24)$$

სადაც
$$I_0(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (3.25)$$

$$I_n(t) = \int_0^t f(\tau) \cos \gamma_n (t - \tau) d\tau \quad (3.26)$$

$$J_0(t) = \int_0^{-h_0} F(\xi) d\xi \quad (3.27)$$

$$J_n(t) = \int_0^{-h_0} F(\xi) \operatorname{cha}_n (h + \xi) d\xi \quad (3.28)$$

ქვემოთ, განისაზღვრება I_n და J_n ($n \geq 0$) ინტეგრალების კონკრეტული მნიშვნელობები, რომლებიც $f(t)$ და $F(z)$ ფუნქციების სხვადასხვა სახეს შეესაბამებიან:

განვიხილოთ $f(t)$ ფუნქციის სხვადასხვა შემთხვევა:

$$1) f_1(t) = 1; \quad 2) f_2(t) = \sin\left(\frac{\pi}{t_0}\right)t \quad \text{და} \quad 3) f_3(t) = \frac{1}{2}\left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{t_0}\right)t\right].$$

ამის შესაბამისად, (3.25) ინტეგრალის ამოხსნის შედეგად, “ნულოვანი” I_0 ინტეგრალებისათვის მიიღება

$$1) I_0 = \begin{cases} t, & (0 < t < t_0) \\ t_0, & (t > t_0) \end{cases} \quad (3.29)$$

$$2) I_0 = \begin{cases} \frac{1}{\omega}(1 - \cos \omega t), & (0 < t < t_0) \\ \frac{1}{\omega}(1 - \cos \omega t_0), & (t > t_0) \end{cases} \quad (3.30)$$

$$3) I_0 = \begin{cases} \frac{1}{2}\left(t - \frac{1}{\omega_1} \sin \omega_1 t\right), & (0 < t < t_0) \\ \frac{1}{2}\left(t_0 - \frac{1}{\omega_1} \sin \omega_1 t_0\right), & (t > t_0) \end{cases} \quad (3.31)$$

$$\text{სადაც } \omega = \frac{\pi}{t_0}; \quad \omega_1 = \frac{2\pi}{t_0}.$$

შესაბამისად “n-ური” – I_n ინტეგრალებისათვის, (3.26) გამოსახულების თანახმად, გვექნება:

$$1) I_n(t) = \begin{cases} \int_0^t \cos \gamma_n(t-\tau) d\tau = \frac{\sin \gamma_n t}{\gamma_n}, & (0 < t < t_0) \\ \int_0^{t_0} \cos \gamma_n(t-\tau) d\tau = \frac{2}{\gamma_n} \sin \frac{\gamma_n t_0}{2} \cos \gamma_n \left(t - \frac{t_0}{2}\right), & (t > t_0) \end{cases} \quad (3.32)$$

$$2) I_n(t) = \begin{cases} \int_0^t \sin \omega \tau \cos \gamma_n(t-\tau) d\tau = \frac{\omega}{\omega^2 - \gamma_n^2} (\cos \gamma_n t - \cos \omega t), & (0 < t < t_0) \\ \int_0^{t_0} \sin \omega \tau \cos \gamma_n(t-\tau) d\tau = \frac{2\omega}{\omega^2 - \gamma_n^2} \cos \gamma_n \frac{t_0}{2} \cos \gamma_n \left(t - \frac{t_0}{2}\right), & (t > t_0) \end{cases} \quad (3.33)$$

3)

$$I_n(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \int_0^t (1 - \cos \omega_1 \tau) \cos \gamma_n(t-\tau) d\tau = \frac{\omega_1}{2\gamma_n(\omega_1^2 - \gamma_n^2)} (\omega_1 \sin \gamma_n t - \gamma_n \sin \omega_1 t), & (0 < t < t_0) \\ \frac{1}{2} \int_0^{t_0} (1 - \cos \omega_1 \tau) \cos \gamma_n(t-\tau) d\tau = \frac{\omega_1^2}{\gamma_n(\omega_1^2 - \gamma_n^2)} \left[\sin \gamma_n \frac{t_0}{2} \cos \gamma_n \left(t - \frac{t_0}{2}\right) \right], & (t > t_0) \end{cases} \quad (3.33)$$

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, ჩვენს მიერ განხილულია $F(z)$ ფუნქციის ორი შემთხვევა, როდესაც

$$ა) F(z) = -V_{\max} \frac{z}{h_0}$$

$$ბ) F(z) = V_0$$

$F(z)$ ფუნქციის ამ მნიშვნელობათა გათვალისწინებით, (3.27) და (3.28) გამოსახულებების ინტეგრირების შედეგად მიიღება:

ა) შემთხვევაში

$$J_0(z) = -\frac{V_{\max}}{h_0} \int_0^{-h_0} \xi d\xi = -\frac{V_{\max}}{h_0} \frac{h_0^2}{2} = -\frac{V_{\max} h_0}{2} \quad (3.35)$$

$$J_n(z) = -\frac{V_{\max}}{h_0} \int_0^{-h_0} \xi c h a_n (h + \xi) d\xi =$$

$$= \frac{1}{a_n^2} [c h a_n h - c h a_n (h_0 - h) + a_n h_0 s h a_n (h_0 - h)] \quad (3.36)$$

კერძო შემთხვევაში, როდესაც $h_0 = h$ ანუ წყლის შემოდინების სიჩქარე მოცემულია მთელი ფერდობის (ბორტის) სიმაღლეზე, ეს განტოლებები შესაბამისად ასეთ სახეს მიიღებენ

$$J_0(z) = \frac{V_{\max} h}{2} \quad (3.37)$$

$$J_n = \frac{1}{a_n^2} (c h a_n h - 1) \quad (3.38)$$

ბ) შემთხვევაში $F(z)$ ფუნქცია არ იცვლება

$$J_0 = V_0 \int_0^{-h_0} d\xi = -V_0 h_0 \quad (3.39)$$

$$J_n = V_0 \int_0^{-h_0} c h a_n (h + \xi) d\xi = -\frac{V_0}{a_n} [s h a_n (h_0 - h) + s h a_n h] \quad (3.40)$$

ამ გამოსახულებებიდან, კერძო შემთხვევაში, როდესაც $h_0 = h$, მივიღებთ

$$J_0 = -V_0 h \quad (3.41)$$

$$J_n = -\frac{V_0}{a_n} s h a_n h \quad (3.42)$$

ზემოთ განხილული შემთხვევებისათვის, ზოგადი სახით წარმოდგენილი (3.22) გამოსახულების გამოყენების საფუძველზე $\eta(x,t)$ ფუნქცია შეიძლება წარმოდგენილი იყოს კერძო სახით. მართლაც, იმ შემთხვევაში, როდესაც $F(z)$ ეპიურას სამკუთხედის ფორმა აქვს, ხოლო $f(t)$ ფუნქცია მუდმივია (შესაბამისად, $0 < z < -h_0$ და $0 < t < t_0$ ინტერვალში), (3.32), (3.39) და (3.40) გამოსახულებათა გათვალისწინებით, წყლის ზედაპირზე მეწყერით წარმოქმნილი ტალღების გაანგარიშება შესაძლებელია შემდეგი ფორმულის საშუალებით

$$\eta(x,t) = \frac{V_0 h_0}{l} t + \frac{2V_0}{l} \sum_{n=1}^{N_x} E_n \frac{A_n}{a_n^2} \frac{\sin \gamma_n t}{\gamma_n} \quad (3.43)$$

$$\eta(x,t) = \frac{V_0 h_0 t_0}{l} + \frac{4V_0}{l} \sum_{n=1}^{N_x} E_n \frac{A_n}{a_n^2} \frac{\sin \gamma_n t_0}{2} \cos \gamma_n (t - \frac{t_0}{2})$$

სადაც $E_n = \frac{\cos a_n x}{\cos a_n h}$; $A_n = \operatorname{ch} a_n h - \operatorname{cha}_n(h_0 - h) + a_n h_0 \operatorname{sha}_n(h_0 - h)$;

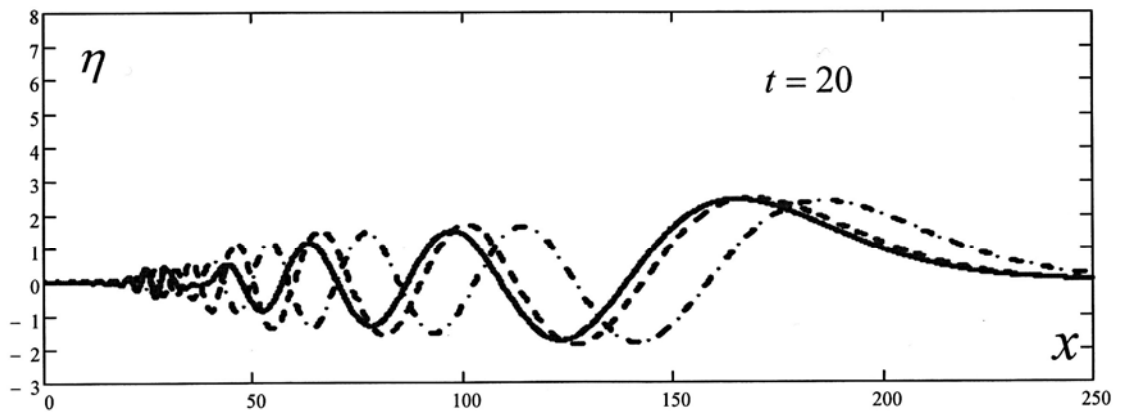
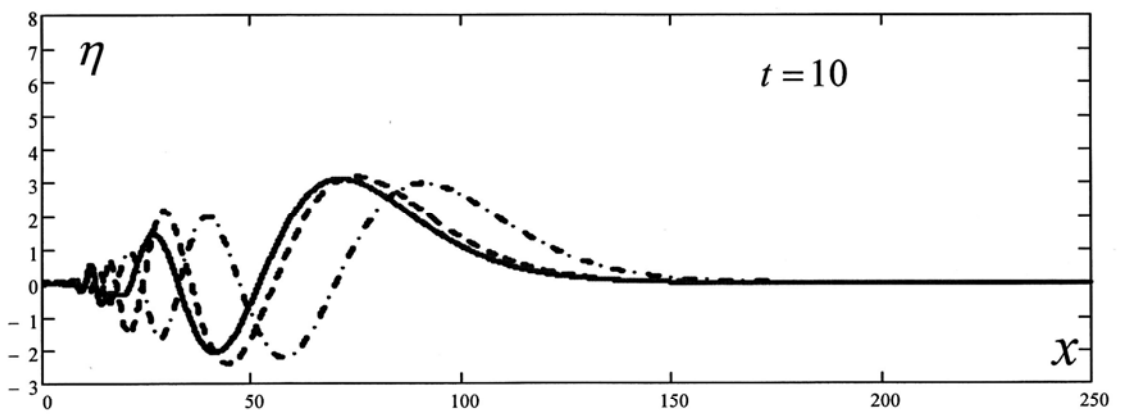
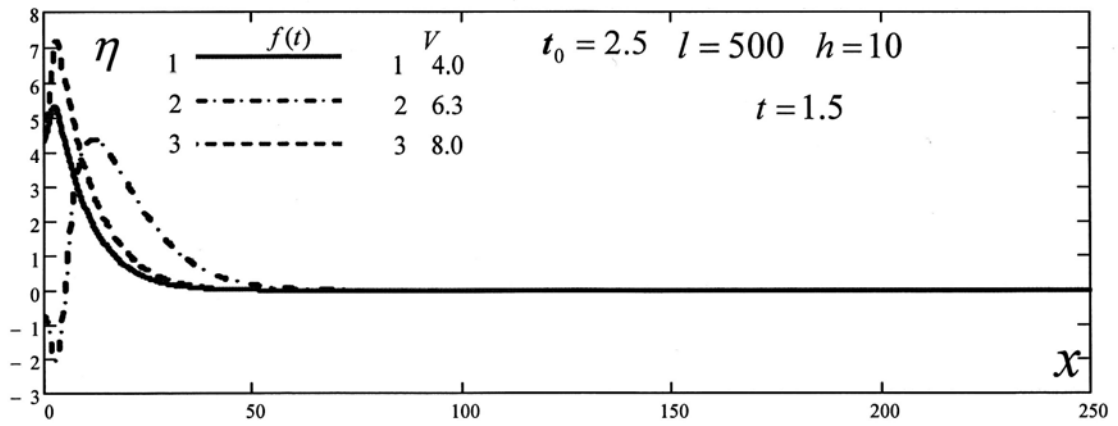
$$\gamma_n^2 = a_n g \operatorname{th} a_n h; \quad a_n = \frac{n\pi}{l}; \quad n=1,2,3,\dots$$

N_x არის იმ n -ის მნიშვნელობა, რომელიც უზრუნველყოფს გაანგარიშებათა შედეგების სიზუსტეს.

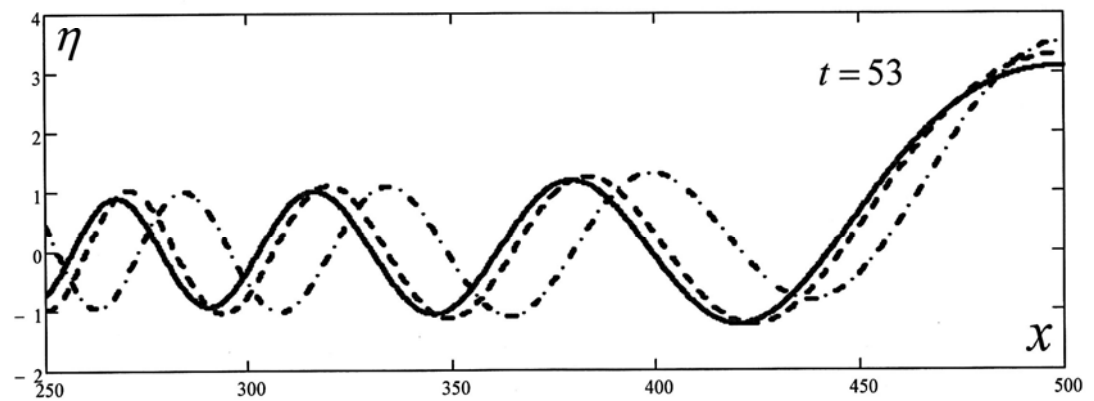
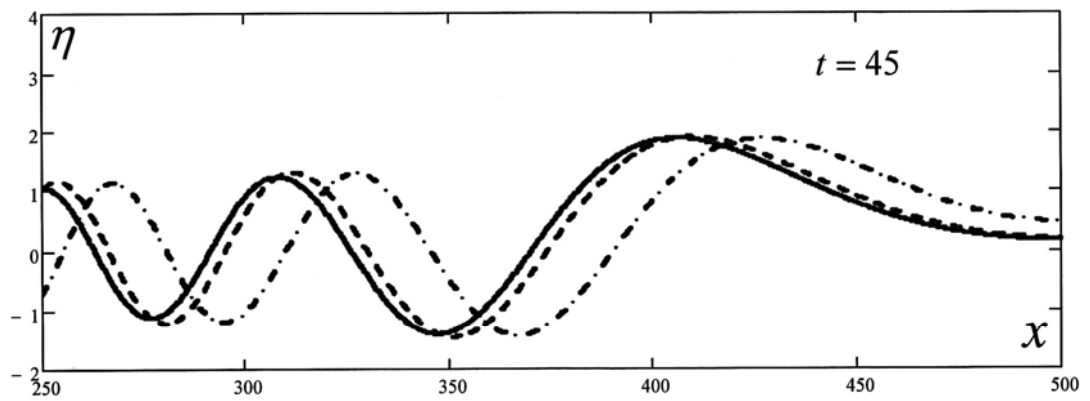
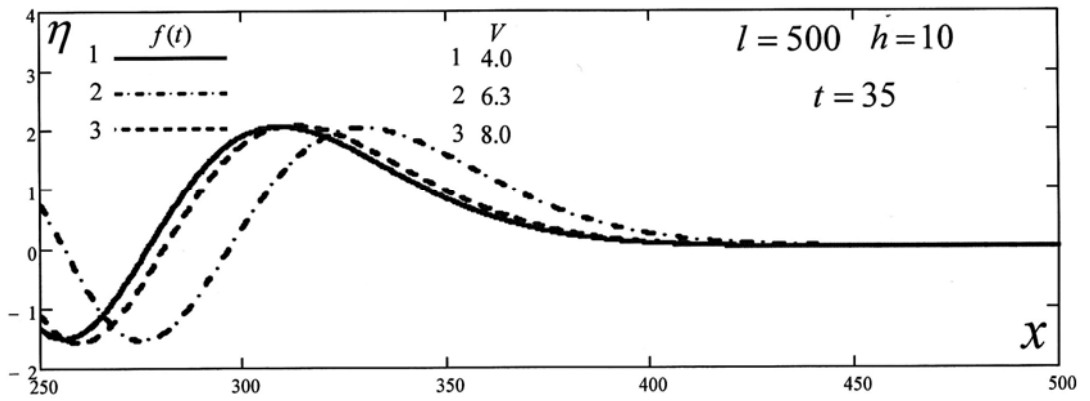
როგორც ამ განტოლებიდან ჩანს, ყოველი მოცემული V_0, h_0, t_0, l და h პარამეტრის მნიშვნელობისათვის შეიძლება გაანგარიშებული იყოს $\eta(x,t)$ ფუნქცია. ამასთან, მოცემული t მომენტში შეიძლება განისაზღვროს ტალღის პროფილი ანუ $\eta(x)$ ფუნქცია (ნახ. 6-7), ხოლო მოცემული (ფიქსირებული) x კოორდინატისათვის – ტალღის ამპლიტუდის ცვლილება დროში ანუ $\eta(t)$ ფუნქცია.

წყალსაცავის მოცემულ x წერტილში (მაგალითად კაშხალთან, როცა $x = l$) და რომელიმე ფიქსირებულ დროის მომენტისათვის (მაგალითად, როდესაც კაშხალთან მოსული ტალღის ამპლიტუდა აღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას η_{\max}), (3.43) განტოლების მიხედვით შეიძლება დავასკვნათ, რომ η_{\max} სიდიდე წარმოადგენს შემდეგ ფუნქციას

$$\eta_{\max} = f(V_0, h_0, t_0, l, h) \quad (3.44)$$



ნახ. 6. ტალღური პროცესები სხვადასხვა დროის მომენტში $f(t)$ ფუნქციის გათვალისწინებით



ნახ. 7. გალღური პროცესები სხვადასხვა დროის მომენტში $f(t)$ ფუნქციის გათვალისწინებით

მოცემული ტალღური პროცესის შესწავლის გაადვილების მიზნით, მიზანშეწონილია, (3.43) საანგარიშო ფორმულაში შემავალი პარამეტრები გამოისახოს უგანზომილებო ფორმით, შემდეგნაირად

$$V_0^* = \frac{V_0}{\sqrt{gh}}, \quad t_0^* = t_0 \sqrt{\frac{g}{h}}, \quad h_0^* = \frac{h_0}{h},$$

$$l^* = \frac{l}{h}, \quad x^* = \frac{x}{h}, \quad t^* = t \sqrt{\frac{g}{h}}, \quad \eta^* = \frac{\eta}{h} \quad (3.45)$$

ამ შემთხვევაში (3.44) გამოსახულება ჩაიწერება შემდეგი სახით

$$\eta^*_{max} = f(V_0^*, h_0^*, t_0^*, l^*) \quad (3.46)$$

როგორც ზემოთ აღინიშნა წყალსაცავში შემოსული მეწყერის მასის სისქე ხასიათდება D პარამეტრით, რომლის სიდიდე $D = V_0 t_0$. უგანზომილებო სახით, ეს პარამეტრი ანალოგიურად ჩაიწერება, მართლაც

$$D^* = \frac{D}{h} = \frac{V_0}{\sqrt{gh}} t_0 \sqrt{\frac{g}{h}} = \frac{V_0 t_0}{h} = V_0^* t_0^* \quad (3.47)$$

ამ ტოლობის გათვალისწინებით, (3.46) ფუნქცია კიდევ უფრო გამარტივდება და შეიძლება წარმოდგენილი იყოს შემდეგი სახით

$$\frac{\eta^*_{max}}{D^*} = f_1(h_0^*, t_0^*, l^*) \quad (3.48)$$

ზემოაღნიშნულთან დაკავშირებით, საძიებელი $\frac{\eta^*_{max}}{D^*}$ სიდიდე გარდა h_0^*, t_0^* და l^* პარამეტრებისა დამოკიდებული იქნება, აგრეთვე $F(z)$ და $f(t)$ ფუნქციების სახეზე. ამავე დროს, უნდა აღინიშნოს, რომ ტალღა განიცდის ცვლილებას წყალსაცავის სიგრძის (x -ღერძის) მიხედვით (იცვლება ფორმა, მისი სიმაღლე). ყველა ეს ფაქტორი საჭიროებს დეტალურ შესწავლას, რაც ხორციელდება შემდეგ თავში.

თავი 4. წყალსაცავებში გენერირებული ტალღების პარამეტრების პრობნოზი

4.1. მეწყერთა გამოწვეული ტალღის ტრანსფორმაციის ძირითადი ნიშნები. მეწყერული ტალღის სიბრძის შეფასება

როგორც წინა თავში იყო აღნიშნული, წყალსაცავში გენერირებული ტალღური მოძრაობა წარმოადგენს რთულ პროცესს, არა მხოლოდ იმიტომ, რომ ის დამოკიდებულია მთელ რიგ საწყის პარამეტრების სიდიდეზე, რომლებიც წინასწარ ზუსტად ცნობილი არ არის, არამედ იმიტომაც, რომ ეს პროცესი მოიცავს სხვადასხვა ფაზის ერთობლიობას, როგორცაა ტალღის გენერაცია, მისი წყალსაცავში გავრცელება და ტრანსფორმაცია, კაშხალთან ზემოქმედება და არეკვლა, აგრეთვე ტალღების შემდგომი ინტერფერენცია და ა.შ. თითოეული აღნიშნული ფაზა სპეციფიკური ხასიათით განიჩევა.

ბრტყელი ტალღური ამოცანის ზოგადი ანალიზური ამონახსნის (3.22) საფუძველზე ჩვენს მიერ მიღებული კონკრეტული საანგარიშო დამოკიდებულებები, როგორცაა მაგალითად, (3.43) ფორმულა, საშუალებას იძლევა გაანგარიშებათა ციკლის ჩატარების შედეგად აღიწეროს აღნიშნული პროცესი მთლიანობაში, ყველა მისი შემადგენელი ფაზის გათვალისწინებით. ამ მხრივ ანალიზურ ამონახსნებს, მათი პრაქტიკული გამოყენების თვალსაზრისით, უდაოდ უპირატესობა ენიჭება, მწ თეორიის საფუძველზე, მაგალითად, სასრულ-სხვაობითი მეთოდის საშუალებით, მიღებულ ამონახსნებთან შედარებით (იხ. თავი 1), რომელთა გამოყენება მრავალჯერადი გაანგარიშებების ჩატარების მიზნით, ხშირად გარკვეულ სირთულეებს აწყდება და არაეფექტურია.

