

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

გრიგოლი მანდარია

ენერგეტიკული მაგისტრალური სამილსადენო სისტემების
ფუნქციონირების გარდამავალი რეჟიმების და ექსპლუატაციის მართვა
ეფექტურობის და ენერგოდაზოგვის გაზრდისას

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: “ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“

შიფრი: 0405

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

მარტი, 2018 წელი

საავტორო უფლება © 2018 წელი, გრიგოლი მანდარია

თბილისი

2018 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით მანდარია გრიგოლის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ენერგეტიკული მაგისტრალური სამილსადენო სისტემების ფუნქციონირების გარდამავალი რეჟიმების და ექსპლუატაციის მართვა ეფექტურობის და ენერგოდაზოგვის გაზრდისას“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

მარტი, 2018

ხელმძღვანელი ----- პროფესორი დ. ნამგალაძე

რეცენზენტი -----

რეცენზენტი -----

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2017

ავტორი: გრიგოლი მანდარია

დასახელება: ენერგეტიკული მაგისტრალური სამილსადენო სისტემების ფუნქციონირების გარდამავალი რეჟიმების და ექსპლუატაციის მართვა ეფექტურობის და ენერგოდაზოგვის გაზრდისას

ფაკულტეტი : ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

აკადემიური ხარისხი: აკადემიური დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: მარტი, 2018

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემოთ მოყვანილი 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 გადაბეჭდვა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

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

რეზიუმე

მთელ მსოფლიოში ენერგოდაზოგვის თემა მეტად აქტუალურია. ენერგოეფექტურობის ხარისხის გაზრდა წარმოადგენს მაგისტრალური მილსადენების ექსპლუატაციის პრიორიტეტებს. სამილსადენო ტრანსპორტის ენერგეტიკული ეფექტურობის გაზრდისათვის, ნავთობის გადასატუმბი სადგურებში ცენტრიდანული ტუმბოების და მაგისტრალური სატუმბი აგრეგატების ექსპლუატაცია უნდა მოხდეს ისეთ რეჟიმებში, რომ ყველა დანახარჯების მინიმუმს (ყველა შესაძლო რეგულირების მეთოდებით) უნდა გვაძლევდეს ოპტიმალურ ეკონომიას კონკრეტული პირობებისათვის. დღეისათვის დიდი ყურადღება ექცევა ენერგოდაზოგვის და ენერგოეფექტურობის გაზრდის პრობლემებს. სამწუხაროდ, ჩვენს ქვეყანაში ჯერ არ არსებობს ენერგოდაზოგვის და ენერგოეფექტურობის ზრდის პრობლემების საკანმდებლო აქტები, თუმცა გარკვეული მუშაობა მიმდინარეობს.

მაგისტრალური მილსადენების ნავთობგადასატუმბი სადგურების ეფექტური მუშაობის უზრუნველსაყოფად საჭიროა, რომ მაგისტრალური ტუმბოების ექსპლუატაცია მოხდეს მხოლოდ მუშა ზონაში, ხოლო სხვა შესაძლო რეგულირების მეთოდების გამოყენება უნდა მოხდეს ყველაზე ეკონომიკურ, კონკრეტული ექსპლუატაციის პირობებისათვის. ნაშრომში შემოთავაზებულია ნავთობგადასატუმბი სადგურის ტუმბოების როტორების ბრუნვის სიხშირის მართვის ფორმირების ალგორითმი, რომელიც უზრუნველყოფს მწარმოებლობის და ნავთობის ტრანსპორტირების პირობების ცვლილებას მაქსიმალური მარგი ქმედების კოეფიციენტით (მქკ). მოყვანილია ალგორითმის მათემატიკური აღწერა და ერთი კონკრეტული ნავთობგადასაქაჩი სადგურის მაგისტრალური ნავთობსადენის უბნის ინტერპრეტაციის მაგალითი. ნაშრომში შემუშავებულია ცენტრიდანული სატუმბი აგრეგატების მუშაობის ჩართვის მათემატიკური მოდელი, მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის რეგულირების გათვალისწინებით; შემუშავებულია ნავთობგადასატუმბი სადგურის სარეჟიმო პარამეტრების განსაზღვრის საინჟინრო მეთოდიკა, მაქსიმალური მქკ-ის უზრუნველყოფით და მაგისტრალური მილსადენით ნავთობგადასატუმბი სადგურის კუთრი ენერგოდაზოგვის გაანგარიშების საფუძველზე. ნატურული და თეორიული კვლევების საფუძველზე შემუშავებულია მილსადენების არასტაციონარული პროცესების სიტუაციების პრევენციული მეთოდი, რომელიც იძლევა ხარჯების ეკონომიას საშუალებას საჯარიმო სანქციების გარეშე, ნედლეულის დანაკარგების შემცირებისა და მილის შეცვლის ხარჯზე. მაგისტრალური ნავთობსადენების ექსპლუატაცია ხასიათდება გარკვეული მუშაობის რეჟიმით, რომელიც ვარაუდობს შემდეგი ტექნოლოგიური პარამეტრების მნიშვნელობების ერთობლიობას: სამილსადენო სისტემის მწარმოებლობა და წნევა, რომელიც, როგორც წესი, წარმოადგენს დროში ცვლად სიდიდეს. ეს ცვლილება გამოწვეულია სისტემის მუშაობის რეჟიმთან დაკავშირებული ტექნოლოგიური პარამეტრების მთელი რიგით.