როგორც ზემოთ იყო ნაჩვენები, ტალღის ამპლიტუდაზე გავლენას ახდენს, როგორც ტალღის წარმომქმნელი ფაქტორები (მეწყერული მასის წყალსაცავში შემოდინების პირობები) ასევე წყალსაცავის ზომები. გარდა ამისა, ტალღა განიცდის ფორმისა და სიგრძის ცვლილებას. ამ ნიშნის მიხედვით შეიძლება წყალსაცავში მისი გავრცელებისას, გამოიყოს ისეთი ზონები, როგორცაა ტალღის გენერაციის, წყალსაცავის შუა ნაწილში გავრცელებისა და კაშხალთან ზემოქმედების (აგორების, არეკვლის) ზონები.

წინა თავში მოყვანილი მსჯელობის გათვალისწინებით, ზოგადი სახით $\frac{\eta^*}{D^*}$ სიდიდე წარმოადგენს შემდეგ ფუნქციას

$$\frac{\eta^*(x^*, t^*)}{D^*} = f_1[h_0^*, t_0^*, l^*, F^*(z), f^*(t)] \quad (4.1)$$

ქვემოთ განიხილება (4.1) გამოსახულებაში შემავალი ყველა პარამეტრის გავლენის ხარისხი წყალსაცავში მეწყერით გამოწვეულ ტალღურ პროცესზე.

როგორც ჩვენი ცხოვრებისეული პრაქტიკა და ინტუიცია გეკარნახობს, ასევე (3.43) ფორმულით გაანგარიშების შედეგები ადასტურებენ, ტალღა დასწყისში თავის წარმოქმნის (გენერაციის) ადგილას ანუ ფერდობის ან ბორცის კვეთში (სადაც ხდება მეწყერული მასის შემოდინება) მაქსიმალურ სიდიდეებს აღწევს, მისი პროფილი შევიწროებულია და ფერდობი შედარებით დიდი დახრილობით ხასიათდება. ამ ადგილიდან წყალსაცავში გავრცელებისას, ტალღა თანდათან იშლება, ხოლო მისი ამპლიტუდა მცირდება. კაშხალთან მიახლოებისას კი, თავს იჩენს არეკვლის ფაქტორი, რის გამო ტალღის პროფილი ისევ ვიწროვდება. კაშხალზე ტალღის მიგორვითი მოძრაობის შედეგად, აქ წყლის დონე თანდათანობით იწევს და აღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას $\eta_{\max d}$, რის შემდეგ დონე მცირდება, ტალღის კაშხლიდან არეკვლის გამო. ამასთან დაკავშირებით აღვნიშნავთ, რომ თუ ტალღა საკმარისად მაღალია, მისი კასხალთან ზემოქმედების შედეგად შეიძლება მოხდეს მისი გადაღვრა კაშხლის ქიმზე, რაც ადგილობრივი მასალისაგან აგებული კაშხლების შემთხვევაში დაუშვებელია, მისი შესაძლო წარეცხვის გამო.

ამ მსჯელობის დამადასტურებელია ნახ. 6-7 მოყვანილი გაანგარიშებათა შედეგები, რომლებიც ასახავენ მეწყერით გენერირებული ტალღის პროფილს წყალსაცავის სხვადასხვა უბანზე შესაბამის დროის მომენტებში ($t = 1.5, \dots, 53$ წმ).

აღნიშნული გაანგარიშებები ჩატარებული იყო საანგარიშო პარამეტრების შემდეგი მნიშვნელობებისათვის $l = 500$ მ, $h = 10$ მ, $h_0 = 5$ მ. შესაბამისი უგანზომილებო პარამეტრები ტოლია

$$l^* = \frac{l}{h} = 50, \quad h_0^* = \frac{h_0}{h} = 1, \quad F^*(z) = -V_{\max}^* z^* ;$$

მეწყერული ტანის მაქსიმალური სიგანე იყო $D = V_{\max} t_0 = 10$ მ ტოლი. ავიღოთ, მეწყერული მასის წყალსაცავში შემოდინების ხანგრძლივობის “უგანზომილებო” პარამეტრი შემდეგი ოთხი სხვადასხვა მნიშვნელობის ტოლი

$$t_0^* = t_0 \sqrt{\frac{g}{h}} = 2,5; 5,0; 7,5; 10$$

ამ მაგალითებისათვის აღებული უგანზომილებო პარამეტრების l^* და t_0^* სიდიდეები, შეიძლება შეესაბამებოდეს კერძოდ, იმ განზომილებიან პარამეტრების (l , t_0 და h) მნიშვნელობებს, რომლებიც ქვემოთ მოყვანილ ცხრილში არის წარმოდგენილი

ცხრილი 2

$l^* = 50$		$t_0 = t_0^* \sqrt{\frac{h}{g}}, \text{ წმ}$				$\sqrt{\frac{h}{g}}$
$h, \text{ მ}$	$l, \text{ მ}$	t_0^*				
		2,5	5,0	7,5	10,0	
10	500	2,5	5,0	7,6	10,1	1,01
20	1000	3,6	7,2	10,7	14,3	1,43
30	1500	4,4	8,8	13,1	17,5	1,75
40	2000	5,1	10,1	15,2	20,2	2,02
50	2500	5,7	11,3	17,0	22,6	2,26

როგორც ამ ცხრილიდან ჩანს, $l^* = 50$ მნიშვნელობა, რომელიც აიღებოდა გაანგარიშებისას, შეესაბამება მცირე წყალსაგების ზომებს (როცა h და l იცვლება $h = 10 \div 50$ მ და $l = 500-2500$ მ ფარგლებში), რაც დამახასიათებელია, სამელიორაციო დანიშნულების წყალსაცავებისათვის.

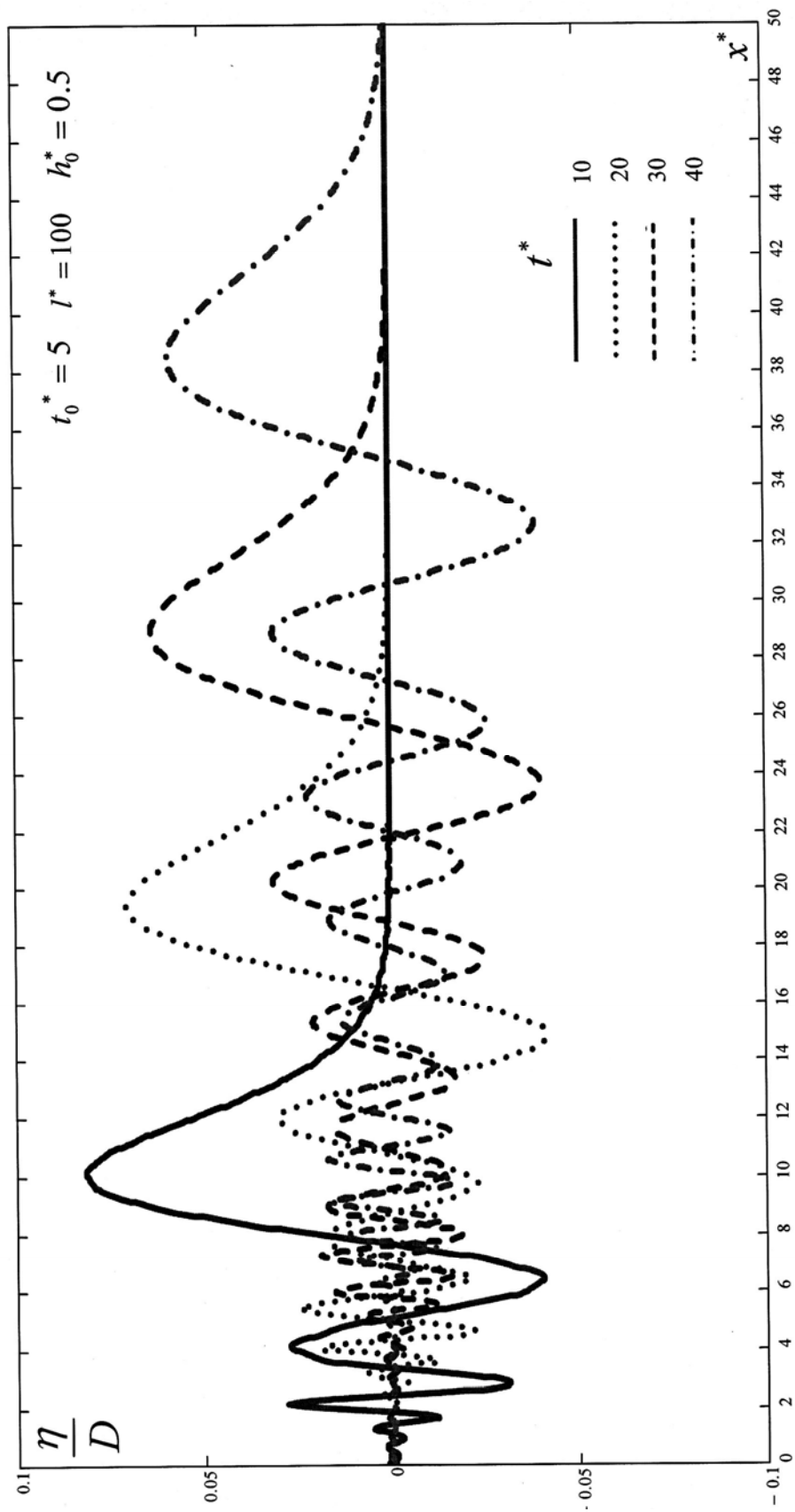
როგორც ჩვენს მიერ აგებული გრაფიკები (ტალღის პროფილები) გვიჩვენებენ, ტალღას მაქსიმალური ამპლიტუდა (η_{\max}) გააჩნია მეწყერის კვეთში ($x = 0$) იმ შემთხვევაში, როდესაც მეწყერის მასის სწრაფი

შემოდინება ხდება ($t_0^* \leq 2,5$). ამ შემთხვევაში, მოპირდაპირე კვეთში – კაშხალთან ტალღის ამპლიტუდა $\eta_{\max d}$ ოდნავ ნაკლებია η_{\max} სიდიდეზე.

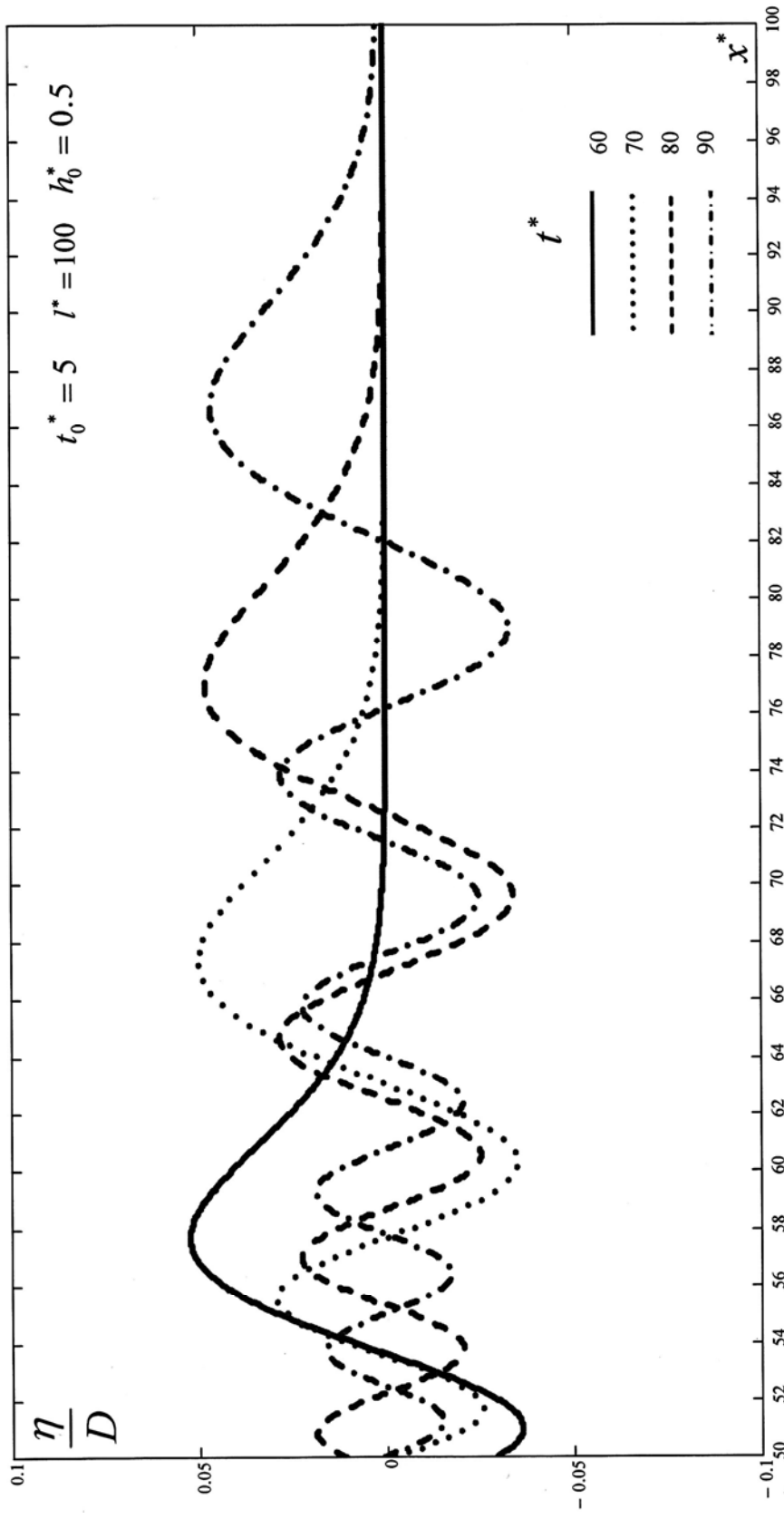
მეწყერის შემოდინების პროცესის ხანგრძლივობის ზრდასთან ერთად ($t_0^* \geq 2,5$) (ნახ. 8-10), საწყის კვეთში ($x = 0$), ტალღის ამპლიტუდა შედარებით ნაკლები ხდება. სამაგიეროდ, მატულობს კაშხალთან წყლის დონის აწევა და სწორედ აქ აღინიშნება ტალღის მაქსიმალური ამპლიტუდა (წყალსაცავის სხვა კვეთებთან (კერძოდ, $x = 0$ კვეთთან) შედარებით (ნახ. 10), როდესაც $t_0^* = 10$, ტალღის ამპლიტუდა $x = 0$ კვეთში თითქმის 2-ჯერ ნაკლებია კაშხალთან ტალღის ამპლიტუდასთან $\eta_{\max d}$ შედარებით.

ტალღა გავრცელებისას წყალსაცავში (საწყის კვეთიდან ($x = 0$) კაშხლისაკენ ($x = l$), მისი სიმაღლე ყველაზე უფრო ინტენსიურად მცირდება, მაშინ როდესაც $t_0^* = 2,5$. ამ პარამეტრის გაზრდასთან ერთად, ტალღის ამპლიტუდის შემცირების (ტრანსფორმაციის) ხარისხი მცირდება და $t_0^* = 10$ დროს, ამპლიტუდების ცვლილება ტალღის გავრცელებისას (კაშხალთან არეკვლამდე), თითქმის არ აღინიშნება. ამ დასკვნას ადასტურებს ნახ.11 და ნახ.12.

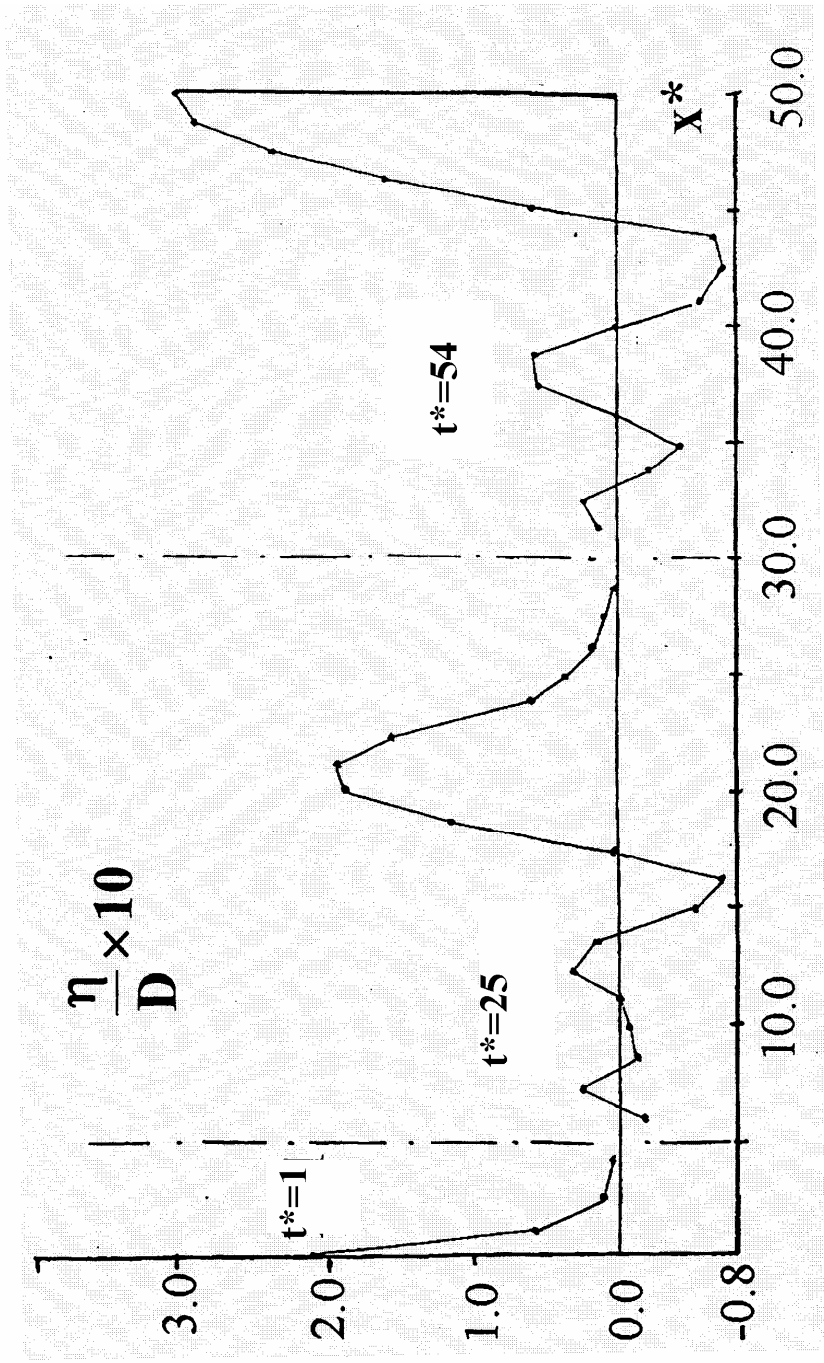
როგორც ზემოთ აღინიშნა, წყალსაცავის შუა ნაწილის ფარგლებში ტალღის სიგრძე იზრდება, მისი ფერდობი (პროფილში) უფრო დამრეცი ხდება. ამასთან, ტალღის პროფილზე გავლენას ახდენს t_0^* პარამეტრის მნიშვნელობა. სახელობრ, შედარებით სწრაფი მეწყერის შემთხვევაში ($t_0^* = 2,5 \dots 5,0$), ტალღის პროფილის დამახასიათებელი ნიშანია ის, რომ პირველი ტალღის შემდეგ, მის კუდში, ჩნდება მკვეთრად გამოხატული წყლის დონის რყევები (ონდულაციები) (ნახ. 6-9); t_0 – პარამეტრის მნიშვნელობის გაზრდასთან ერთად, ეს რყევები მცირდება და ტალღა “ცალმაგი” ტალღის სახით გრცელდება.



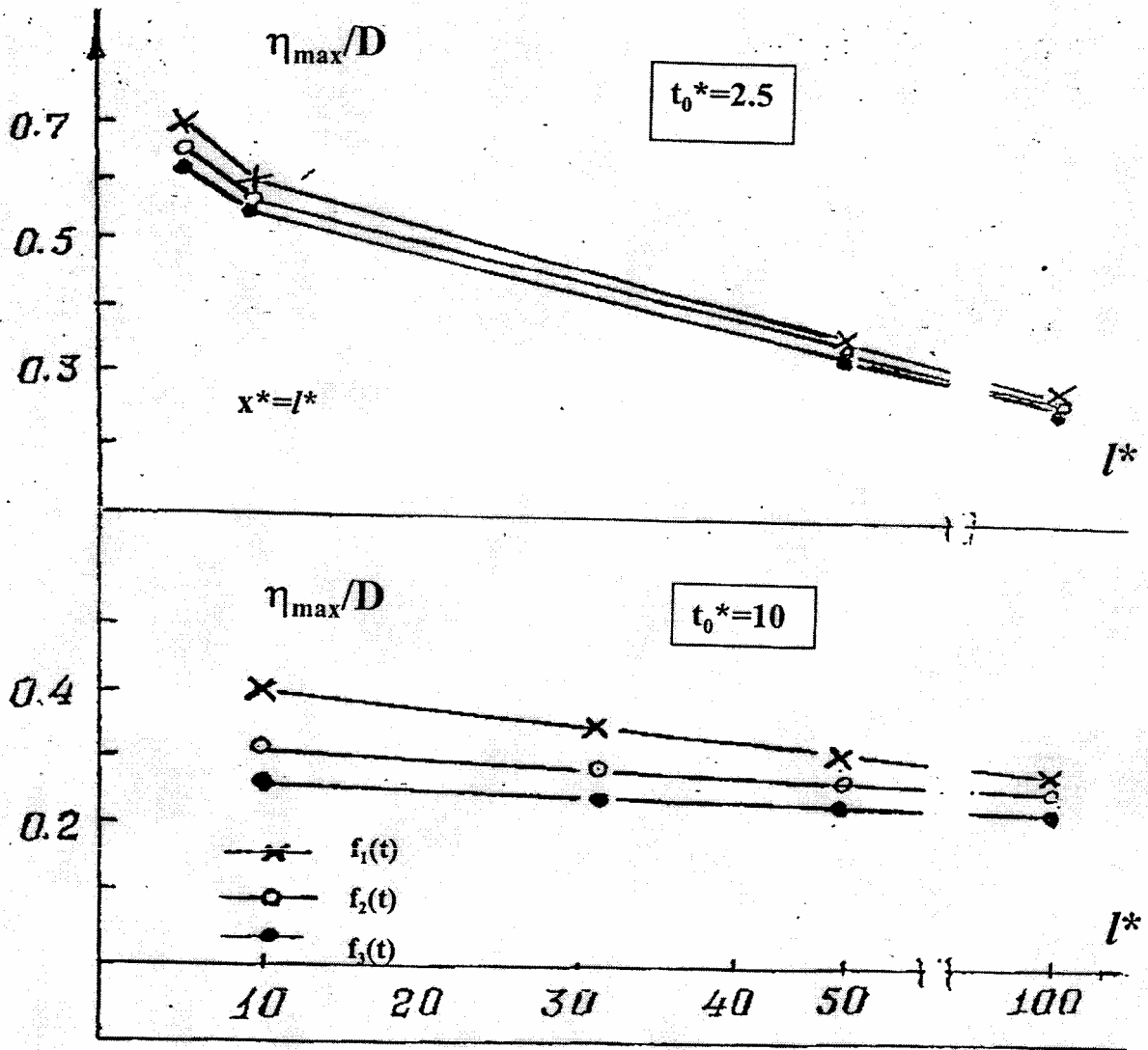
ნახ. 8. მეწვერული ტალღის ფარდობითი მნიშვნელობის უმცირესა x^* სიდიდის მიმართ სხვადასხვა დროის მომენტებისათვის



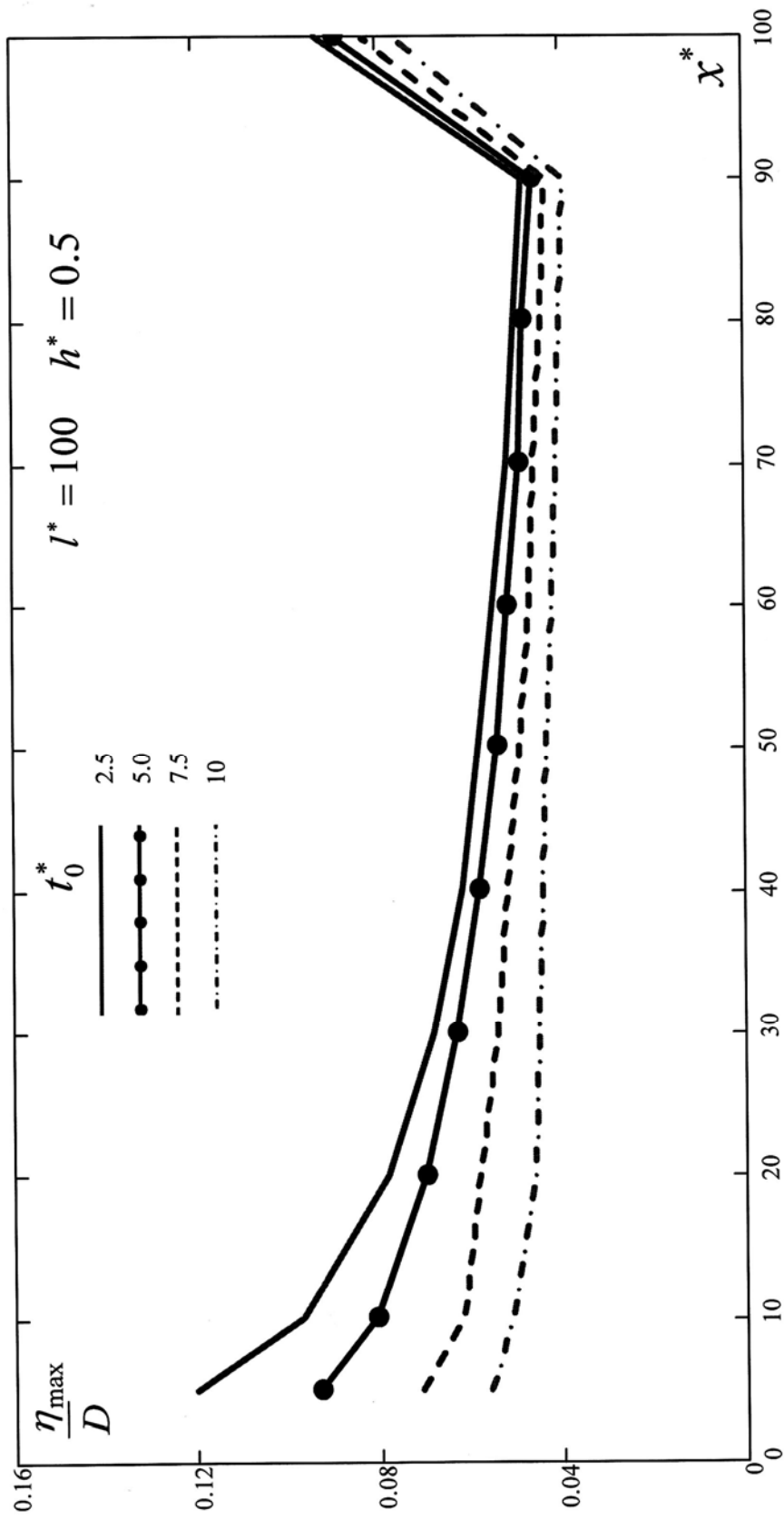
ნახ. 9. მეწვერული ტალღის ფარდობითი მნიშვნელობის შემცირება x^* სიდიდის მიმართ სხვადასხვა დროის მომენტებისათვის



ნახ. 10. პრტყელი მეწერული ტალღის პროფილები წყალსაცავის სხვადასხვა x^* უბანზე შესაბამის მნიშვნელობებისათვის ($t^* = 1; 25; 54$); $l^* = 50$; $D = 10$ მ; $t_0^* = 5.0$)



ნახ. 11. დამოკიდებულება η_{\max}/D სიდიდისა და $l^* = l/h$ პარამეტრს შორის სხვადასხვა $f(t)$ ფუნქციის დროს



ნახ. 12. ტალღის ფარდობითი მაქსიმალური ამპლიტუდის ცვლილება χ^* მიხედვით სხვადასხვა t_0^* შემთხვევაში. $f(t) = \cos(\beta \cdot t)$

ზოგად შემთხვევაში, ზემოთ აღნიშნულთან დაკავშირებით, არ იქნება კორექტული საუბარი მეწყერული ტალღის სიგრძის ან მისი ფაზური სიჩქარის შესახებ. ამის მიუხედავად, როგორც ჩვენს მიერ აგებული ტალღის პროფილები ადასტურებენ, პრაქტიკულად შესაძლებელია გამოყოფილ იქნას პირველი ტალღა, რომლის პროფილი მნიშვნელოვან ცვლილებას არ განიცდის გავრცელებისას $0x$ ღერძის გასწვრივ წყალსაცავის შუა ნაწილის ფარგლებში. ამიტომ, ამ ტალღისათვის (ეს არის პირველი ტალღის თხემი) შესაძლებელია დადგენილ იქნას მიახლოებით, როგორც მისი სიგრძისა, ასევე სიჩქარის გასაშუალებელი მნიშვნელობები.

გამოყენებული თეორიული მიდგომების ჩარჩოებში შესაძლებელია მიღებული იყოს ანალიზური გამოსახულება მეწყერით გენერირებული ტალღის სიგრძის λ_c განსაზღვრის მიზნით. ამავე დროს, ყოველ კონკრეტულ შემთხვევაში, ამ ტალღის სიგრძე შეიძლება შეფასდეს გაზომვის შედეგად, უშუალოდ გრაფიკიდან, რომელიც გამოსახავს ტალღის პროფილს.

ასეთი გრაფიკები აგებული იყო [94] იმ შემთხვევისათვის, როდესაც $l^* = 50$; $h_0^* = 1$; $D = 10$ მ, ხოლო $t_0^* = 2,5; 5,0; 7,5; 10$.

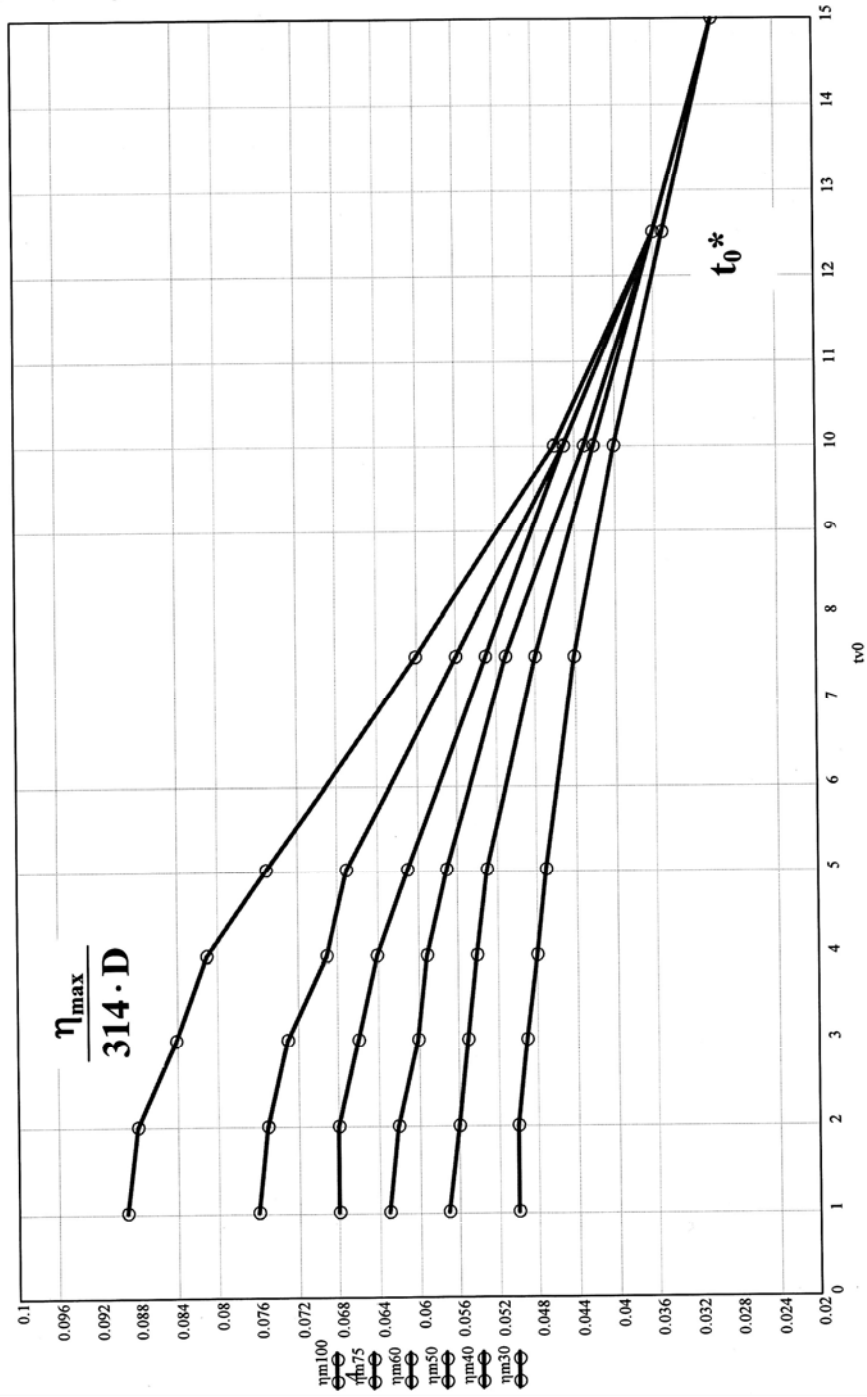
აღნიშნული პირველი ტალღის თხემის საშუალო სიგრძის λ გასაანგარიშებლად ამავე შრომაში მიღებული იყო შემდეგი ფორმულა

$$\lambda^* = 10.5 + 0.5t_0 \quad (4.6)$$

ჩვენს მიერ განსაზღვრულ იქნა აღნიშნული ტალღის სიგრძეები l^* და t_0^* პარამეტრების ცვლილების ფართო დიაპაზონში (იხ. ცხრილი 3 და ნახ.13).

ცხრილი 3

		λ^*												
t_0^*	I^*	1	2	3	4	5	7.5	10	12.5	15				
100		14.405	14.852	15.201	15.647	16.25	16.674	17.945	18.884	20.696				
75		13.288	13.50	13.841	14.27	14.77	15.395	16.329	18.006	19.796				
60		12.176	12.499	12.797	13.189	13.802	14.493	15.596	17.371	19.031				
50		11.381	11.747	12.126	12.579	13.093	13.788	15.12	16.878	18.539				
40		10.134	10.78	11.165	11.508	12.122	12.892	14.551	16.059	17.926				
30		9.44	9.626	9.947	10.355	10.942	11.971	13.771	15.405	--				
20		7.841	8.157	8.577	8.867	9.572	11.201	--	--	--				
15		7.142	7.398	7.552	8.137	8.951	--	--	--	--				
10		5.496	5.868	6.468	--	--	--	--	--	--				



ნახ.13. მეწვერული ტაღლის კაშხალზე აგორების მაქსიმალური ფარდობითი ამპლიტუდების დამოკიდებულება t_0^* პარამეტრის მნიშვნელობაზე სხვადასხვა I^* სიდიდეებისათვის

4.2. ტალღის "ფაზური" სიჩქარის შეფასება

საინტერესოა აღინიშნოს, რომ ნახ. 8-9 (როდესაც $l^* = 100$ და $t_0^* = 5$) წარმოდგენილი გრაფიკები საშუალებას იძლევა შევაფასოთ აგრეთვე მეწყერთ გენერირებული ტალღის ფაზური სიჩქარე. თუმცა უნდა გვახსოვდეს ზემოაღნიშნულის თანახმად, რომ მეწყერულ ტალღის სიჩქარისათვის ფაზური სიჩქარის ტერმინის მინიჭება პირობითია.

როგორც ცნობილია [3, 98], გრძელი ტალღების ფაზური სიჩქარე გამოითვლება ფორმულით;

$$C = \sqrt{gh}$$

რაც შეეხება ნაკლები სიგრძის ტალღებს, ისინი მოძრაობენ უფრო მცირე სიჩქარით [6, 100]. ტალღის ფაზური სიჩქარის განსაზღვრა, თუ ცნობილია ტალღის რომელიმე წერტილის (მაგალითად თხემის) მიერ გავლილი მანძილი (Δx) დროის Δt განმავლობაში, მარტივად ხორციელდება

$$C = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

ჩვენს შემთხვევაში, ტალღის ფაზური სიჩქარის გამოანგარიშება ანალოგიურად წარმოებს. ასე, მაგალითად, ნახ. 8-დან ჩანს, რომ $t_1^* = 10$ მომენტში მეწყერთ წარმოქმნილი ტალღის თხემი, რომელიც დაშორებულია ბორტიდან $x^* = 9$, გადაადგილდა $x^* = 28$ კვეთში, ანუ $\Delta x^* = 19$ მანძილზე, $\Delta t^* = t_2^* - t_1^* = 30 - 10 = 20$ დროის მონაკვეთში (ჩვენ აქ, უგანზომილებო სიდიდეებს პირობითად ვუწოდებთ როგორც განზომილებიანს). მაშასადამე, მეწყერული ტალღის თხემის გაგრძელების სიჩქარე C_l ტოლი იქნება

$$C_l = \frac{\Delta x^* \sqrt{gh}}{\Delta t^* \sqrt{h}} = \frac{19}{20} \sqrt{gh} = 0.95 \sqrt{gh} = 0.95C$$

ეხლა ვნახოთ, რა სიჩქარით გადაადგილდება ტალღის თხემი $x^* = 57$ კვეთიდან (ნახ. 9) $x^* = 76,5$ კვეთამდე, ანუ $\Delta x^* = 76,5 - 57 = 19,5$ მანძილზე. ეს ხდება $\Delta t^* = 20$ დროის მონაკვეთში. ამგვარად, მიიღება, რომ

$$C_l = \frac{\Delta x^* \sqrt{gh}}{\Delta t^*} \sqrt{\frac{g}{h}} = \frac{19.5}{20} = 0.975C \approx C$$

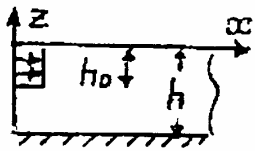
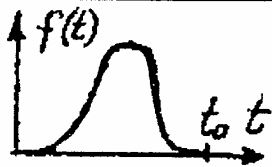
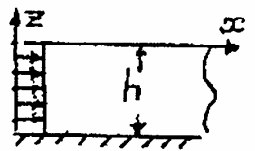
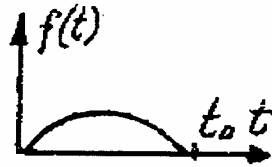
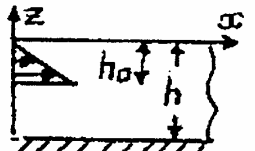
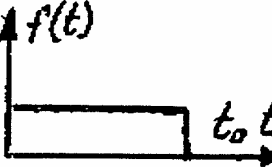
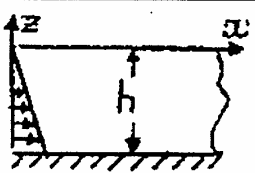
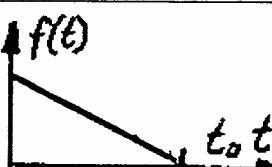
ამგვარად, შეიძლება გაკეთდეს შემდეგი დასკვნა: მეწყერთა გენერირებული ტალღა ფარავს მანძილს (გენერაციის ზონაში $x^* = 9...28$) ისეთი სიჩქარით, რომელიც 5%-ით ნაკლებია გრძელი ტალღის გავრცელების სიჩქარეზე ($C = \sqrt{gh}$). ეს ნიშნავს იმას, რომ მეწყერული ტალღის სიგრძე ამ დროს ნაკლებია მკვეთრად გამოხატული ტალღის სიგრძეზე. გზის დანარჩენ მანძილზე კაშხლისაკენ ($x^* = 57 \dots 76,5$), ტალღა ვრცელდება 2.5% სიზუსტით გრძელი ტალღის C სიჩქარესთან შედარებით.

4.3. მეწყერის კინემატიკური და წყალსაცავის ბეომეტრიული პარამეტრების ბავშვანა ტალღურ პროცესზე

ამ მიზნის მიღწევა შესაძლებელია გაანგარიშებათა ჩატარებით მე-3 თავში ჩვენს მიერ მიღებული ანალიზური დამოკიდებულებების საფუძველზე, საანგარიშო პარამეტრების მნიშვნელობათა ვარიაციის პირობებში. ამასთან, მიღებული მონაცემების შედარების გზით შეიძლება დადგინდეს იქნას ამ პარამეტრების გაუქმების ხარისხი ტალღურ პროცესზე წყალსაცავში, კერძოდ კი კაშხალთან. ამ ანალიზის გაადვილების მიზნით ცხრ. 4-ში მოყვანილია სხვადასხვა $F(z)$ და $f(t)$ ფუნქციის მნიშვნელობა, რომლებიც ახასიათებენ მეწყერული მასის წყალსაცავში ფერდობის (ან ბორცის) მხრიდან შემოდინების (ან შესაბამისი მოცულობის წყლის გამოდენის) პროცესს. როგორც ზემოთ აღინიშნა, h_0 პარამეტრი ახასიათებს მეწყერული მასის შემოდინების სისქეს. მისი სიდიდე წინასწარ ჩვენთვის უცნობია. სავარაუდოა, რომ მეწყერული მასის შედარებით მცირე სიჩქარით შემოდინებისას ან როცა მეწყერი თავისი მოძრაობის დაწყებამდე წყლით იყო დაფარული, მაშინ h_0 სიდიდე შედარებით დიდია და შეიძლება აღებული იყოს წყალსაცავის სიღრმის ტოლი (ანუ $h_0^* = \frac{h_0}{h} = 1$). როდესაც პოტენციური მეწყერი მდებარეობს წყლის დონიდან გარკვეულ სიმაღლეზე ან მისი მხოლოდ მცირე ნაწილია

წყლით დაფარული, მაშინ მიზანშეწონილია ამ პარამეტრის აღება ისე, რომ $h_0^* < 1$.

ცხრილი 4

№	სქემა	$F(z)$	№	გრაფიკული სახე	$f(t)$
A		$V_0,$ $-h_0 \leq z \leq 0$	1		$0,5(1 - \cos \frac{2\pi}{t_0} t)$ $0 \leq t \leq t_0$
B		$V_0,$ $-h \leq z \leq 0$	2		$\sin \frac{\pi}{t_0} t,$ $0 \leq t \leq t_0$
C		$-\frac{V_{\max}}{h_0} z$ $-h_0 \leq z \leq 0$	3		1, $0 \leq t \leq t_0$
D		$-\frac{V_{\max}}{h} z$ $-h_0 \leq z \leq 0$	4		$1 - \frac{t}{t_0},$ $0 \leq t \leq t_0$

ამ მიზეზით იყო განპირობებული გაანგარიშებათა ჩატარება [95], იმ შემთხვევისათვის, როდესაც $h_0^* \leq 1,0$. ეს ანგარიშები ჩატარებული იყო ფორმულებით, რომლებშიც $F(z)$ ფუნქცია აიღებოდა A სქემის, ხოლო $f(t)$ ფუნქცია №3 გრაფიკის მიხედვით (იხ. ცხრ. 4). ამ შემთხვევაში, წყალსაცავის ფარდობითი სიგრძე ტოლი იყო $l^* = 20$, ხოლო მეწყერის წყალში შემოსვლის ფარდობითი ხანგრძლივობა აიღებოდა $t_0^* = 5,0$ ტოლი. იმისათვის, რომ შესრულებული ყოფილიყო პირობა, რომ სხვადასხვა მნიშვნელობის h_0^* პარამეტრის დროს, შემოდინებული მეწყერული მასის მოცულობა ცვლილებას არ განიცდის, აიღებოდა შესაბამისი D^* მნიშვნელობები (იხ. ცხრ. 5), რაც გამოიხატებოდა პირობიდან, რომ

$$W = V_0 t_0 h_0 = D h_0 = \text{const}$$

ვინაიდან, გაანგარიშების დროს მაგალითის სახით აღებული იყო $h = 50$ მ, $W = 500$ მ² ტოლი, ანუ $W^* = D^* h_0^* = 0,2$, ამიტომ

$$D^* = \frac{0,2}{h_0^*}$$

თითოეული h_0^* მნიშვნელობისათვის (იხ. ცხრ. 5) აგებული იყო [95] ტალღური პროფილები ორი შემთხვევისათვის, როდესაც ტალღის თხემი იმყოფებოდა დაახლოებით წყალსაცავის შუაში ($t^* = 13$) და როდესაც ადგილი ჰქონდა წყლის მაქსიმალურ დონის აწვევის კაშხალთან ($t^* = 24,2$).

ცხრილი 5

h_0^*	1	0,8	0,5	0,4	0,3	0,2
$D = \frac{0,2}{h_0^*}$	0,2	0,25	0,4	0,5	0,667	1,0

როგორც ეს გრაფიკები მოწმობს, h_0^* პარამეტრების სიდიდე გარკვეულ გავლენას ახდენს წარმოქმნილი მეწყერული ტალღის სიმაღლეზე, ამასთან, ეს გავლენა იზრდება h_0^* პარამეტრის სიდიდის შემცირებასთან ერთად. კერძოდ, როდესაც h_0^* იცვლებოდა 0,4-0,5 ფარგლებში, ტალღის ამპლიტუდა იზრდება ($h_0^* = 1,0$ შემთხვევასთან შედარებით) დაახლოებით 8-12%-ით.

ამგვარად, თუ პოტენციური მეწყერი არ არის დაფარული წყლით და ის გარკვეულ სიმაღლეზე იმყოფება წყლის დონიდან, ტალღების პროგნოზირების შემთხვევაში გათვლები უნდა წარმოებდეს A სქემის შესაბამისად (ცხრ. 4) და h_0^* საანგარიშო პარამეტრის მნიშვნელობა აღებული უნდა იყოს 0,4...0,5 ფარგლებში.

რაც შეეხება $F(z)$ ფუნქციის გავლენას ტალღური პროცესის ინტენსივობაზე, როგორც ჩვენს მიერ ჩატარებულმა გათვლების მონაცემებმა აჩვენებს, იმ შემთხვევისათვის, როდესაც $F(z)$ ფუნქციის სახე აიღებოდა A და C სქემების (ცხრ. 4) მიხედვით, ეს ფუნქცია უმნიშვნელოდ მოქმედებდა ტალღურ პროცესის ინტენსივობაზე, ამიტომ

გაანგარიშებათა დროს შესაძლებელია $F(z)$ ფუნქცია წარმოდგენილი იყოს A ან C სქემების სახით.