ნაშრომში შესრულებულია, შემოთავაზებული მართვის მეთოდის ტექნიკურ-ეკონომიკური შედარება, კერძოდ ცნობილი მეთოდებთან (ბაიპასირება, დროსელირება, როტორის შეცვლა) ერთად. სატუმბ სადგურებში სატუმბი მოწყობილობის სარეჟიმო პარამეტრების, თეორიისა და პრაქტიკის თანამედროვე მდგომარეობის ანალიზის საფუძველზე, გამოვლენილია, რომ ცენტრიდანული ტუმბოების მქკ-ს მაქსიმუმიზაციის და მილსადენის მუშაობის რეგულირების საკითხები საკმარისად არ არის დამუშავებული.

ასევე შემუშავებულია სატუმბი აგრეგატების მართვის ახალი მეთოდი, რომელიც უზრუნველყოფს ცენტრიდანული ტუმბოს აგრეგატის ენერგოდაზოგვის, ექსპლუატაციის რეჟიმს და მეთოდის რეალიზაციის სამი ვარიანტის ალგორითმს: მქკ-ს მაქსიმუმიზაციას, ბრუნვის სიხშირის კორექტირებას და ჰიდრავლიკური მახასიათებლებით რეგულირებას. მიღებულია „სატუმბი მოწყობილობა-მაგისტრალური მილსადენის“ სისტემის მუშაობის მათემატიკური მოდელი, რომელიც საშუალებას გვაძლევს გაანგარიშდეს ცენტრიდანული ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის ცვლილებისას. ასევე მოყვანილია შემუშავებული სატუმბი სადგურის სატუმბი მოწყობილობის სარეჟიმო პარამეტრების საინჟინრო გაანგარიშების მეთოდი, რომელიც საშუალებას გვაძლევს განისაზღვროს მუშაობის სარეჟიმო პარამეტრები, მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის ცვლილების რეგულირებით, ცენტრიდანული ტუმბოს მქკ-ს მაქსიმუმიზაციით და ბოლოს, შემუშავებულია მაგისტრალური მილსადენის სატუმბი სადგურის მუშაობის რაციონალური რეჟიმის ალგორითმის შერჩევა, რომლის საშუალებით გათვალისწინებულია სისტემის ექსპლუატაციის ენერგოდანახარჯების გავლენის ფაქტორების დონე და შედარებულია კუთრი ენერგოდანახარჯების სიდიდეები რეგულირების თვითეული მეთოდისათვის. მოყვანილია რეგულირების სხვადასხვა მეთოდების პროდუქტის ერთეულის კუთრი ენერგოდანახარჯების გაანგარიშების მაგალითზე, რომელიც გვიჩვენებს სატუმბ სადგურში სატუმბი აგრეგატის მუშა თვლების ბრუნვის სიხშირის ცვლილების რეგულირების ეფექტურობის მეთოდს, მარგი ქმედების კოეფიციენტის მაქსიმალური სიდიდით და ეფექტი გვიჩვენებს 20%-ს.