ჩვენი გათვლების შედეგები ადასტურებენ, რომ $F(z)$ ფუნქციისაგან განსხვავებით, $f(t)$ ფუნქციის გაგლენა ტალღების ამპლიტუდაზე, კერძოდ კი მაქსიმალურ ამპლიტუდაზე კაშხალთან (η_{maxd}) საგრძნობია, რომ შემთხვევაში, როდესაც მეწყერული პროცესი შედარებით ნელა მიმდინარეობს ($t_0^* = 10$). ამას გვიჩვენებენ გრაფიკები, რომლებიც ასახავენ ფუნქციონალურ დამოკიდებულებას $\frac{\eta_{max}}{D} = f(I^*)$ ორი შემთხვევისათვის, როდესაც $t_0^* = 2,5$ და $t_0^* = 10,0$ (ნახ. 11). ამასთან, $f(t)$ ფუნქცია აიღებოდა სამი სხვადასხვა №1, №2, №3 გრაფიკების სახით (ცხრ. 4) და აღინიშნებოდა შესაბამისად, როგორც $f_1(t)$, $f_2(t)$ და $f_3(t)$ ფუნქციები.

ამრიგად, წყალსაცავებში მეწყერით წარმოქმნილი ტალღების მაქსიმალური ამპლიტუდების საიმედოდ გაანგარიშების მიზნით, შესაბამის ფუნქციონალურ დამოკიდებულებებში, ცხრ. 4 გათვალისწინებით, უნდა იყოს აღებული:

- $F(z)$ ფუნქცია A (ან C) სქემის მიხედვით;
- $f(t)$ ფუნქცია №3 ან №4 გრაფიკის მიხედვით, ჩქარი მეწყერული პროცესების დროს (როდესაც $t_0^* \leq 2,5$);
- $f(t)$ ფუნქცია 1 ან 4 გრაფიკების მიხედვით შედარებით ნელი მეწყერული პროცესების დროს (როდესაც $t_0^* > 5,0$);
- $h_0^* = 0,4$ ტოლი.

4.4. ჰიდროკვანძების კაშხლებთან მეწყერით განპირობებული წყლის დონეების მაქსიმალური აწევის პრობნოზირება

ზემოთ მოყვანილი შედეგებზე დაყრდნობით, კაშხალთან ტალღების მაქსიმალური ამპლიტუდების საიმედო პროგნოზირების მიზნით, ამ ტალღების გაანგარიშება უნდა ვაწარმოოთ შესაბამისი ანალიზური დამოკიდებულებების საფუძველზე, რომლებშიც სათანადოდ იქნება გათვალისწინებული უპირველეს ყოვლისა, ისეთი პარამეტრების როლი როგორცაა h_0^* და $f(t)$ ფუნქცია.

წყალსაცავში, საწყის კვეთში (ბორტთან) ჩამონგრეული მეწყერული მასის მოცულობა ბრტყელი ამოცანის შემთხვევაში W (სიგანის 1 მ-ზე) მიახლოებით შეიძლება შეფასდეს ასე

$$W = hD.$$

ამ შემთხვევაში იგულისხმება, რომ მეწყერული მასა თანაბრად განაწილებულია წყლის h სიღრმეზე და გააჩნია D სისქე.

როგორც ზემოთ აღინიშნა, W მოცულობის მეწყერით წარმოქმნილი ტალღური პროცესი შეიძლება წარმოვიდგინოთ გენერირებული ამავე W მოცულობის წყლის შემოდინების შედეგად. ამ შემთხვევაში, D სიდიდე ასე შეიძლება გამოისახოს

$$D = V_0 t_0 \quad (4.7)$$

სადაც V_0 – მეწყერული მასის (ან წყლის) შემოდინების სიჩქარეა ფერდობის (ბორტის) მთელ სიღრმეზე.

როდესაც W მოცულობის მეწყერის მასის შემოდინებას ადგილი აქვს არა წყალსაცავის მთელ სიღრმეზე, არამედ მის ნაწილზე, ანუ $h_0 < h$ სიმაღლეზე, მაშინ გვექნება

$$W = hD = H_0 D_1$$

ანუ

$$W = hV_0 t_0 = h_0 V_0' t_0 \quad (4.8)$$

სადაც V_0' – მეწყერული მასის შემოდინების სიჩქარეა ბორტის h_0 სიმაღლეზე.

აქედან მიიღება

$$\frac{h_0}{h} = h_0^* = \frac{V_0}{V_0'}, \quad V_0' = \frac{V_0 h}{h_0} = \frac{V_0}{h_0^*}$$

$$D_1 = \frac{hD}{h_0} = \frac{D}{h_0^*} \quad \text{ე.ი.} \quad D_1^* = \frac{D}{h_0^*} \quad (4.9)$$

ეს ნიშნავს იმას, რომ თუ მაგალითად, h_0 სიმაღლე 4-ჯერ არის ნაკლები წყლის h სიღრმესთან შედარებით (ანუ $h_0^* = 0,25$), მაშინ ამავე სიდიდით უნდა გაიზარდოს V_0' და D_1 პარამეტრი ($\frac{1}{h_0^*} = \frac{1}{0,25} = 4$), რათა უზრუნველვეყოთ $W = hD$ მოცულობის წყლის (ან მეწყერული მასის) შემოდინება.

წინა პარაგრაფში აღნიშნულთან დაკავშირებით, ვინაიდან ტალღური პროცესის საიმედოდ პროგნოზირების მიზნით, საანგარიშო ფორმულებში h_0^* პარამეტრი საჭიროა აღებული იყოს $h_0^*=0,4$ ტოლი, ამიტომ ჩვენს მიერ ხდება $\frac{\eta}{D_1}$ სიდიდეთა გაანგარიშება.

ამავე მიზეზით, წინა პარაგრაფში მიღებული შედეგების თანახმად, როდესაც $t_0^* \geq 5$, $f(t)$ ფუნქცია მიზანშეწონილია, რომ აღებული იქნას №1 გრაფიკის სახით (ცხრ.4), ვინაიდან ამ შემთხვევაში მაქსიმალური ტალღების გაანგარიშება უფრო საიმედო იქნება (მიიღება გარკვეული მარაგით).

ამ შემთხვევაში საანგარიშო ფორმულა, (3.24) – (3.28) გამოსახულებათა გათვალისწინებით, შემდეგ სახეს იღებს

$$\eta(x,t) = \frac{V_0' h_0}{l} I_0(t) + \frac{2V_0'}{l} \sum_{n=1}^N E_n \frac{[\text{sha}_n(h_0 - h) + \text{sha}_n h]}{a_n} I_n(t) \quad (4.10)$$

სადაც $E_n = \frac{\cos a_n x}{\text{cha}_n h}$; $a_n = \frac{n\pi}{l}$;

$$I_0(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(t - \frac{1}{\omega_1} \sin \omega_1 t \right), & \text{როცა } 0 < t < t_0 \\ \frac{1}{2} \left(t_0 - \frac{1}{\omega_1} \sin \omega_1 t_0 \right), & \text{როცა } t \geq t_0 \end{cases}$$

$$I_n(t) = \begin{cases} \frac{\omega_1}{2\gamma_n(\omega_1^2 - \gamma_n^2)} (\omega_1 \sin \gamma_n t - \gamma_n \sin \omega_1 t), & \text{როცა } 0 < t < t_0 \\ \frac{1}{2} \left(t_0 - \frac{1}{\omega_1} \sin \omega_1 t_0 \right) \left[\sin \gamma_n \frac{t_0}{2} \cos \gamma_n \left(t - \frac{t_0}{2} \right) \right], & \text{როცა } t \geq t_0 \end{cases}$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{t_0}; \quad \gamma_n = \sqrt{a_n g t h a_n h}$$

თუ მხედველობაში მიიღება (4.7) და (4.8) ტოლობები, მაშინ (4.10) ფორმულა შეიძლება წარმოდგენილი იყოს ასეთი სახითაც

$$\eta(x,t) = \frac{V_0' t_0 h_0}{t_0 l} I_0(t) + \frac{2V_0' t_0}{t_0 l} \sum_{n=1}^{N_x} \bar{A}_n I_n(t)$$

ანუ
$$\frac{\eta(x,t)}{D_1} = \frac{h_0}{t_0 l} I_0(t) + \frac{2}{t_0 l} \sum_{n=1}^{N_x} \bar{A}_n I_n(t) \quad (4.11)$$

სადაც $\bar{A}_n = E_n \frac{1}{a_n} [\text{sha}_n(h_0 - h) + \text{sha}_n h]$ (წარმოადგენს აღნიშვნას).

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, (4.11) განტოლებაში შემავალი წევრები შეიძლება გამოისახოს უგანზომილებო ფორმით, რაც მიზანშეწონილია სისტემური გაანგარიშებების ჩატარების დროს.

ჩვენს მიერ $\frac{\eta}{D_1}$ სიდიდის გაანგარიშებათა ციკლში საანგარიშო

პარამეტრების ვარირება ხორციელდებოდა შემდეგ ფარგლებში:

$$l^* = \frac{l}{h} = 10 \div 75; \quad t_0^* = t_0 \sqrt{\frac{g}{h}} = 2,5 \div 10,0 \quad \text{სოლო}$$

h_0^* პარამეტრი აიღებოდა $h_0^* = 0,4$ ტოლი.

გაანგარიშებათა მონაცემების დამუშავების შედეგად ჩვენს მიერ მიღებული იყო შემდეგი აპროქსიმაციული ფორმულა

$$\text{როდესაც } 10 \leq l^* \leq 40, \quad 2,5 \leq h_0^* \leq 40,$$

$$\frac{\eta}{D_1} = 0,5[(0,70 - 0,008l^*) - (0,05 - 0,001l^*)t_0^*] \quad (4.12)$$

ამ ფორმულით $\frac{\eta}{D_1}$ სიდიდის გათვლის რამდენიმე მაგალითის

შედეგები ცხრ. 6-შია მოცემული; ამასთან $A = 0,70 - 0,008l^*$ და $B = 0,05 - 0,001l^*$ სიდიდეთა მნიშვნელობები (სხვადასხვა l^* პარამეტრები-სათვის), წარმოდგენილია ამავე ცხრილში, (4.12) ფორმულით გაანგარიშებათა ჩატარების გადაადგილების მიზნით

ცხრილი 6

l^*	A	B	$\frac{\eta}{D_1}$		
			$t_0^* = 2,5$	$t_0^* = 5,0$	$t_0^* = 7,5$
10	0,62	0,04	0,26	0,21	0,16
20	0,54	0,03	0,232	0,195	0,157
30	0,46	0,02	0,205	0,18	0,155
40	0,38	0,01	0,177	0,165	0,152

განვიხილოთ შემდეგი მაგალითი. ვთქვათ საირიგაციო დანიშნულების წყალსაცავში, რომლის საშუალო სიღრმეა $h = 10$ მ, ხოლო სიგანეა $l = 100$ მ, ერთ-ერთი ფერდობის მხრიდან შემოდის $t_0 = 5,0$ წმ-ის განმავლობაში, ფხვიერი ქანებისაგან შემდგარი შედარებით მცირე მეწყერული მასა მოცულობით $W = 50$ მ³ (მეწყერის სიგანის 1 მ-ზე). მეწყერის სიგანეა $B_c = 100$ მ. ამ შემთხვევაში მისი მთლიანი მოცულობა ტოლი იქნება $W_{\text{მთ}} = WB_c = 50 \cdot 100 = 5000$ მ³ აღვნიშნოთ, რომ ამ შემთხვევაში, მეწყერის მასამ შეიძლება შეადგინოს დაახლოებით 9 000 ... 10 000 ტ.

ამოცანის პირობის თანახმად, საჭიროა განისაზღვროს მეწყერის მოპირდაპირე ფერდობზე და კაშხალზე მეწყერული ტალღის მაქსიმალური აგორვის აწევის სიმაღლე η_{maxs} და η_{maxd} შესაბამისად. მეწყერიდან კაშხლამდე მანძილი შეადგენს $L_d = 300$ მ.

ჯერ განისაზღვრება (4.12) ფორმულაში შემავალი უგანზომილებო პარამეტრების მნიშვნელობები:

$$l^* = \frac{l}{h} = \frac{100}{10} = 10; \quad L_d^* = \frac{300}{10} = 30; \quad t_0^* = t_0 \sqrt{\frac{g}{h}} = 5 \cdot \sqrt{\frac{9,81}{10}} = 5 \cdot 0,99 = 4,9;$$

h_0^* პარამეტრი აიღება 0,4-ის ტოლი.

$$(4.12) \text{ ფორმულის მიხედვით ჯერ გამოვითვალოთ საძიებელი } \frac{\eta_{\text{maxs}}}{D_1}$$

სიდიდე (ამასთან, გაანგარიშებათა გაადვილების მიზნით, გამოვიყენოთ ცხრ. 6-ის მონაცემები). გვექნება

$$\frac{\eta_{\text{maxs}}}{D_1} = 0,5(0,62 - 0,04 \cdot 4,9) = 0,5 \cdot 0,424 = 0,212$$

$$\text{ვინაიდან } W = hD = 50 \text{ მ}^3, \text{ ამიტომ } D = \frac{W}{h} = \frac{50}{10} = 5 \text{ მ, და (4.9)}$$

ფორმულის თანახმად მიიღება, რომ $D_1 = \frac{D}{h_0^*} = \frac{5}{0,4} = 12,5$ მ. მაშასადამე,

ფერდობზე მეწყერული ტალღის მაქსიმალური აგორვის სიმაღლე იქნება

$$\eta_{\text{maxs}} = 0,212 \cdot D_1 = 0,212 \cdot 12,5 = 2,65 \text{ მ}$$

ეხლა, (4.12) ფორმულით ვიანგარიშოთ $\eta_{\max d}$ სიდიდე ანუ ტალღის აგორვის სიმაღლე კაშხლის სადაწნეო ფერდობზე (როდესაც $L_d^* = 30$).
 ვინაიდან

$$\frac{\eta_{\max s}}{D_1} = 0,5(0,46 - 0,02 \cdot 4,9) = 0,5 \cdot 0,362 = 0,186$$

$$\text{აქედან მიიღება } \eta_{\max s} = 0,186 \cdot D_1 = 0,186 \cdot 12,5 = 2,3 \text{ მ.}$$

კაშხლის თხემის ნიშნულსა და წყალსაცავში საანგარიშო წყლის დონეს შორის სხვაობის სიდიდე Δ_j , რომელიც მიიღება სამშენებლო ნორმების თანახმად იმისათვის, რომ კაშხალზე ტალღების გადადინებას არ ჰქონდეს ადგილი, ჩვეულებრივ მცირე სიდიდის წყალსაცავების (მათ შორის, საირიგაციო წყალსაცავების) შემთხვევაში, მიიღება $\Delta_j = 1,5-2,0$ მ ფარგლებში.

აქედან გამომდინარე, განხილულ მაგალითში, წარმოქმნილ მეწყერულ ტალღას, რომლის მაქსიმალური (აგორვის) სიმაღლე კაშხალთან შეადგენს 2,3 მ, შეუძლია გადაედინოს კაშხლის თხემს, რაც სამშენებლო ნორმებით დაუშვებელია, ადგილობრივი (მათ შორის მიწის) მასალებისაგან აგებული კაშხლების შემთხვევაში.

ამიტომ, ამის საწინააღმდეგოდ, როგორც ერთ-ერთი ეფექტური ღონისძიება, ჩასატარებელია სპეციალური მიწის სამუშაოები. ამასთან (4.12) ფორმულით გაანგარიშებათა საფუძველზე, უნდა დადგენილი იყოს პოტენციური მეწყერის იმ ნაწილის მოცულობა, რომლის ფერდობიდან მოშორების და დარჩენილი მეწყერული მასის წყალში ჩაყარდნის შემთხვევაში, წყალსაცავში წარმოქმნილი ტალღა უკვე ვერ შეძლებს კაშხალზე გადაღვრას.

საანგარიშო პარამეტრების ვარიაციების უფრო ფართო დიაპაზონში, ვიდრე (4.12) ფორმულის შემთხვევაში, ჩვენს მიერ ჩატარებული გაანგარიშების შედეგები წარმოდგენილი გრაფიკული ფორმით ნახ. 13-ზე. ამ შემთხვევაში l^* და t_0^* პარამეტრები იცვლებიან $30 \leq l^* \leq 100$ და $1 \leq t_0^* \leq 15$ ფარგლებში;

ფუნქცია $f(t)$ აღებული იყო (3.5) გამოსახულების მიხედვით, ხოლო h_0^* პარამეტრის მნიშვნელობა შეადგენდა 0,5. D პარამეტრი (ნახ. 13)

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, წარმოადგენს მეწვერის მოცულობის გასაშუალებულ სიგანეს წყალსაცავის მთლიანი სიღრმის მიხედვით.

ვინაიდან (4.12) ფორმულა მიღებული იყო იმ შემთხვევისათვის, როდესაც $h_0^* = 0,4$, ამიტომ (4.9) აპროქსიმაციული ფორმულის

$$\text{მიხედვით გვაქვს } D_1 = D \left(\frac{1}{h_0} \right) = 1.25D, \text{ ანუ}$$

$$\frac{\eta}{D_1} = \frac{\eta}{0.25D}$$

შესაბამისად, ფორმულა (4.12) შეიძლება ჩაიწეროს ასეთი სახითაც (იხ. ცხრ.6)

$$\frac{\eta}{D} = 0.625(A - bt_0^*) \quad (4.13)$$

ქვემოთ წარმოდგენილია ცხრილი, სადაც მოყვანილია $\frac{\eta}{D}$ მონაცემები, რომლებიც მიეზღება, როგორც (4.13) აპროქსიმაციული ფორმულით, ასევე ნახ.13-ე ნაჩვენები გრაფიკების მიხედვით (ზუსტი კომპიუტერული გაანგარიშებების შედეგად)

ცხრილი 7

$\frac{\eta}{D}$		
(4.12) აპროქსიმაციული ფორმულით	ზუსტი გაანგარიშებით (ნახ. 13)	
$t_0^* = 2,5$		
$l^* = 30$	0,26	0,27
$l^* = 40$	0,22	0,23
$t_0^* = 5,0$		
$l^* = 30$	0,22	0,23
$l^* = 40$	0,21	0,21
$t_0^* = 7,5$		
$l^* = 30$	0,19	0,19
$l^* = 40$	0,19	0,18

ამ მონაცემებიდან ჩანს, რომ როდესაც მეწყერის ჩამოზვავება ხდება შედარებით ახლოს კაშხლის კვეთიდან ($\frac{l}{h} = 30$), მაშინ მაქსიმალურმა დონის აწევამ კაშხალთან, იმ შემთხვევაში, თუ $t_0 \sqrt{\frac{g}{h}} = 2.5 \dots 7.5$, შეიძლება შეადგინოს შესაბამისად $\eta = 4,8 \dots 3,8$ მ (თუ მაგალითად მეწყერის საშუალო სიგანე აღებულია 20 მ ტოლი).

თავი 5. კაშხალზე მაღალი მეწყერული ტალღის ბადაღვრის პროგნოზირება

5.1. კაშხალზე მაღალი ტალღის ბადაღვრის პარამეტრები

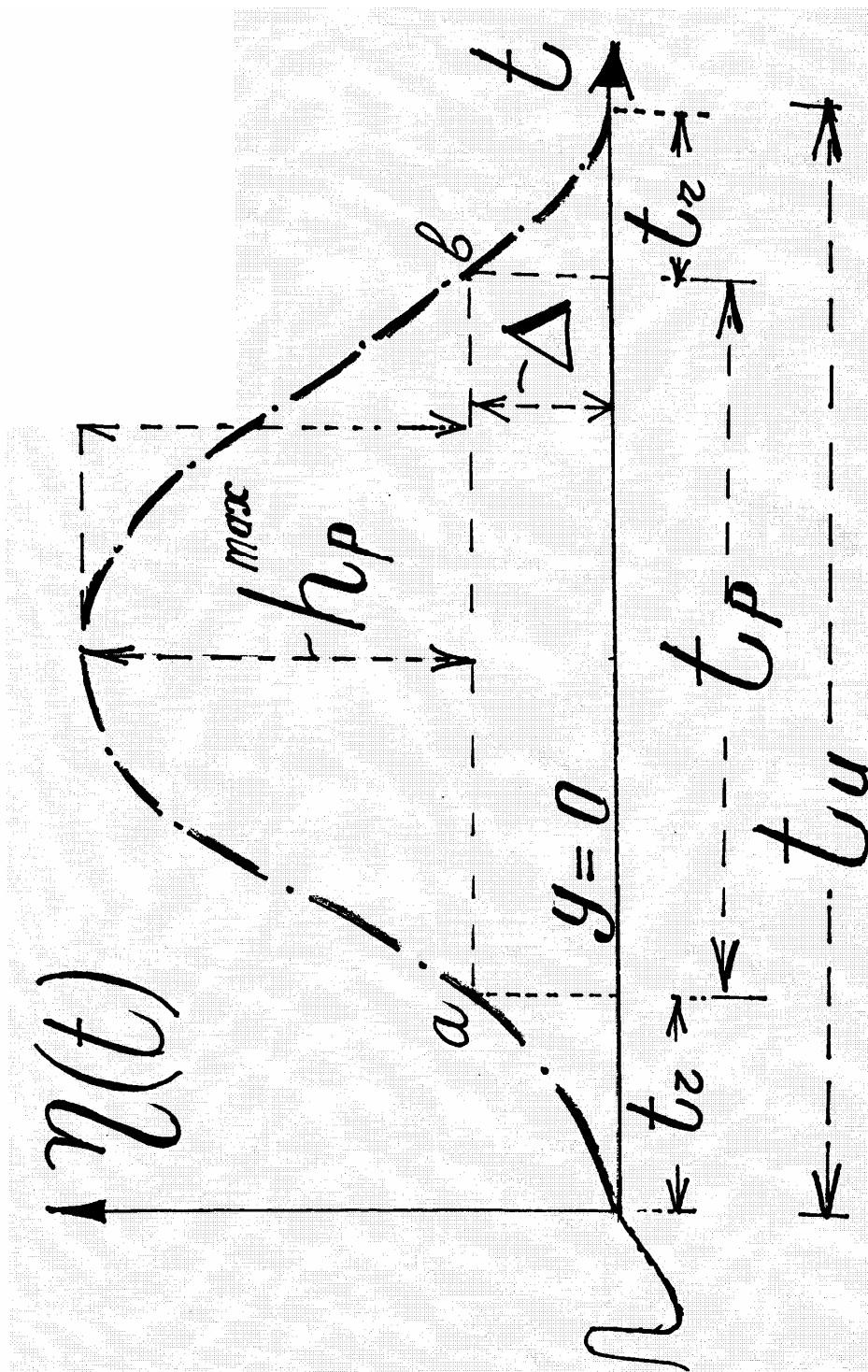
პირველი მეწყერული ტალღის პროფილები იმ მომენტისათვის, როდესაც ტალღა უახლოვდება კაშხლის კვეთს (მაგრამ ჯერ არეკვლას არ განიცდის), შეიძლება წარმოდგენილ იქნას ნახევარ-სინუსოიდის სახით (ნახ. 14).

ნახ.14-ზე წარმოდგენილია $\eta = f(t)$ ფუნქცია კაშხლის კვეთისათვის. ამ ნახაზებზე ნაჩვენებია ორი ძირითადი საანგარიშო პარამეტრი, რომლებსაც ჩვენ ქვემოთ გამოვიყენებთ. ეს პარამეტრებია:

d – მანძილი (მარაგი) წყალსაცავში ნორმალური შეტბორვის დონესა და კაშხლის ქიმის ნიშნულს შორის (ნახ. 14-ზე აღნიშნულია, როგორც Δ), $h_p(t) = \eta(t) - d$ – ტალღის კაშხალზე გადაღვრის სიმაღლე; $\eta(t)$ – ტალღის დროზე დამოკიდებული ამპლიტუდაა, კერძო შემთხვევაში მისი კაშხალთან მიახლოებისას, ხოლო η_m არის ამ დროს ტალღის მაქსიმალური ამპლიტუდა.

ქვემოთ შევეხებით საკითხს, რომელიც უკავშირდება მეწყერული ტალღის კაშხლის ქიმზე გადაღვრის პროგნოზირების სხვადასხვა მეთოდს, რაც დამოკიდებულია ძირითადად, η_m და d სიდიდეების თანაფარდობაზე.

როგორც ზემოთ აღნიშნული გრაფიკული მასალიდან ჩანს, მეწყერული ტალღის მაქსიმალური ამპლიტუდა η_m კაშხლის კვეთიდან მოშორებით, შეიძლება მეტი იყოს d სიდიდეზე. ამ დროს ტალღის გადაღვრა კაშხალზე შეიძლება მოხდეს ისე, რომ ტალღის ფორმა მცირე ცვლილებას განიცდის [95]. სხვა შემთხვევაში, თუ $\eta_m < d$, მაინც შეიძლება აგრეთვე, ადგილი ქონდეს გადაღვრას, მაგრამ ეს მოხდება ტალღის კაშხალზე აგორების შედეგად. ტალღის კაშხალზე გადაღვრის აღნიშნული სხვადასხვა პროცესი განაპირობებს შესაბამის პროგნოზირების მეთოდების დამუშავებას [95].



ნახ.14. მეწვერული ტალღის დროის მიხედვით ცვლილების წარმოდგენა ინტეგრალური ფუნქციის სახით

ჯერ შევჩერდეთ $h_p(t)$ ფუნქციის განსაზღვრაზე. როგორც აღინიშნა გრაფიკების აპროქსიმაცია შესაძლებელია შემდეგი სახით

$$\eta(t) - d = h_p(t) = h_p^{\max} \sin \frac{\pi}{t_p} t \quad (5.1)$$

სადაც h_p^{\max} არის ტალღის კაშხალზე გადაღვრის შრის მაქსიმალური სიმაღლე;

t_p – გადაღვრის პროცესის ხანგრძლივობა.

თუ (5.1) თანახმად, ცნობილია $h_p(t)$ ფუნქცია, მაშინ შესაძლებელია განისაზღვროს კაშხლის ქიმზე (ანუ წყალგადასაშვების ზღურბლზე) ტალღის გადაღვრის სიჩქარე შემდეგი ფორმულით [1]

$$V_{0v}(t) = m \sqrt{2g[h_p(t)]} = m \sqrt{2gh_p^{\max}} \sqrt{\sin \frac{\pi}{t_p} t} \quad (5.2)$$

სადაც m არის ხარჯის კოეფიციენტი.

დავადგინოთ ტალღის მთლიანი სიგრძის (λ) ის ნაწილი (λ_{0v}), რომელიც იქმნება d სიმაღლეზე გავლებული პორიზონტალის მიერ ტალღის "მოჭრით". ამ დროს ტალღის სინუსოიდალური პროფილი abc იკვეთება a' და b' წერტილებში, ხოლო $a'b'$ მონაკვეთი სწორედ საძიებელ λ_{0v} სიდიდეს შეესაბამება (ნახ. 15). პირობითად, მას "გადაღვრის ტალღის სიგრძე" [95] ეწოდება, როგორც აღნიშნულ ნახაზიდან ჩანს, ეს სიდიდე განისაზღვრება ასე

$$\lambda_{0v} = \lambda - 2r \quad (5.3)$$

სადაც r არის მონაკვეთის (ნახ.15) სიგრძე, რომელიც წინასწარ ცნობილი არ არის და მისი პოვნა შეიძლება შემდეგი განტოლებიდან

$$\eta_m \sin \frac{\pi}{\lambda} = d$$

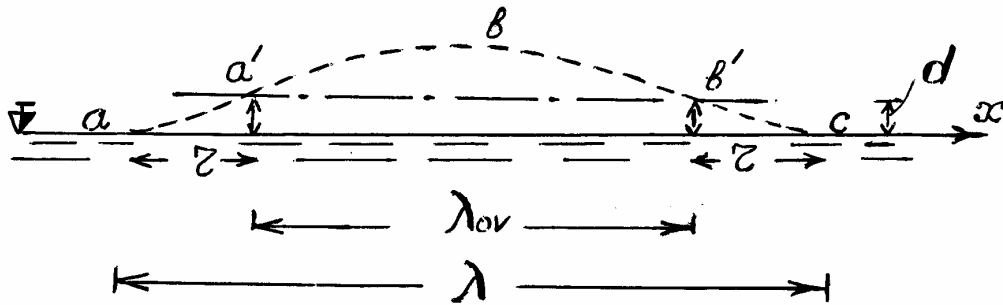
ანუ
$$\frac{\eta_m}{d} = \left(\sin \frac{\pi}{\lambda} r \right)^{-1} \quad (5.4)$$

$\frac{r}{\lambda}$ და $\frac{\eta_m}{d}$ ფარდობითი სიდიდეების ურთიერთგავლენის შეფასების მიზნით, ქვემოთ წარმოდგენილ ცხრილში, მოყვანილია (5.4) განტოლებით განსაზღვრული ამ პარამეტრების მნიშვნელობები.

ეს მონაცემები გვიჩვენებენ, რომ რაც ნაკლებია $\frac{\eta_m}{d}$ ფარდობა, მით მეტია $\frac{r}{\lambda}$ მნიშვნელობა და მით ნაკლებია გადაღვრის ტალღის სიგრძე (λ_{ov}); ეს ნათლად ჩანს აგრეთვე, ნახ. 15-დან.

ცხრილი 8

$\frac{r}{\lambda}$	0,097	0,127	0,16	0,19	0,22	0,25	0,29
$\frac{\eta_m}{d}$	3,33	2,56	2,08	1,78	1,56	1,39	1,28



ნახ. 15

$\frac{r}{\lambda}$ ფარდობის განსაზღვრის მიზნით, (5.4) განტოლების მაგივრად უფრო მოსახერხებელია თ.გველესიანის მიერ დამუშავებული შემდეგი სახის აპროქსიმაციული ფორმულა [95]

$$\frac{r}{\lambda} = \frac{1}{2.75} \left(\frac{\eta_m}{d} \right)^{-1.1} \quad (5.5)$$

ამ ფორმულით სარგებლობის მიზნით ჩვენს მიერ ჩატარებულ იქნა კომპიუტერული გათვლების ციკლი იმ შემთხვევისათვის, როდესაც საანგარიშო პარამეტრების მნიშვნელობები იცვლებოდა შემდეგ ფარგლებში

$$1 \leq t_0^* \leq 15, \quad 10 \leq l^* \leq 100$$

აღნიშნული გაანგარიშებების შედეგების მიხედვით აგებულ იქნა

$\lambda^* = \frac{\lambda}{h}$ სიდიდის t_0^* პარამეტრისაგან დამოკიდებულების გრაფიკები

სხვადასხვა l^* უგანზომილებო სიგრძის მნიშვნელობებისათვის (ნახ. 16). შესაბამისი მონაცემები მოყვანილია ცხრილში 3.

აღვნიშნოთ, რომ (5.5) ფორმულით ჩატარებული გათვლის შედეგები თითქმის ზუსტად ემთხვევა (5.4) გამოსახულების საშუალებით მიღებულ მონაცემებს (იხ. ცხრ. 8). მას შემდეგ, რაც (5.5) და (5.3) ფორმულებით განისაზღვრება λ_{ov} სიდიდე, ტალღის კაშხალზე გადაღვრის ხანგრძლივობა შესაძლებელია შევაფასოთ მიახლოებით შემდეგნაირად

$$t_p = \frac{\lambda_{ov}}{C} = \frac{\lambda_{ov}}{\sqrt{gh}} \quad (5.6)$$

სადაც C – გრძელი ტალღის გაგრძელების სიჩქარეა.

ამგვარად, ზემოაღნიშნულის თანახმად, განისაზღვრება ის პარამეტრები, რომლებიც საჭიროა მეწყერული ტალღის კაშხალზე გადაღვრის პროცესისა და მისი შედეგების შეფასებისათვის, იმ შემთხვევაში, როდესაც ტალღა იმდენად დიდია, რომ პრაქტიკულად თავის ფორმის შეუცვლელად გადაედინება კაშხალზე. ეს პარამეტრებია გადაღვრის სიჩქარე $V_{ov}(t)$, "გადაღვრის ტალღის სიგრძე" – λ_{ov} და გადაღვრის ხანგრძლივობა – t_p .

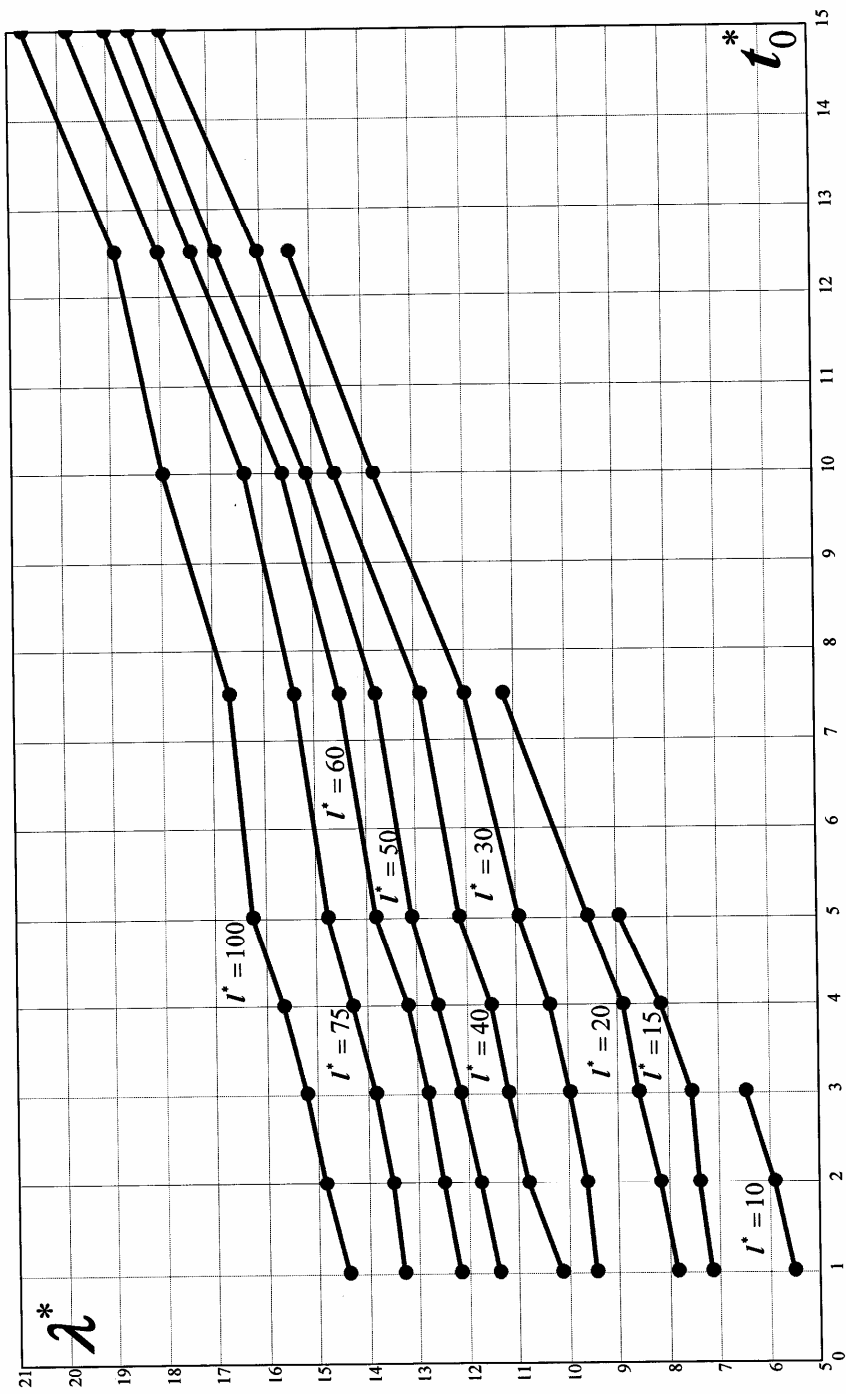
ეხლა, განვსაზღვროთ გადაღვრის საშუალო სიჩქარე, რომელიც გამოისახება ასე [95]

$$\bar{V}_{ov} = \frac{1}{K_{cor}} V_{ov}^{max} \quad (5.7)$$

სადაც K_{cor} არის კოეფიციენტი, რომელიც აქ განხილული შემთხვევისათვის, როდესაც $V_0(t)$ ფუნქციის ცვლილება ემორჩილება სინუსოიდალურ კანონს (იხ. ფ. (5.1)) შეადგენს $K_{cor} = 1,57$.

V_{ov}^{max} – გადაღვრის მაქსიმალური სიჩქარე, რომელიც (5.2) ფორმულის მიხედვით და იმის გათვალისწინებით, რომ $m\sqrt{2g} = 1.42$, ტოლია

$$V_{ov}^{max} = 1,42\sqrt{h_p^{max}} \quad (5.8)$$



ნახ. 16. მეწეურის ტალღის ფარდობითი სიგრძის დამოკიდებულება t_0^* პარამეტრზე სხვადასხვა i^* შემთხვევაში

ამ გამოსახულების გათვალისწინებით, გადაღვრის საშუალო სიჩქარე (5.12) გამოსახულების მაგივრად, განისაზღვრება შემდეგნაირად

$$\bar{V}_{OV} = 0,90\sqrt{h_p^{\max}} \quad (5.9)$$

აღნიშნული სიჩქარეების მნიშვნელობების შეფასების მიზნით, ქვემოთ წარმოდგენილ ცხრილში მოყვანილია (5.8) და (5.9) ფორმულებით მიღებული მონაცემები სხვადასხვა h_p^{\max} სიღღის (შესაბამისად გადაღვრის ტალღის მაქსიმალური სიმაღლის) შემთხვევაში.

ცხრილი 9

h_p^{\max}	1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
V_{OV}^{\max}	1,42	1,74	2,00	2,23	2,46	2,66
\bar{V}_{OV}	0,90	1,10	1,27	1,42	1,56	1,68

გადაღვრის ხვედრითი ხარჯი განისაზღვრება ასე

$$Q_{OV} = \bar{V}_{OV} \cdot \bar{\omega}_{OV} \quad (5.10)$$

სადაც $\bar{\omega}_{OV}$ – არის გადაღვრის შრის განიგვეთის საშუალო ფართობი (კაშხლის ერთ. სიგრძეზე)

$$\bar{\omega}_{OV} = \frac{h_p^{\max}}{K_{cor}} = \frac{h_p^{\max}}{1,57} \quad [მ] \quad (5.11)$$

საბოლოოდ, გადაღვრის ხვედრითი ხარჯი ტოლია

$$Q_{OV} = 0,90\sqrt{h_p^{\max}} \frac{h_p^{\max}}{1,57} = 0,57\sqrt{h_p^{\max}} \cdot h_p^{\max}, \quad [მ^2/წმ] \quad (5.12)$$

ხოლო გადაღვრის მთლიანი ხარჯი შეადგენს

$$Q_{OV}^B = Q_{OV} \cdot B \quad [მ^3/წმ] \quad (5.13)$$

სადაც B არის კაშხლის ქიმის სიგრძე.

კაშხალზე გადაღვრილი წყლის ხვედრითი მოცულობა, (რომელიც შეესაბამება კაშხლის 1 მ სიგრძეს), აგრეთვე მთლიანი, გამოითვლება შესაბამისად, ასე

$$W_{OV} = Q_{OV} \cdot t_p \quad [მ^2], \quad W_{OV}^B = Q_{OV}^B \cdot t_p \quad [მ^3] \quad (5.14)$$

გადაღვრის პარამეტრების განსაზღვრის მეთოდის გამოყენების საილუსტრაციოდ, ქვემოთ მოყვანილია მაგალითი [95] გამოყენებული ფორმულების მითითებით.

მაბალაოთი. წყალსაცავის ფარდობითი სიგრძეა $l^* = 200$ ($h = 80$ მ, $l = 16000$ მ), მეწყერის წყალში მოძრაობის ხანგრძლივობა შეფასებულია, როგორც $t_0 = 14,3$ წმ, ანუ $t_0^* = t_0 \sqrt{\frac{g}{h}} = 14,3 \sqrt{\frac{9,81}{80}} = 5,0$. ტალღის მაქსიმალური ამპლიტუდაა $\eta_m = 5,12$ მ, კაშხლის ქიმის "მარაგი" შეადგენს $d = 2$ მ, კაშხლის სიგრძე კი, $B = 350$ მ ტოლია. ქვემოთ თანმიმდევრობით განისაზღვრება ყველა საძებნი პარამეტრის მნიშვნელობები:

$$\lambda^* = 32,2 + 0,15(5-1) = 32,8,$$

აქედან მივიღებთ, რომ $\lambda = \lambda^* h = 32,8 \cdot 80 = 2624$ მ;

$$\text{პარამეტრი } \frac{r}{\lambda} = 0,127, \text{ როდესაც } \frac{\eta_m}{d} = \frac{5,12}{2} = 2,56 \text{ იხ. ცხრ.8, ფ. (5.4),}$$

$$\text{აქედან გვაქვს } r = \left[\frac{r}{\lambda} \right] \cdot \lambda = 0,127 \cdot 2624 = 333,2 \text{ მ, ანუ } 2r = 666,4 \text{ მ,}$$

$$\text{ამიტომ } \lambda_{OV} = \lambda - 2r = 2624 - 666,4 = 1957,5 \text{ მ. ფ. (5.3);}$$

$$\text{ვინაიდან } \sqrt{gh} = \sqrt{9,81 \cdot 80} = 28 \text{ მ/წმ, ამიტომ,}$$

$$\text{მივიღებთ: } t_p = \frac{\lambda_{OV}}{\sqrt{gh}} = \frac{1957,5}{28} = 69,9 \text{ წმ } \approx 1,2 \text{ წმ, ფ. (5.6);}$$

$$h_p^{\max} = \eta_m - d = 5,12 - 2 = 3,12 \text{ მ, } \bar{\omega} = \frac{h_p^{\max}}{1,57} = \frac{3,12}{1,57} = 1,99 \text{ მ, ფ. (5.11)}$$

$$V_{OV}^{\max} = 1,42 \sqrt{h_p^{\max}} = 2,5 \text{ მ/წმ,}$$

$$\bar{V}_{OV} = 0,9 \sqrt{h_p^{\max}} = 1,59 \text{ მ/წმ, ფ. (5.9);}$$

$$Q_{OV} = \bar{V}_{OV} \cdot \bar{\omega}_{OV} = 1,59 \cdot 1,99 = 3,16 \text{ მ}^3/\text{წმ, ფ. (5.10), (5.5)}$$

$$Q_{OV}^B = Q_{OV} \cdot B = 3,16 \cdot 350 = 1106 \text{ მ}^3/\text{წმ, ფ. (5.13);}$$

$$W_{OV} = Q_{OV} \cdot t_p = 3,16 \cdot 69,9 = 220,88 \text{ მ}^3, \text{ ფ. (5.14);}$$

$$W_{OV}^B = Q_{OV}^B \cdot t_p = 1106 \cdot 69,9 = 77309 \text{ მ}^3. \text{ ფ. (5.14).}$$

აღვნიშნოთ, რომ თ. გველესიანის მონოგრაფიაში [95] წარმოდგენილია კერძოდ, მეწყერით გამოწვეული ტალღის კაშხალზე

გადაღვრის მეთოდის იმ შემთხვევაში, როდესაც კაშხალთან მისული ტალღის სიმაღლე η_m საგრძნობლად მეტია d სიღრმეზე (ანუ კაშხლის ქიმის შემადგენლობაზე საანგარიშო დონესთან შედარებით), მაგრამ ამ მეთოდის თანახმად t_p სიღრმის განსაზღვრისათვის გამოიყენება (5.5) მაგივრად, უფრო ზუსტი ფორმულა.

ქვემოთ განიხილება შემთხვევა, როდესაც $\eta_m < d$. როდესაც ტალღის კაშხალზე გადაღვრას ადგილი ექნება მაშინ, როდესაც ტალღა აგორდება კაშხალზე და ამ აგორების (დონის აწევის) სიღრმე გადააჭარბებს d მარაგს.

5.2. ტალღის კაშხალზე გადაღვრის მოდელირება იტერაციული მეთოდის გამოყენებით

წყალსაცავში მეწყერით გამოწვეული ტალღის კაშხალზე გადაღვრის პროცესის მათემატიკური აღწერა წარმოებს თ. გველესიანის მიერ მიღებული შესაბამისი სასაზღვრო ამოცანის ამონახსნის საფუძველზე. ამოყენებული საანგარიშო სქემის მიხედვით, წყალსაცავის საწყის კვეთში ($x=0$) ადგილი აქვს მეწყერული მასის შემოდინებას V_1 სიჩქარით, $0 < t < t_0$ დროის განმავლობაში, ხოლო კაშხლის კვეთში ($x = l$) მის "გადინებას" V_{0v} სიჩქარით $S_1 < t < S_1 + t_p$ დროის ინტერვალში [95] იხ. ნახ.17.

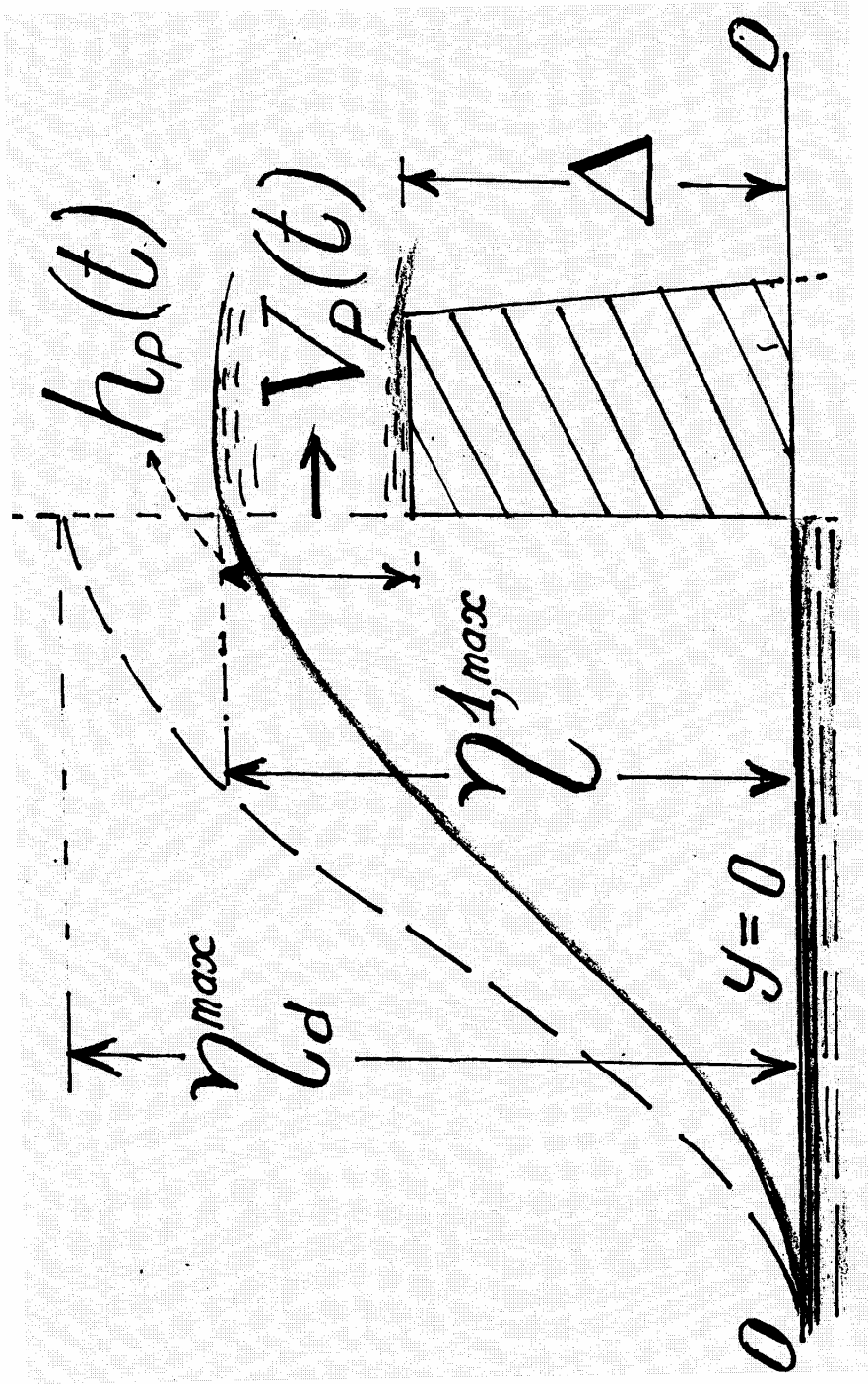
ტალღური ზედაპირის აღწერა წარმოებს შემდეგი ფუნქციის საფუძველზე

$$\eta(x,t) = \eta_1(x,t) + \eta_2(x,t) \quad (5.15)$$

სადაც $\eta_1(x,t)$ გამოისახება მე-3 თავში მიღებული ფორმულის საშუალებით.

$\eta_2(x,t)$ გამოისახება აღნიშნული ფორმულის ანალოგიურად, განსხვავება იქნება ის, რომ $J_{n,1}$, $(i_{n,1})'_t$ და $\psi_{0,2}$ სიდიდეებს (იმ შემთხვევაში, თუ გადაღვრის პარამეტრების ცვლილება აღნიშნული დროის ინტერვალში შეესაბამება სინუსოიდალურ ფუნქციას), შემდეგი სახე აქვთ

$$J_{0,2} = -H'_2, \quad J_{n,2} = -\frac{1}{a_n} [\text{sha}_n h - \text{sha}_n (h - H'_2)], \quad (5.16)$$



ნახ. 17. მეწვერული ტალღის კაშხალზე გადაღვრის პარამეტრები
 (მათ შორის η_d^{max} - ამპლიტუდა გადაღვრის გარეშე,
 $\eta^{1,max}$ - ამპლიტუდა გადაღვრის შემთხვევაში)

$$\begin{aligned}
[i_{n,2}(t)]'_t &= \gamma_n \int_{S_1}^{S_2=S_1+t_p} \sin \beta \tau \cos \gamma_n(t-\tau) d\tau = \\
&= \gamma_n [\cos \gamma_n(t-S_1) \cdot I_1 + \sin \gamma_n(t-S_1) \cdot I_2], \tag{5.17}
\end{aligned}$$

$$(i_{0,2})' = t_p - S_1,$$

$$\begin{aligned}
I_1 &= -\frac{1}{2} \left[\frac{1}{p_1} (\cos p_1 t_p - \cos p_1 S_1) + \frac{1}{p_2} (\cos p_2 t_p - \cos p_2 S_1) \right], \\
I_2 &= -\frac{1}{2} \left[\frac{1}{p_2} (\sin p_2 t_p - \sin p_2 S_1) - \frac{1}{p_1} (\sin p_1 t_p - \sin p_1 S_1) \right], \tag{5.18}
\end{aligned}$$

$$p_1 = \beta + \gamma_n, \quad p_2 = \beta - \gamma_n, \quad \beta = \frac{\pi}{t_p}, \quad \psi_{0,2} = (-1)^n \frac{2V_{OV}^{\max}}{l}.$$

S_1 – დროის ის მომენტი, როდესაც იწყება კაშხლის კვეთში წყლის გადინება V_{OV} სიჩქარით.

H'_2 წარმოადგენს ტალღის კაშხალზე გადაღვრის შრის საშუალო სიმაღლეს, ანუ $H_2 = \frac{h_p^{\max}}{1,57}$.

გადაღვრის პარამეტრების მნიშვნელობების ცვლილება $S_1 < t < S_1 + t_p$ დროის განმავლობაში შეიძლება არ შეესაბამებოდეს საკმარისად კარგად სინუსოიდალურ ფუნქციას (მაგალითად, თუ მეწვერი ვარდება წყალში დიდი სიჩქარით კაშხლის კვეთთან ახლოს). მაშინ (5.17) ინტეგრალის მაგივრად, ვიღებთ იმ ინტეგრალების ჯამს, რომლებშიც ინტეგრირება ხდება მცირე დროის ინტერვალებში $\Delta t = \frac{t_p}{N}$ (სადაც, N არის გარკვეული მთელი რიცხვი, რომლის სიდიდე დამოკიდებულია გაანგარიშების საჭირო სიზუსტეზე). ამის თანახმად გვაქვს

$$[i_{n,2}(t)]'_t = \gamma_n \sum_{i=1}^N (I_n)_i, \quad i=1,2,\dots,N \tag{5.19}$$

სადაც

$$(I_n)_i = \int_{t_{i-1}-S_1}^{t_i} \cos \gamma_n(t-\tau) d\tau = \frac{2}{\gamma_n} \sin \gamma_n \frac{\Delta t}{2} \sin \gamma_n \left(t - S_1 - \frac{\Delta t}{2} \right) \tag{5.20}$$

$$t_i = t_{i-1} - S_1 + \Delta t, \quad \Delta t = \frac{t_p}{N}.$$

როგორც ამ გამოსახულებიდან ჩანს, ამ შემთხვევაში იგულისხმება, რომ $f_1(t)$ ფუნქცია Δt მცირე დროის ინტერვალში ცვლილებას არ განიცდის და მიიღება (3.29) და (3.32) გამოსახულებების სახით. უნდა გავეთვალისწინოთ მხოლოდ ის, რომ განსახილველი პროცესის ათვლა ხდება არა $t = 0$ მომენტიდან, არამედ, $t = S_1$, მომენტიდან, სადაც S_1 – ტალღის კაშხალზე გადაღვრის საწყისი მომენტია, როგორც ეს (5.20) გამოსახულებიდან ჩანს.

აღნიშნული საკითხის გადაჭრის დროს იტერაციული ხერხის გამოყენების შემოთავაზებული მეთოდის არსი მდგომარეობს იმაში, რომ თითოეულ იტერაციულ ბიჯს შეესაბამება გარკვეული პროცედურა. შემდეგი თანმიმდევრობით:

$j = 0$ იტერაციის ბიჯი.

აიღება სასაზღვრო ამოცანის პირობები წყალსაცავის ვერტიკალურ საწყის და ბოლო საზღვრებზე (მათ შორის კაშხალზე)

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{x=0} = V_1(y, t) \text{ (I პირობა),} \quad \frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0 \text{ (II პირობა)}$$

ვეებთ ამოცანის ამონახსენს – სიჩქარის პოტენციალს $\varphi^{(0)}$, აგრეთვე ტალღის ამპლიტუდას $\eta^{(0)}$. შემდეგ განვსაზღვრავთ: 1) $(\eta_d^{\max})^{(0)}$ (ტალღის მაქსიმალური აგორების სიმაღლეს, როცა $x = l$);

2) განვსაზღვროთ $(h_p^{\max})^{(0)} = (\eta_d^{\max})^{(0)} - d$ (ვირტუალური გადაღვრის შრის მაქსიმალურ სიმაღლეს) (აღვნიშნოთ, რომ იტერაციის ამ ბიჯზე გადაღვრებას ჯერ არ აქვს ადგილი)

3) ვითვლით $(V_{ov}^{\max})^{(0)}$, $(\bar{V}_{ov})^{(0)}$ (ვირტუალური გადაღვრის მაქსიმალურ და საშუალო სიჩქარეებს).

$j = 1$ იტერაციის ბიჯი.

აიღება I პირობა და $\frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{x=l} = (\bar{V}_{ov})^{(0)}$ (II პირობა ანუ გადაღვრის პირობა)

განისაზღვრება, ანალოგიურად ($j = 0$ იტერაციული ბიჯისა) შემდეგი პარამეტრები: $\varphi^{(1)}, \eta^{(1)}, (\eta_d^{\max})^{(1)}, (h_p^{\max})^{(1)}, (\bar{V}_{OV})^{(1)}$.

$j = 2$ იტერაციის ბიჯი.

აიღება: I პირობა და $\frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{x=l} = (\bar{V}_{OV})^{(1)}$ (II პირობა)

განისაზღვრება: $\varphi^{(2)}, \eta^{(2)}, (\eta_d^{\max})^{(2)}, (h_p^{\max})^{(2)}, (\bar{V}_{OV})^{(2)}$ პარამეტრები.

იტერაციის პროცესი გრძელდება მანამდე, სანამ

$$(\bar{V}_{OV})^{(i)} - (\bar{V}_{OV})^{(i-1)} < \sigma \quad (5.21)$$

სადაც σ წინასწარ მოცემული მცირე სიდიდეა და დამოკიდებულია წინასწარ ადებულ (მოცემულ) გათვლის სიზუსტეზე.

ვთქვათ, (5.1) პირობას შეესაბამება ($i = k$ იტერაციის ბიჯისთვის)

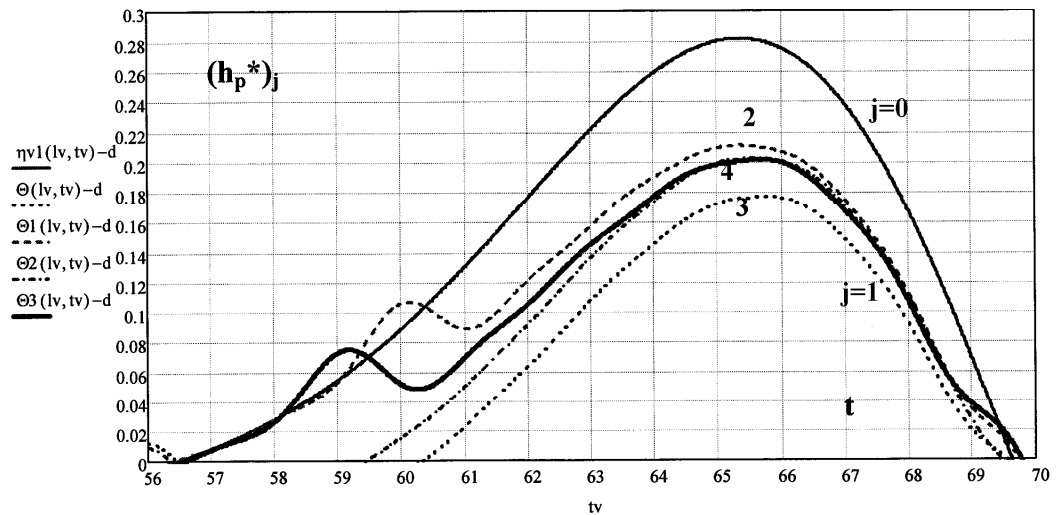
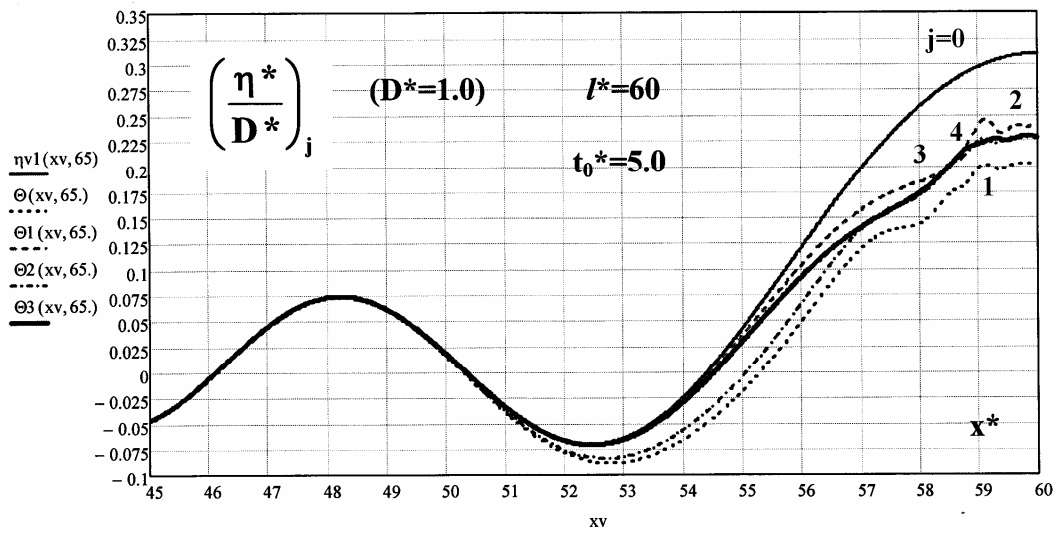
გადაღვრის შრის საშუალო სიმაღლე $(h_p)^k = \frac{(h_p^{\max})^k}{1,57}$ და გადაღვრის

საშუალო სიჩქარე $(\bar{V}_{OV})^{(k)}$. მაშინ, ამ მნიშვნელობებისათვის შესაძლებელი ხდება ყველა სხვა გადაღვრის პარამეტრის საბოლოო დადგენა. ეს პარამეტრებია:

$$Q_{OV}, Q_{OV}^B, W_{OV} \text{ და } W_{OV}^B \quad (\text{იხ. (5.12) - (5.14)}).$$

ნახ. 18-ზე წარმოდგენილია მაგალითის სახით, კაშხალზე წყლის გადაღვრის შრის სიმაღლის (h_p) დამოკიდებულება დროზე სხვადასხვა იტერაციის დროს.

ვინაიდან, აღნიშნული k იტერაციის შემთხვევაში განსაზღვრულია, როგორც $\varphi^k(x,y,t)$, ასევე $\eta^k(x,t)$ ფუნქციონალური დამოკიდებულებები, ამიტომ მათი გამოყენების საფუძველზე შეიძლება დადგენილ იქნეს აგრეთვე, თავისუფალი ზედაპირის რყევის სრული პროცესი წყალსაცავში ტალღის კაშხალზე გადაღვრის შემდეგ (ანუ როცა $t > S_1 + t_p$), აგრეთვე სხვა ჰიდროდინამიკური პარამეტრიც (ჰიდროდინამიკური წნევები და სიჩქარის მდგენელები).



$d = 0.03$ $lv = 60$ $D_{vw} := 1$ $tv_0 := 5$ $Vv1 := 0.2$

$$\begin{aligned}
 hp &= \begin{pmatrix} 0.28 \\ 0.172 \\ 0.209 \\ 0.199 \\ 0.198 \end{pmatrix} &
 Vov1 &= \begin{pmatrix} 0.751 \\ 0.589 \\ 0.65 \\ 0.634 \\ 0.632 \end{pmatrix} &
 \eta_d &= \begin{pmatrix} 0.31 \\ 0.202 \\ 0.239 \\ 0.229 \\ 0.228 \end{pmatrix} &
 tpp &= \begin{pmatrix} 13.13 \\ 9.226 \\ 13.328 \\ 10.01 \\ 13.173 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

ნახ. 18. ტალღის გადაღვრის პროცესის საანგარიშო პარამეტრები (η^*, h_p^*) სხვადასხვა იტერაციის ბიჯის დროს

აღნიშნოთ, რომ კაშხალზე ტალღის გადაღვრის პროცესის მათემატიკური მოდელირება ზემოაღნიშნული მეთოდის თანახმად პირველად განხორციელებულ იქნა თ.გველესიანის და სხვ. მოხსენებაში საერთაშორისო კონფერენციაზე [102]. მაგრამ, ამ შრომაში ტალღის კაშხალზე გადაღვრის დროში ცვალებადობის მახასიათებელი ფუნქცია ატარებდა ე.წ. "ნახტომისებურ" ხასიათს ანუ შეესაბამება უეცრად დაწყებულ და შემდეგ გარკვეული დროის განმავლობაში, უცვლელ პროცესს. ჩვენ შემთხვევაში აღნიშნული ფუნქცია აღებული იყო (5.1) გამოსახულების თანახმად, რაც უფრო იდენტურად აღწერს ტალღის გადაღვრის მოვლენას.

აღნიშნოთ, რომ წინამდებარე ნაშრომის თემასთან დაკავშირებული ხარისხის მაძიებლის სტატიები აგრეთვე წარმოდგენილია ლიტერატურის ნუსხაში [104-110] სახით.

**თავი 6. მეწყვრიტ გამოწვეული ტალღის
ჰიდროდინამიკური ზემოქმედება კაშხალზე**

პირველ თავში წარმოდგენილი სითხის მოძრაობის განტოლება (1.3) პოტენციური ორგანზომილებიან (xOz სიბრტყეში) შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი სახით

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial(w^2/2)}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(u^2/2)}{\partial z} + \frac{\partial(w^2/2)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (6.2)$$

ამასთან (1.3) განტოლებაში გათვალისწინებული იყო პოტენციური მოძრაობის მახასიათებელი შემდეგი განტოლება [1]

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial x} \quad (6.3)$$

ვინაიდან პოტენციური მოძრაობის სიჩქარეები (1.8) თანახმად განისაზღვრებიან ასე

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad w = \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (6.4)$$

ამიტომ (6.1) და (6.2) განტოლებები მიიღებენ შემდეგ სახეს

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} (u^2 + w^2) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (6.5)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z \partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z} (u^2 + w^2) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g = 0 \quad (6.6)$$

ამ განტოლების x და z ცვლადებით ინტეგრირების შემდეგ მიიღება

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} (u^2 + w^2) + \frac{p}{\rho} = C'(z, t) \quad (6.7)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} (u^2 + w^2) + \frac{p}{\rho} = -gz + C(x, t) \quad (6.8)$$

ვინაიდან, ამ განტოლებების მარცხენა მხარე იდენტურია, ამიტომ

$$C'(z, t) = -gz + C(x, t)$$

აქედან ჩანს, რომ C არ შეიძლება იყოს x -ის ფუნქცია, ასევე C' და gz სიდიდეები არ არიან დამოკიდებული x ცვლადზე, ამიტომ

$$C'(z, t) = -gz + C(t)$$

აღნიშნულის გათვალისწინებით (6.7) და (6.8) მაგივრად, მიიღება შემდეგი განტოლება

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2}(u^2 + w^2) + \frac{p}{\rho} + gz = C(t) \quad (6.9)$$

სადაც $C(t)$ სიდიდე შეიძლება შეყვანილ იქნას $\frac{\partial \varphi}{\partial t}$ წევრში [5].

ეს განტოლება (6.4) ტოლობების გათვალისწინებით, შეიძლება წარმოდგენილ იქნას შემდეგი სახითაც:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] + gz = 0 \quad (6.10)$$

ამ განტოლების ლინეარიზაციის შედეგად [5] მიიღება

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + gz = 0 \quad (6.11)$$

(6.11) გამოსახულების საშუალებით შეიძლება განისაზღვროს კერძოდ, დატვირთვა, რომელიც გამოწვეულია ტალღის ზემოქმედებით ვერტიკალურ კედელზე

$$p(x, z, t) = -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \rho gz \quad (6.12)$$

როგორც ამ განტოლებიდან ჩანს, სტაციონარული მოძრაობის შემთხვევაში მივიღებთ ჰიდროსტატიკური წნევის განმსაზღვრელ დამოკიდებულებას. ამის გათვალისწინებით (6.12) შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი სახით

$$p(x, z, t) = p_{din}(x, z, t) - p_{st}(z) \quad (6.13)$$

სადაც $p_{din} = \rho \frac{\partial \varphi}{\partial t}$ არის დინამიკური წნევა (6.14)

$$p_{st} = \rho gz = \gamma z - \text{სტატიკური წნევა} \quad (6.15)$$

ჰიდროდინამიკური წნევა p_{din} განისაზღვრება პროფ. თ.გველესიანის მიერ მიღებული ბრტყელი სასაზღვრო ამოცანის ამონახსნის [101] საფუძველზე. ამის თანახმად, იმ შემთხვევაში, როდესაც მეწყერის მოძრაობის სიჩქარე შეიძლება წარმოდგენილი იყოს ასე

$$V_1(z, t) = V_1 F_1(z) \bar{f}(t),$$

მაშინ ჰიდროდინამიკური წნევის გამოსათვლელი ანალიზური დამოკიდებულება ჩაიწერება შემდეგნაირად

$$P_{din} = \frac{\rho}{2} \varphi'_0 + \sum_{n=0}^M (\varphi_n)' \cos a_n x \quad (6.16)$$

სადაც $\varphi'_0 = \frac{\partial \varphi_0}{\partial t}$, $\varphi'_n = \frac{\partial \varphi_n}{\partial t}$ წარმოებულებია t ცვლადის მიმართ,

$$(\varphi_0)' = -\psi_0 \cdot J_0 \cdot g[i_0(t)]'_t$$

$$(\varphi_n)' = -\psi_0 \cdot J_n \cdot B_n(z) \cdot [i_n(t)]'_t$$

$$\psi_0 = -\frac{2V_1}{l}, \quad J_0 = \int_0^{-h} F(\xi) d\xi, \quad (6.17)$$

$$J_n = \int_0^{-h} F(\xi) \operatorname{cha}_n(h + \xi) d\xi, \quad B_n(z) = \gamma_n S_n + \frac{g \operatorname{cha}_n z}{\gamma_n \operatorname{cha}_n h} \quad (6.18)$$

$$S_n = \frac{\operatorname{sha}_n z}{a_n \operatorname{cha}_n h}, \quad [i_0(t)]'_t = \int_0^{t_0} \bar{f}(t)(t - \tau) d\tau \quad (6.19)$$

$$[i_n(t)]'_t = \gamma_n \int_0^{t_0} \bar{f}(t) \cos \gamma_n(t - \tau) d\tau \quad (6.20)$$

ნაშრომში კომპიუტერული გათვლები ჩატარებულ იქნა (6.16) ფორმულით, იმ შემთხვევისათვის, როდესაც $F(z)$ ფუნქცია წარმოდგენილი იყო C სქემის მიხედვით, ხოლო $\bar{f}(t)$ ფუნქცია კი, №3 გრაფიკული სახით (იხ. ცხრ. 4).

ნახ.19-ზე ნაჩვენებია აღნიშნული გაანგარიშებათა შედეგები.

საანგარიშო პარამეტრების მნიშვნელობები აღებულ იქნა შემდეგნაირად:

პირველი მაგალითისათვის:

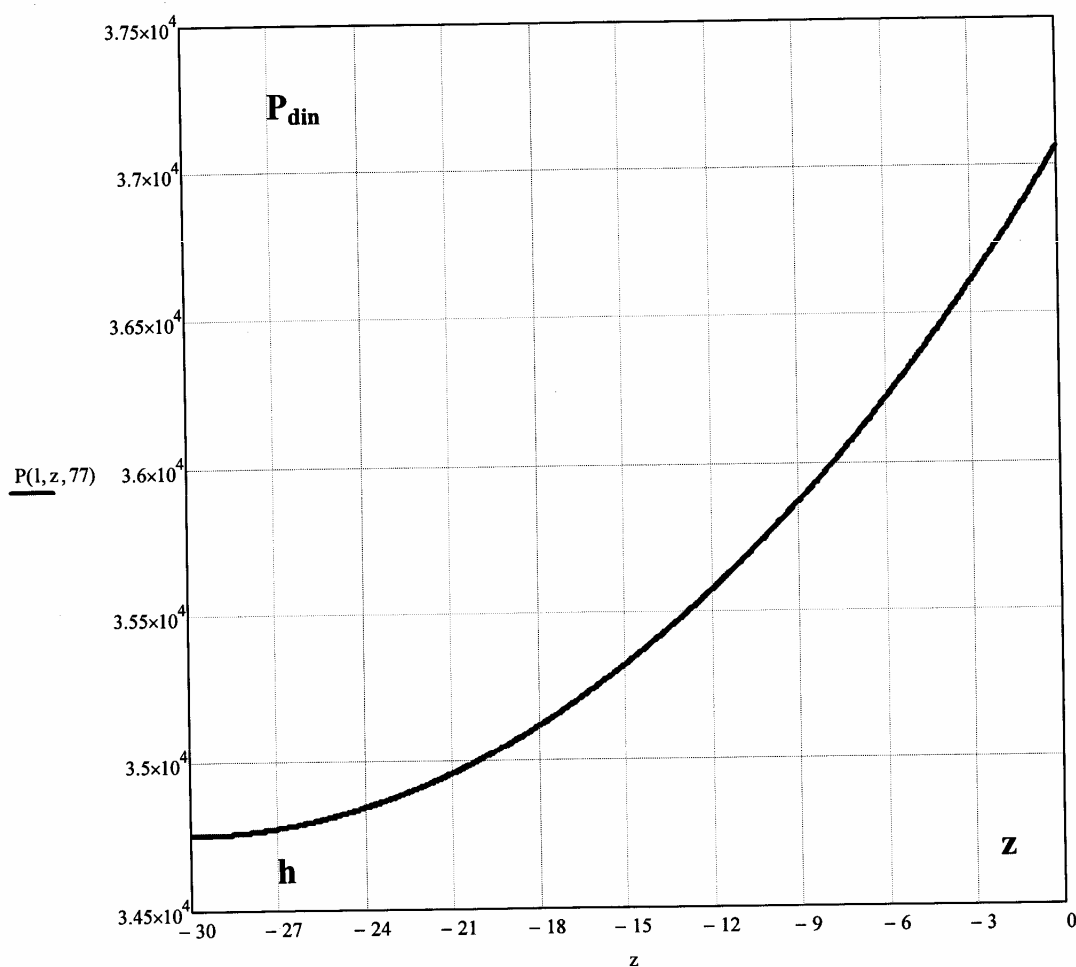
$l = 1200$ მ, $h = 30$ მ, $t_0 = 5$ წმ, $V_1 = 4$ მ/წმ (ნახ. 19). შესაბამისად, ტალღის პროფილი (მათ შორის კაშხლით წყლის დონის აწევის მაქსიმალური სიმაღლე) და შესაბამისი დროის მომენტი t_a ნაჩვენებია ნახ.20-ზე.

ნახ.20-ზე წარმოდგენილია სტატიკური P_{st} და დინამიკური P_{din} (იხ. (6.14) და (6.15)) წნევების მნიშვნელობები.

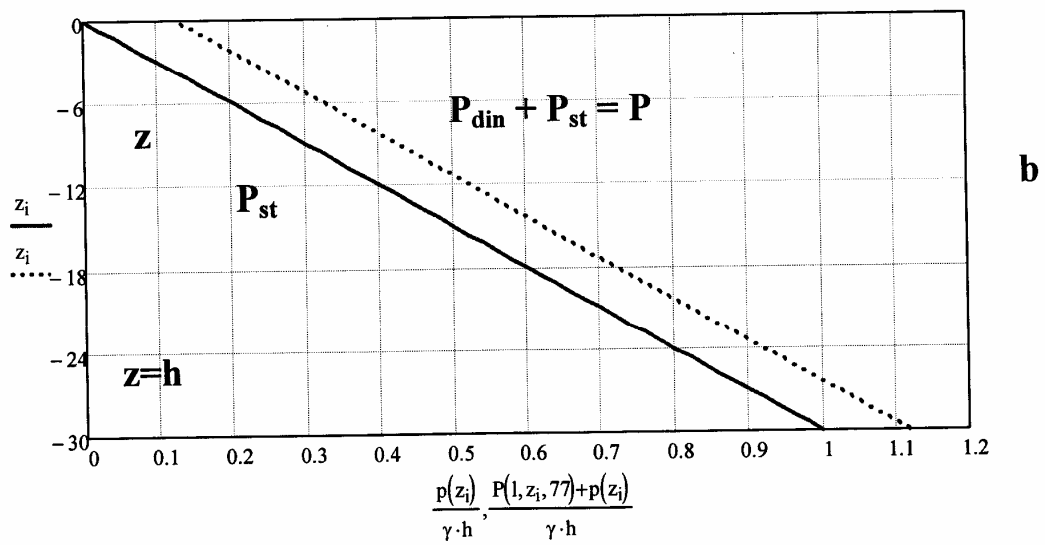
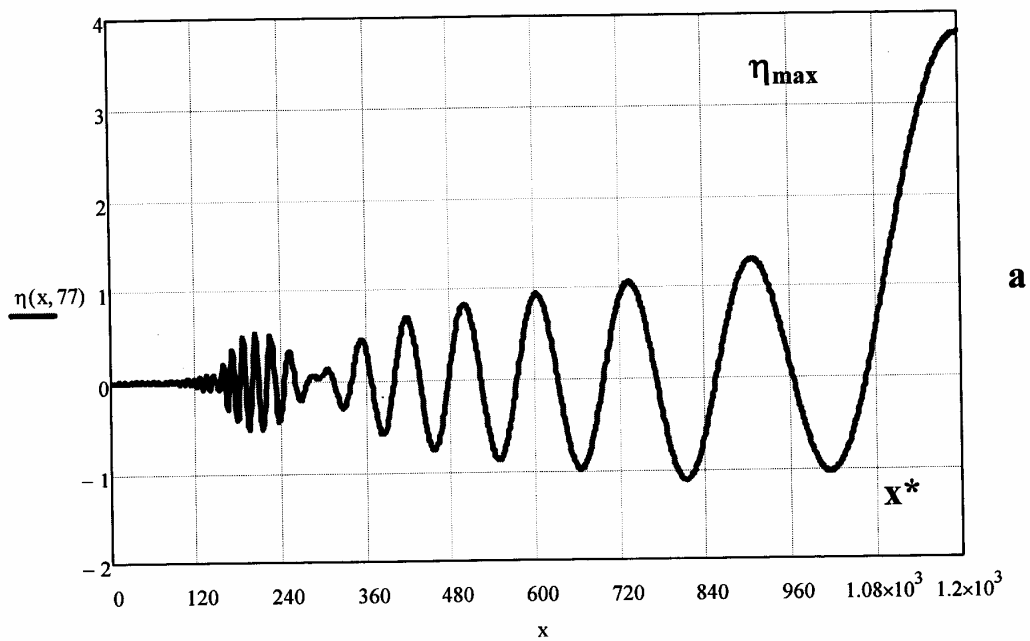
მეორე მაგალითისათვის:

$l = 1800$ მ, $h = 60$ მ, $t_0 = 5$ წმ, $V_1 = 4$ მ/წმ (ნახ. 21, ნახ.22,ა და ნახ.22,ბ).

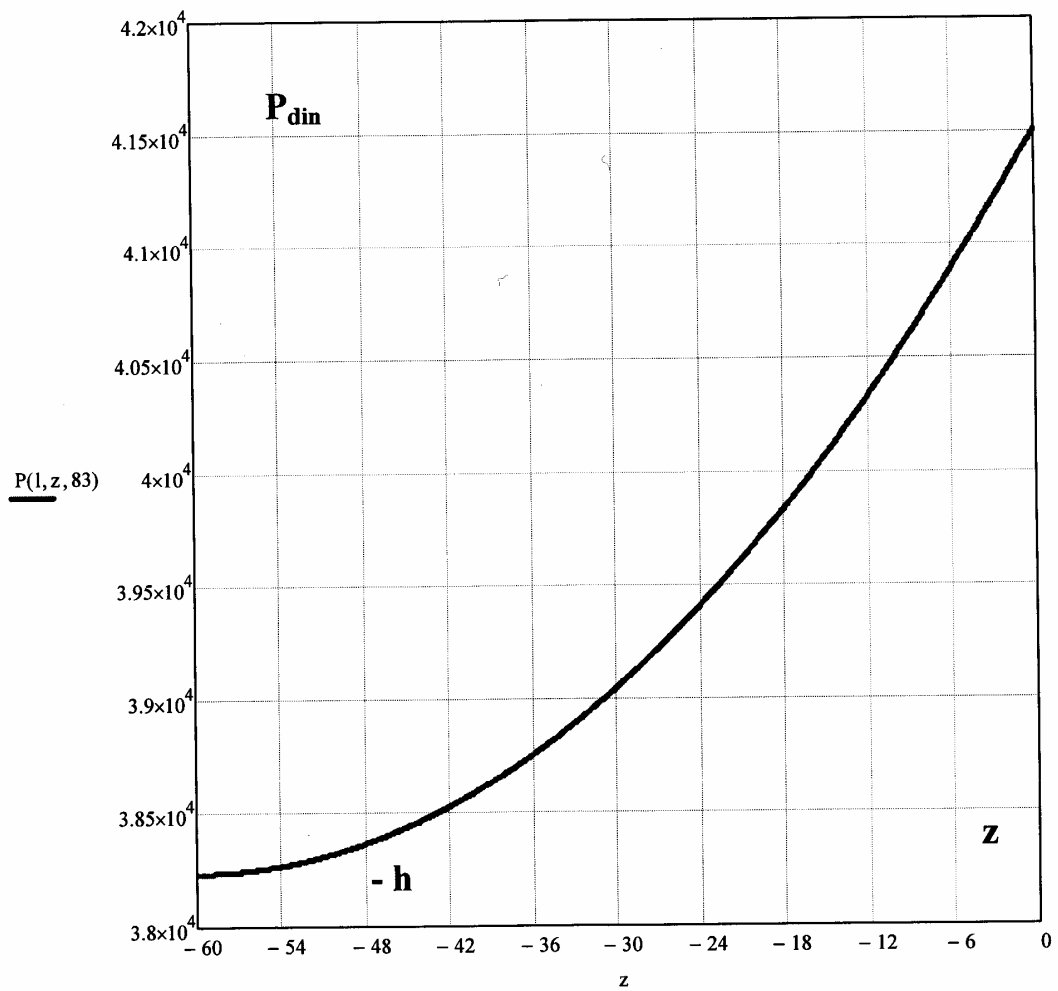
ქვემოთ აღნიშნული გრაფიკული მასალა საშუალებას გვაძლევს დავასკვნათ: a) დინამიკური წნევა, რომელიც კაშხალზე მოქმედებს წყალსაცავის სიღრმის ზრდასთან ერთად მცირდება (პარაბოლური კანონი); b) დინამიკური წნევა იზრდება კაშხალთან ტალღის აგორების სიმაღლის პროპორციულად; c) ფარდობის მნიშვნელობა დინამიკური და სტატიკური წნევებს შორის მატულობს წყალსაცავის სიღრმის შემცირებასთან ერთად.



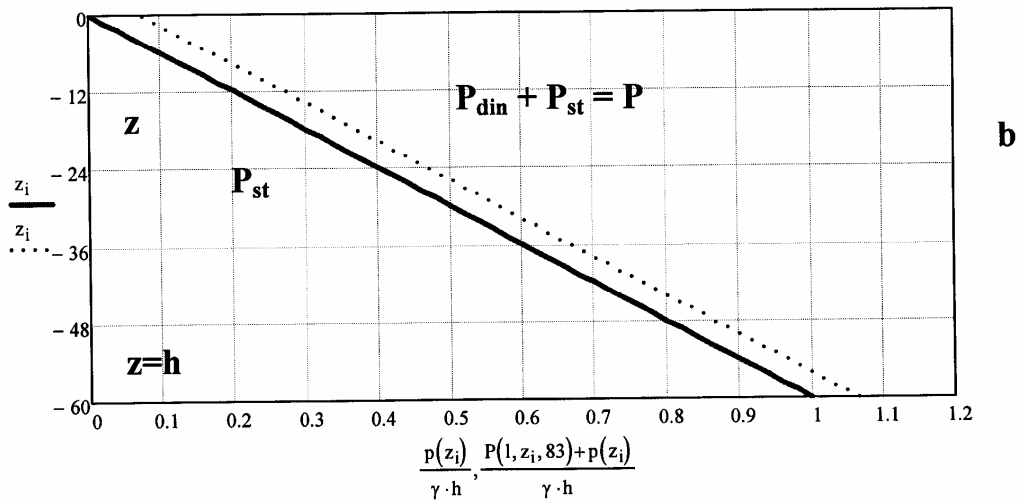
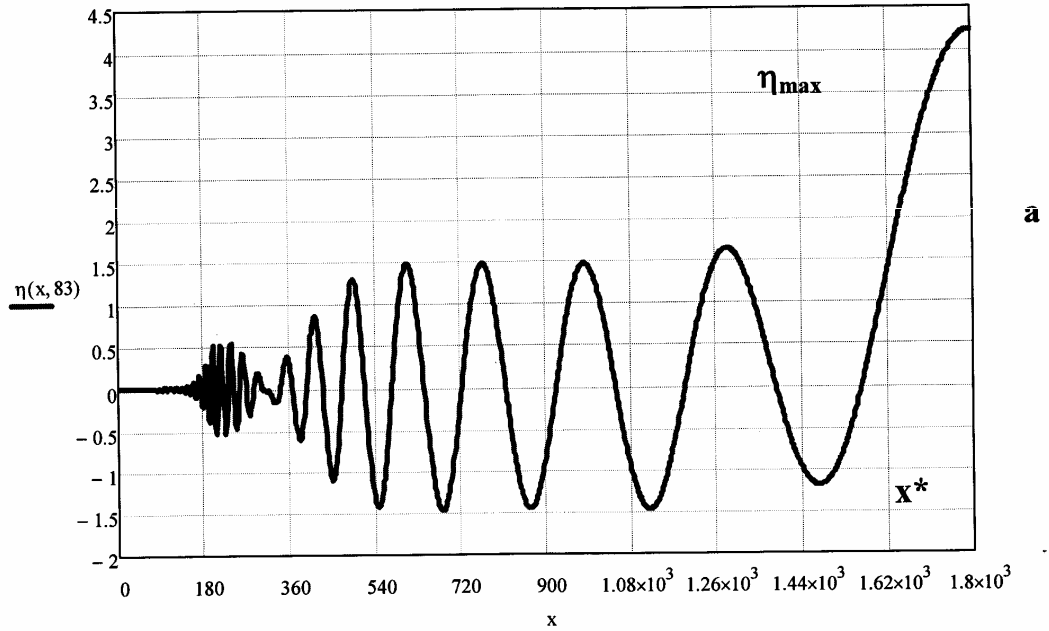
ნახ. 19. მეწყერული ტალღით გამოწვეული ჰიდროდინამიკური წნევის გადანაწილება კაშხალზე



ნახ. 20. a) მეწყერით წარმოქმნილი ტალღის პროფილი (η_{\max} - ტალღის მაქსიმალური აგორების (დონის აწევის) სიმაღლე
 b) ტალღის საერთო ფარდობითი დატვირთვა კაშხალზე (P) და შესაბამისი ჰიდროსტატიკური შემადგენელი



ნახ. 21. მეწვერული ტალღით გამოწვეული ჰიდროდინამიკური წნევის გადანაწილება კაშხალზე



ნახ. 22. a) მეწყერით წარმოქმნილი ტალღის პროფილი (η_{\max} - ტალღის მაქსიმალური აგორების (დონის აწევის) სიმაღლე
 b) ტალღის საერთო ფარდობითი დატვირთვა კაშხალზე (P) და შესაბამისი ჰიდროსტატიკური შემადგენელი

ძირითადი დასკვნები და რეკომენდაციები

სადისერტაციო ნაშრომში წარმოდგენილი კვლევების საფუძველზე გაკეთებულია შემდეგი დასკვნები;

1. სხვადასხვა დანიშნულების ჰიდროკვანძების წყალსაცავებში მეწყერით გენერირებულმა ტალღებმა შეიძლება საფრთხე შეუქმნას კაშხლის ნორმალურ ფუნქციონირებას და მიმდინარე რაიონის ეკოლოგიური წონასწორობის დარღვევის მიზეზი გახდეს.

2. მიღებული კონკრეტული სახის ანალიზური გამოსახულებები პროფ. თ.გველესიანის მიერ ზოგადი სახით ფორმულირებული ბრტყელი სასაზღვრო ამოცანის ამონახსნის საფუძველზე, რომელიც შეეხება წყალსაცავში ამა თუ იმ მიზეზით (მათ შორის მეწყერით) წარმოდგენილი იმპულსური ტალღების გენერაციის პრობლემას.

აღნიშნული ფორმულების საშუალებით ჩატარებულია კომპიუტერული გათვლების შედეგების ანალიზი საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ ამა თუ იმ საანგარიშო (წინასწარ ზუსთად უცნობი) პარამეტრების მნიშვნელობების გავლენა ტალღის ამპლიტუდაზე და მისი პროფილის ფორმაზე.

3. მიღებული ანალიზური დამოკიდებულებების საფუძველზე ჩატარებული კომპიუტერული გათვლების შედეგები აჩვენებს, კერძოდ, რომ იმ შემთხვევაში, როდესაც მეწყერის ჩამოქცევა ხდება ფერდობზე წყლის დონიდან გარკვეულ სიმაღლიდან, გენერირებული ტალღების ინტენსივობა მეტია სხვა შემთხვევებთან შედარებით (მაგალითად, მაშინ როცა მეწყერული მასის შემოდინება ხდება წყალსაცავის მთელ სიღრმეზე).

4. კომპიუტერულ გაანგარიშებათა შედეგად დადგენილია მეწყერული ტანის წყალში შემოსვლის სიჩქარის დროში ცვლილების ფუნქციის გავლენა ტალღურ პროცესის ინტენსივობაზე. ამასთან დაკავშირებით, ბრტყელი მაქსიმალური ტალღების ამპლიტუდების გაანგარიშების მიზნით, ნაშრომში მოცემულია სათანადო რეკომენდაციები საანგარიშო დამოკიდებულებებში აღნიშნული ფაქტორის გათვალისწინებისათვის.

5. გაანგარიშებათა მონაცემების საშუალებით აგებულია წყალსაცავში ბრტყელი მეწყერული ტალღის პროფილები. მათი დამუშავების საფუძველზე მიღებულია საანგარიშო დამოკიდებულება წყალსაცავში ტალღის სიგრძის განსაზღვრის მიზნით მეწყერული პროცესის ხანგრძლივობის მახასიათებელი პარამეტრის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის. წყალსაცავში მეწყერული ტალღის ძირითადი პარამეტრების - სიმაღლის და სიგრძის ცოდნა, საშუალებას იძლევა ქარის ტალღებისათვის არსებული ნორმატული რეკომენდაციების შესაბამისად, შეფასებული იქნას მიახლოებით ამ ტალღის სხვადასხვა დახრილობის სანაპირო ან მიწის კაშხლის ფერდობზე მიგორვით მოძრაობის დონის აწევის სიმაღლე. თუმცა, საჭიროა აღინიშნოს, რომ სირთულის გამო საკითხი საჭიროებს შემდგომ სპეციალურ კვლევას.

6. მიღებული ანალიზური საანგარიშო დამოკიდებულების საფუძველზე ჩატარებულია კომპიუტერული გათვლების ციკლი ბრტყელი მეწყერული ტალღის კაშხალთან მაქსიმალური ამპლიტუდის განსაზღვრის მიზნით, აღნიშნულ დამოკიდებულებაში შემავალი პარამეტრების მნიშვნელობათა ფართო დიაპაზონში ვარირების პირობებში. მიღებული მონაცემების ანალიზის შედეგად დამუშავებული იქნა აპროქსიმაციული (მარტივი სახის) “საინჟინრო” ფორმულა კაშხალთან წყლის დონის შესაძლო მაქსიმალური აწევის სიმაღლის ოპერატიული პროგნოზირებისათვის, წყალსაცავისა და მეწყერის სხვადასხვა ზომის და მეწყერული პროცესის ხანგრძლივობის გათვალისწინებით.

7. წყალსაცავის ფერდობზე თუ არსებობს ან საინჟინრო-გეოლოგიური კვლევები შედეგად გამოვლენილია პოტენციური მეწყერის კერა, მაშინ უნდა ჩატარდეს ამ მეწყერით წარმოქმნილი ტალღის მაქსიმალური ამპლიტუდის გაანგარიშება კაშხლის კვეთში. იმ შემთხვევაში, თუ დადგენილი იქნება, რომ მეწყერული ტალღა იმდენად მაღალია, რომ შეიძლება გადაედინოს კაშხლის ქიმს, ამის საწინააღმდეგოდ უნდა ჩატარდეს სათანადო დონისძიებები ეკოლოგიური კატასტროფის თავიდან აცილების მიზნით. ამ დონისძიებების ერთ-ერთ ეფექტურ საშუალებას წარმოადგენს მიწის სამუშაოები პოტენციური მეწყერის გარკვეული ნაწილის მოშორების

მიზნით, რის შედეგად ტალღა უკვე ვერ შეძლებს კაშხალზე გადადინებას. აღნიშნული მიწის სამუშაოთა მოცულობის დადგენა შესაძლებელი ხდება ნაშრომში მიღებული საანგარიშო დამოკიდებულებების გამოყენებით, როგორც კომპიუტერული, ასევე აღნიშნული აპროქსიმაციული ფორმულის საშუალებით ჩატარებული გათვლების საფუძველზე.

8. იმ შემთხვევაში, როდესაც მეწყერული ტალღის მაქსიმალური ამპლიტუდა ნაკლებია ვიდრე წყალსაცავში არსებული საანგარიშო დონესა და კაშხლის ქიმის ნიშნულს შორის მანძილი (მარაგი), ტალღის გადაღვრა კაშხალზე შესაძლებელია მოხდის ტალღის კაშხალზე აგორვის (დონის აწევის) შედეგად. ვინაიდან ამ აგორვის სიმაღლე წინასწარ უცნობია, მისი განსაზღვრის მიზნით გამოყენებულია გაანგარიშებათა თანდათან მიახლოების (იტერაციის) მეთოდი, რის შედეგად დამუშავებულია მეწყერული ტალღის კაშხალზე გადაღვრის პროცესის მათემატიკური პროგნოზი. ამ პროცესმა შეიძლება განაპირობოს კერძოდ, მიწის კაშხლის წარეცხვა, რასაც თან სდევს კატასტროფული შედეგები ქვედა ბიეფში.

9. მეწყერული ტალღის ზემოქმედება კაშხალზე განისაზღვრება როგორც ჰიდროდინამიკური დატვირთვის (წევის) განაწილება (სიღრმის მიხედვით) ბეტონის კაშხლის სადაწნეო ზედაპირზე. კერძო შემთხვევისათვის, როდესაც მეწყერის წყალში ჩამონგრევის ადგილი შედარებით ახლო მანძილით არის დაშორებული კაშხლის კვეთიდან.

ბამოყენებულო ლიტერატურის ნუსხა

1. **Агроскин И.И., Дмитриев Г.И., Пикалов Ф.И. Гидравлика. М.: Госэнергоиздат. 1954. С.484.**
2. **Богомолов А.И., Михайлов К.А. Гидравлика. М.:Стройиздат. 1972. 648с.**
3. **Стокер Дж.Дж. Волны на воде. Пер. с англ. М.: Изд-во ИЛ. 1959. 617 с.**
4. **Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. М.: Наука. 1977. 816 с.**
5. **Шейнин И.С. Колебания конструкций гидросооружений в жидкости. Энергия. ЛО. 1967.**
6. **Ле Меоте Б. Введение в гидродинамику и теорию волн на воде. Л.: Гидрометеиздат. 1974. 367 с.**
7. **Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Основные дифференциальные уравнения математической физики. М.: Гос. изд. физ.-мат. литер. 1962. 767 с.**
8. **Гвелесиани Т.Л. Анализ основной зависимости для высоты образованной волны в водохранилищах при вертикальном смещении части их дна в результате тектонических землетрясений. Сообщения АН ГССР. т.51. №3. 1968.**
9. **Гвелесиани Т.Л. К вопросу о колебании вязкой жидкости, возникающем в результате возмущений на дне водоема. Сообщения АН ГССР. т.53. №2. 1969.**
10. **Noda E.K. Water Waves Generated by Landslides. Proc. ASCE. 1970. WH.4.**
11. **Wiegel R.L., Noda E.K. et al. Water Waves Generated by Landslides in Reservoirs. Proc. of ASCE. J. of the Waterw. and Harb.Div. 1970. Vol.96. NO WW2. May.**
12. **Гвелесиани Т.Л. Количественные характеристики волн на поверхности воды в водохранилище, возбуждаемые землетрясением. В кн.: Сейсмические воздействия на гидротехнические и энергетические сооружения. М.: Наука. 1980. с.159-174.**
13. **Гвелесиани Т.Л. Приложение 8. Оценка параметров гравитационных волн, возникающих в результате сейсмостектонических смещений ложа водохранилища. Руководство по учету сейсмических воздействий при проектировании гидротехнических сооружений. (К разд.5 главы СНиП П-А, 152-69). Л. 1977. с.261.**
14. **Гвелесиани Т.Л. 5. Гидротехнические сооружения. П.5.31. Строительные нормы и правила СНиП П-7-81, ч.П. Нормы проектирования. Глава 7. Строительство в сейсмических районах. М.: Стройиздат, 1982, с.24.**
15. **Гвелесиани Т.Л. Приложение 7, п.7.4. Оценка высоты гравитационных волн, возникающих в водохранилище при землетрясениях. Учет**

- сейсмических воздействий при проектировании гидротехнических сооружений. Пособие к разд.5 ГТС, СНиП П-7-8.1. Л.: ВНИИГ, 1986, с.280-282.
16. Гвелесиани Т.Л., Островерх Б.Н. и др. Прогноз образования волн на горных водохранилищах при оползнях и обвалах. Гидротехническое строительство. №12. М.: Энергоатомиздат. 1989. с.46-49.
 17. Мамрадзе Г.П., Музаев И.Д. Определение колебания уровня воды в водохранилище при оползнях с учетом изменения очертания водохранилища в плане / Сообщения АН ГССР. 1973. т.69. №3. с.653-656.
 18. Музаев И.Д. Волнообразование в водохранилище при деформации его борта / Сб. Гидротехническое строительство в горных условиях. Вып. 2(57). М.: Энергия. 1974. с.47-54.
 19. Музаев И.Д. О динамике оползневых участков бортов горных водохранилищ / Исследования по вопросам гидравлики сооружений и водного хозяйства // Сб.научных трудов ГрехНИИЭГС. М.: Энергоиздат. 1984. с.53-56.
 20. Музаев И.Д. Некоторые новые задачи, связанные с волновым движением воды в водохранилищах непряматического очертания в плане в приложении к гидротехническому строительству в горных условиях / Сб. Гидротехническое строительство в горных условиях. М.: Энергоатомиздат. 1987. с.99-103.
 21. Джинджихашвили Г.Я. Исследование сейсмических волн на поверхности воды в водохранилище Саяно-Шушенской ГЭС // Строительство и архитектура. Серия 14. Строительство в особых условиях. Сейсмостойкое строительство. Науч.-техн. реф. сборник. 1982. Вып.5. 27-29 с.
 22. Джинджихашвили Г.Я. Прогноз параметров волн в водохранилище при обвально-оползневых явлениях на его бортах. Автореф. диссерт. на соиск. ученой степени канд.техн.наук. Тбилиси. 1983. 23 с.
 23. Джинджихашвили Г.Я., Розентур Л.И. Волнообразование в водохранилищах при обрушении крупного оползня вблизи плотины. Гидротехническое строительство в горных условиях. Сб. научных трудов. М.: Энергоатомиздат. 1987. с.107-112.
 24. Розентур Л.И. Накат обвальных волн на береговой откос водохранилища. Деп. в Информэнерго. Библ. указатель (ВИНИТИ). Деп. научн. работ №6. 1986. 187 с.
 25. Розентур Л.И. Волны в водохранилище, вызванные обвально-оползневыми явлениями на береговом склоне. Автореф. дис. на соиск. ученой степени кандидата технических наук. Тбилиси. 1987. 22 с.
 26. Островерх Б.Е., Лемберг Е.А. Исследование параметров волн на поверхности водохранилища в эпицентральной зоне землетрясения. Водные ресурсы. 1981. №3. с.105-113.
 27. Данелия Р.В., Датунашвили Л.Г. Влияние расчетных параметров на амплитуду максимального повышения уровня воды у плотины в

- случае оползня на береговом склоне водохранилища. *Georgian Engineering News*. #1. 2002. p.58-59.
28. Датунашвили Л.Г. О применимости расчетных схем при исследовании волновых процессов в водохранилищах вследствие обвально-оползневых воздействий. *Georgian Engineering News*. #1. 2002. p.168-169.
 29. Данелия Р.В., Датунашвили Л.Г. Быстрое прогнозирование максимальной амплитуды волны у плотины, вызванной оползнем в узком водохранилище. *Georgian Engineering News*. #1. 2002. p60-61.
 30. დათუნაშვილი ლ. დიდი მოცულობის მეწყერის მოძრაობის პროგნოზირების მათემატიკური მოდელები და მათი დამახასიათებელი ნიშნები. აგრარული მეცნიერების პრობლემები. სამეცნიერო შრომათა კრებული ტ.XIV. თბილისი. 2002. გვ.133-137.
 31. Исследования образования обвальных волн в водохранилище Саяно-Шушенской ГЭС при НПУ 530 м и 518 м. (Т.Л.Гвелесиани, Г.Я. Джинджихашвили). Тема №17.6. НТО ГрузНИИЭГС. 1983. 38 с.
 32. Исследование волнообразования в водохранилище Ахалцихского КГУ. (Т.Л.Гвелесиани, Г.Я.Джинджихашвили). Тема №06.04. НТО ГрузНИИЭГС. 1988. 35 с.
 33. Гвелесиани Т.Л. Определение основных характеристик колебаний уровня воды в водохранилище в сейсмических условиях на примере Жинвальской ГЭС. Гидротехническое строительство. №6. М.: Энергия. 1977. с.18-21.
 34. Разработка рекомендаций по расчету максимального повышения уровня воды у подполных сооружений водохранилища при крупных обвалах и оползнях с определением устойчивости оползневых склонов (на примере водохранилища Ирганайской ГЭС) (Т.Л.Гвелесиани, Д.Н.Киласония и др.) Тема №46. НИО ГрузНИИЭГС. № гос.регр. 01840070547. 1985. 58 с.
 35. Расчет волн в водохранилище Зарамагской ГЭС. (Т.Л.Гвелесиани, И.Д.Музаев). НТО ГрузНИИЭГС. 1978. 31 с.
 36. Расчет волн, возникающих вследствие обвалов и оползней на акватории Сарезского озера. (Т.Л.Гвелесиани, Г.Я.Джинджихашвили). Тема №30.3 НТО ГрузНИИЭГС. 1981. 33 с.
 37. Учет сейсмических воздействий при проектировании гидротехнических сооружений. Пособие по разд. 5: ГТС СНиП II-7-81. Л. 1986. 310 с.
 38. Руководство по учету сейсмических воздействий при проектировании гидротехнических сооружений. К разделу 5 гл. СНиП II-А. 12-69. Л. 1977. 162 с.
 39. Лятхер В.М., Дидух Б.И. Одномерные краевые задачи динамики водонасыщенной среды. Труды Гидропроекта. 1971. №20. с.167-196.
 40. Лятхер В.М., Милитеев А.Н. Исследование воздействий падающих камней на плотину и определение параметров волны всплеска, а также ее трансформации в нижнем бьефе Токтогульского гидроузла. НТО НИС Гидропроекта. М. 1972. 23 с.

41. Лятхер В.М., Милитеев А.Н. Расчет наката длинных гравитационных волн на откос. *Океанология*. 1974. т.14. №1. с.37-42.
42. Лятхер В.М., Милитеев А.Н. Гидравлические исследования численными методами. *Водные ресурсы*. 1981. №1. 60-79 с.
43. Лятхер В.М., Мишуев А.В., Милитеев А.Н., Сладкевич М.С. Численные методы расчета наката длинных волн на берег / В кн.: *Процессы возбуждения и распространения цунами*. М.: ИОАН. 1982. с.103-108.
44. Сладкевич М.С. Численное моделирование наката цунами в рамках теории мелкой воды. *Накат цунами на берег*. АН ГССР. Горький. 1985. с.75-86.
45. Стефанишин Д.В. К оценке надежности грунтовых плотин с учетом воздействия обвальных волн. *Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева*. т.212. 1989. с.69-74.
46. Школьников С.Я., Милитеев А.Н. Численные методы исследования планов течения в руслах со сложным рельефом дна. *Водные ресурсы*. 1981. №3. с. 126-134.
47. Koutitas C.G. Finite Element Approach to Wave due to landslides. *I.Hydraulic Div. Proc. ASCE. Vol. 109. Nhy9*. 1977. pp.43-59.
48. Roney D.C., Butler H.L. Landslide Generated Water Wave Model. *Journ. Hydraulic Div. Proc. ASCE. Sept. 1976. Vol.102. NHY9*.
49. Wiegel R.L., Noda E.K. et al. Water Waves Generated by Landslides in Reservoirs. *Proc. of ASCE. J. of the Waterw. and Harb.Div.* 1970. Vol.96. NO WW2. May.
50. Вольцингер Н.Е., Клеванный К.А., Пелиновский Е.Н. Длинноволновая динамика прибрежной зоны. Л.: Гидрометеиздат. 1989. 271 с.
51. Huber A. Impulse Waves in Swiss Lakes as a Result of Rock Avalanches and Bank Slides. *Experimental Results for the Predication of the Characteristic Numbers of these Waves. Com.Intern. des Grands Barrages. Rio de Janeiro*. 1982. Q.54. R.29.
52. Баронин В.В. Разработать методы регистрации и обработки информации при физическом моделировании гидравлических процессов. НТО ВНИИГиМ им. Костякова. № гос.регистрации 71060094. М., 1975, 56 с.
53. Баронин В.В. Высокие волны в водохранилищах и их моделирование. *Гидравлика сооружений в деформируемых руслах. Сб. научн. трудов ЛПИ. №383. Л., 1982. с.63-71.*
54. Баронин В.В. Моделирование волновых режимов в озерах вследствие обвалов и оползней. *Совершенствование проектирования и строительства гидротехнических сооружений*. М. 1975. с.33-39.
55. Баронин В.В., Шенин Е.К. Силовое воздействие волны перемещения на преграду. В кн.: *Гидравлика и расчеты сооружений*. М.: ВНИИГ иМ. 1984. с.104-107.

56. Gvelesiani T.L., Jinjikhashvili G.I., Mamradze G.P. Methods of Investigation of Landslide Generated Waves Considering the Form of Reservoirs. ICOLD. XIV Congress. Rio de Janeiro. Brazil. 1982. 29 p.
57. Языков С.В. Погружение массивных твердых тел в водоем ограниченной глубины. Автореф. диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М. 1985. 23 с.
58. Войнич-Сяноженцкий Т.Г., Авалиани Э.С. О волнах, генерируемых в водохранилищах вступлением селевых потоков или обрушением обвально-оползневых масс. Гидроэнергетическое строительство в горных условиях. Сб. научно-техно. статей, вып.2(57). М.: Энергия. 1974. с.31-40.
59. Мишуев А.В. Влияние формы поперечного сечения канала на параметры крутых волн перемещения. Гидротехническое строительство. №8. М.: Энергоатомиздат. 1984. с.5-10.
60. Мишуев А.В., Иванов Л.П., Языков С.В. Погружение цилиндрических твердых тел в водоемы ограниченной глубины. Гидравлика и охрана водной среды. Сб. трудов МИСИ им.В.В.Куйбышева. М. 1984. с.11-16.
61. Мишуев А.В., Левина С.И. Прерывистая волна на участке резкого расширения канала. Гидротехническое строительство. №4. М.: Энергоатомиздат. 1984. с.6-9.
62. გაგოშიძე გ., ქადარია ი. წყლის შტორმული ადინების გაანგარიშება ზღვის სანაპირო ფერდობზე // ჰიდროინჟინერია. თბილისი. №3(3). 2007.
63. Вольцингер Н.Е. Длинные волны на мелкой воде. Л.: Гидрометеиздат. 1985. 160с.
64. Железняк М.И., Пелиповский Е.Н. Физико-математические модели наката цунами на берег. Накат цунами на берег. АН СССР. Горький. 1985. с.8-34.
65. Красножон Г.Ф. Накат волны на откосы. Теория и расчет гидротехнических сооружений. М.: Наука. 1975. с.160-176.
66. Мазова Р.Х. Линейная теория наката волн цунами на шельфы различных геометрий. Накат цунами на берег. АН СССР. Горький. 1985. с.48-64.
67. Мазова Р.Х., Пелиповский Е.Н. Линейная теория набегания волн цунами на берег / Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1982. т.18. №2. с.166-171.
68. Gvelesiani T.L., Danelia R., Kvatashidze V., Berdzenashvili G. The problem of transverse water oscillations in canals, upper pools and downstream (river) channels. Energy. #4. 1998. p. 91-95.
69. Данелия Р.В., Кваташидзе В.В., Гвелесиани Т.Л. Гидродинамика нестационарных движений в водоемах (водохранилища, их бьефы, каналы) генерированных в экстремальных условиях. V конференция «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». 275 лет Российской Академии Наук. Москва. Россия. 1999.

70. Болт Б.А., Хорн У.Л., Макдональд Р.А., Скотт Р.Ф. Геологические стихии. Пер. с англ. М.: Мир. 1978. 440 с.
71. Говард А.Д., Ремсон И. Геология и охрана окружающей среды. Д.: Недра. 1982. 583 с.
72. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов. М.: Недра. 1972. 308 с.
73. Золотарев Г.С. Инженерная геодинамика. Москва. МГУ. 1983.
74. Золотарев Г.С., Калинин Э.В., Минервин А.В. Учебное пособие по инженерной геологии. Изд-во Московского университета. 1970. 383 с.
75. Инженерные изыскания в строительстве. Справочник строителя // Под ред. С.П.Абрамова. М.: Стройиздат. 1982. 359 с.
76. Молоков Л.А. Инженерно-геологические процессы. Москва. Недра. 1985. 205 с.
77. Уолтхем Т. Катастрофы. Неистовая Земля. Л.: Недра. 1982. 223 с.
78. Варазашвили Н.Г. Некоторые положения методики прогнозирования абразионной переработки берегов горных водохранилищ. Гидротехническое строительство. №7. 1968. с.36-40.
79. Варазашвили Н.Г. К вопросу методики моделирования взаимодействия волн с береговыми откосами. Труды ГрузНИИГиМ. Вып.27. 1969. с.22-27.
80. Гагошидзе Ш.Н. Об устойчивости береговых склонов при продольном обтекании волновым потоком. / Труды координац. совещаний по гидротехнике. Вып. 92. Л.: Энергия. 1974. с.30-40.
81. Боголюбова И.В. Селевые потоки и их распространение на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат. 1957. с.162.
82. Шадунц К.Ш. Оползни-потоки. М. 1983. 120 с.
83. Гагошидзе М.С. Селевые явления и борьба с ними. Изд-во "Сабчота Сакартвело". Тбилиси. 1970. 386 с.
84. ნათიშვილი ო., თევზაძე ვ., დანელია ზ. ღვარცოფებისა და ღვარცოფსაწინააღმდეგო ნაგებობების ჰიდრავლიკა. თბილისი. 1995. 70 გვ.
85. Стефанишин Д.В. Расчет устойчивости откосов с применением гипотезы круглоцилиндрических поверхностей скольжения. Гидротехническое строительство. 1984. №12. с.20-24.
86. Кухалашвили Э.Г., Губеладзе Д.О., Буачидзе А.К. Динамические нагрузки селевой массы высокой плотности на поперечные сооружения. Сообщения АН ГССР. т.119. №2. Тбилиси. 1985. с.557-560.
87. Труды Международного симпозиума «Проблемы инженерной геологии в гидротехническом строительстве» (12-19 сентября 1979 г.) т.1. Тбилиси: Мецниереба. 1979. 272 с.
88. Газиев Э.Г., Речицкий В.И. Вероятностная оценка надежности скальных массивов. М.: Стройиздат. 1985. 104 с.

89. Вайнштейн Г.М. Безопасность плотин и окружающая среда. М.: Информэнерго. 1972. 52 с.
90. Ситтке В. Механика скальных пород. М.: Недра. 1990. 439 с.
91. Данелия Р.В., Датунашвили Л.Г. Уточненная математическая модель для определения основных кинематических параметров оползней блокового типа на береговых склонах водохранилищ. აგრარული მეცნიერების პრობლემები. სამეცნიერო შრომათა კრებული XV. თბილისი. 2001. გვ.143-145.
92. Steinbrugge K.V., Cloud W.K. Epicentral Intensities and Damage in the Hebgen Lake. Montana. Earthquake of August 17, 1959. Bull. Seism.soc.aM. 1962. Vol.52. #2.
93. Мюллер Л. Оползень в долине Вайонт. Сб. Проблемы инженерной геологии. М.: Мир, 1976, с.74-142.
94. Чоговадзе Г.И. Опыт гидротехнического строительства в Италии. Тбилиси. Мецნიერება. 1971. 82 с.
95. Мамрадзе .П., велесиანი Т.Л., Джинджихашвили .Я. Прогнозирование волн в водохранилищах при сейсмических воздействиях. Москва. Энергоатомиздат. 1991.
96. გველესიანი თ. ჰიდროკვანძების წყალსაცავებში ექსტრემალური ჰიდროდინამიკური (ტალღური) პროცესების მოდელირება და გარემოზე ზემოქმედების პრევენცია. თბილისი. "უნივერსალი". 2010. 355 გვ.
97. Григорян С.С., Нилов Н.Н., Остроумов А.В. и др. Математическое моделирование горных обвалов и оползней больших объемов. Инженерная геология, 1983, №6, с.61-72.
98. Гулакян К.А., Контцель В.В., Постоев Г.П. Прогнозирование оползневых процессов. М.: Недра, 1977, 135 с.
99. ყირიმლიშვილი-დავითაშვილი თ., სხირტლაძე ნ., ჭანტურია ა. დიდი მოცულობის სამთო ჩამოქცევებისა და მეწყერების მათემატიკური მოდელირება (რუსულ ენაზე). ივ.ჯავახიშვილის სახ. თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის შრომები. გამოყენებითი მათემატიკა. კომპიუტერული მეცნიერებანი. ტ.330(19). თბილისი. 1998. გვ.31-34.
100. ყირიმლიშვილი-დავითაშვილი თ., კილასონია ჯ., სხირტლაძე ნ., გველესიანი თ., ჭანტურია ა. ვაიონტ წყალსაცავთან მომხდარი კატასტროფული ჩამოქცევის მოდელირება კომპიუტერზე // ენერჯია. თბილისი. №1(5). 1998.
101. Гвелесиანი Т.Л. Теория генерации волн в приложении к задачам гидроэкологии. Тбилиси. Изд-во "Универсал", 2003, 245.
102. Gvelesiani T. Mathematical models of transient waves generation in problems of environment. Tel-Aviv. Studio Fresco Publishers, 2010, 216 p.
103. Gvelesiani T., Magomedov Z. et.al. Computer-aided design of dam crest overflow by high waves. International Sympos. on Dams and xtreme Floods. CLD. Granada. Spain. A-30. 1992.

104. გველესიანი თ., ყირიმლიშვილი თ., ბერძენაშვილი ა. მათემატიკური ფორმულირების საკითხი წყალქვეშ მოძრავი მეწყერის ან სელური ნაკადის ჰიდროდინამიკური ზემოქმედების განსაზღვრის დროს // ენერჯია. თბილისი. №2(46). 2008.
105. გველესიანი თ., ყირიმლიშვილი-დავითაშვილი თ. ტრანსცენდენტური დისპერსიის განტოლების ამოხსნა გამარტივებული მეთოდით სითხის ზედაპირზე მდგარი ტალღების შესწავლის მიზნით // ენერჯია. თბილისი. №4(48). 2008.
106. Гвелесиани Т.Л., Цхелашвили З.И., Киримлишвили-Давиташвили Т.Т. О разработке методики вероятностной оценки особой гидродинамической (волновой) нагрузки на плотину // ჰიდროინჟინერია. თბილისი. საგამომცემლო სახლი "ტექნიკური უნივერსიტეტი". №2(6). 2008.
107. გველესიანი თ., ციხელაშვილი ზ., ყირიმლიშვილი-დავითაშვილი თ., ჭურჭელაური ბ., მეტრეველი გ. კაშხალის კვეთში ექსტრემალური ტალღური პროცესის მახასიათებელი პარამეტრების სტატისტიკური შეფასება. თბილისი. "მშენებლობა". №2(13). 2009. გვ.106-112.
108. Tsikhelashvili Z., Gvelesiani T., Kirimlishvili-Davitashvili T. On probabilistic approach to forecast floods generated by extrem waves in downstreams. Internacional Simposium on Floods and Modern Methods of Control Measures. Dedicated to the 80th anniversary of the GWMI. 23-28 Sept. Tbilisi. Georgia. 2009.
109. გველესიანი თ., ყირიმლიშვილი-დავითაშვილი თ. გარსდენილ ნაგებობაზე მოქმედი ჯამური ჰიდრაულიკური წნევის კომპონენტების რაოდენობრივი თანაფარდობის პროგნოზი. თბილისი. მშენებლობა. 2(54). 2010. გვ.13-16.
110. Гвелесиани Т., Киримлишвили-Давиташвили Т. Установление максимальной волновой нагрузки на обтекаемую преграду, расположенную на морском шельфе. თბილისი. მშენებლობა. 2(54). 2010. გვ.17-19.