სადისერტაციო ნაშრომში შემუშავებულია მაგისტრალური მილსადენის სატუმბი სადგურის მუშაობის რაციონალური რეჟიმის ალგორითმის შერჩევა, მოყვანილია რეგულირების სხვადასხვა მეთოდები: ერთ ტონა პროდუქტზე კუთრი ენერგოდანახარჯების გაანგარიშების მაგალითი, რომელიც გვიჩვენებს სატუმბი სადგურის სატუმბი აგრეგატის მუშა თვლების ბრუნვის სიხშირის ცვლილების რეგულირების ეფექტურობის მეთოდს, მარგი ქმედების კოეფიციენტის მაქსიმალური სიდიდით და ეფექტი გვიჩვენებს 20%-ს.

კვლევის შედეგად მიღებული შედეგების გამოიყენება შესაძლებელია საქართველოს სათბობ-ენერგეტიკული სექტორის განვითარების სტრატეგიული გეგმის განსახორციელებლად, მაგისტრალური ნავთობ და ნავთობპროდუქტდენები, მაგისტრალური გაზსადენები და სხვა

პროდუქტის გადასატუმბი მილსადენების ენერგოეფექტურობის ხარისხის გაზრდისათვის, რომელიც გვამლევს შესაძლებლობას მეცნიერულად დასაბუთებული პროგნოზებისა და შესაბამისი პროგრამის ტექნიკური უზრუნველყოფით.

Summary

Energy efficiency issue is a very important issue worldwide. Increase of energy efficiency quality is one of the priorities for main pipeline operation. For the purpose of increasing energy efficiency of pipeline transport operation of centrifugal pumps of oil pumping stations and main pumping aggregates shall take place in such modes that it ensures optimal economy within specific conditions (through all possible regulatory methods).

For the efficient operation of oil pump stations of main pipelines it is necessary that the operation of main pumps takes place only in working zones, whereas the usage of other possible regulatory methods shall take place in the most economical way for the specific operational conditions. The thesis provides mathematical model of switching centrifugal pumping aggregate taking wheel rotation frequency into consideration; engineering method of defining oil pumping station mode parameters has been developed by ensuring maximum efficiency rate and on the basis of energy expenditures of oil pumping station of main pipeline. Based on natural and theoretical surveys preventive method for pipeline nonstationary processes has been developed, that gives possibility of economizing expenditures without penal sanctions, on account of reducing raw material losses and substituting pipes. Operation of main oil pipelines is characterized by certain operational mode that supposes unity of following technological parameters: productivity and pressure as usual is a time-based variable. This change is triggered by whole set of technological parameters related to system operational mode.

Technical-economic comparison of provided management method, specifically together with well-known methods (bypassing, drosseling, rotor changing), has been undertaken. On the basis of analyzing current regime parameters, theory and practice of pumping devices of the pumping stations it has been identified that efficiency rate maximization of centrifugal pump for the regulatory issues of the main pipelines is not sufficiently developed. Also, new method for managing new pumping aggregates which will ensure energy efficiency operational mode of centrifugal pump and 3 versions of algorithm of method realization shall be developed: efficiency rate maximization, adjustment of rotation frequency and regulation due to hydraulic characteristics. Mathematical model of operating system of the pumping device - main pipeline that enables calculation with the wheel rotation frequency changes. Also, engineering calculation method of pumping device of the pumping station mode parameters that enables definition of mode parameters together with wheel rotation frequency regulation, maximization of centrifugal pump efficient operation. Finally, algorithm selection of operation of main pipeline pumping station has been developed which envisages factors of energy expense effect levels of the system operation and comparison of specific energy expense volumes for each method. Algorithm selection has been developed for main pipeline pumping station that envisages energy expenditure influence level factors of system operation that shall be compared with energy expenditures for each regulatory method.

The results of the survey can be used for the development of thermal-energy sector plan, for the increase of energy efficiency quality of main oil and oil product transmission pipelines, main gas pipelines and other product pumping pipelines, that gives us possibility to ensure technically scientifically justified forecasts and relevant software.

სარჩევი

	83.
შესავალი	20
თავი 1. მაგისტრალური მილსადენების სისტემის სარეჟიმო პარამეტრების განსაზღვრის თეორიისა და პრაქტიკის თანამედროვე მდგომარეობა	25
1.1. მაგისტრალური მილსადენების ტექნოლოგიური სარეჟიმო პარამეტრების ცვლილების მიზეზების განსაზღვრა.	25
1.2. მაგისტრალური მილსადენების სისტემების მუშაობის რეჟიმების რეგულირების მეთოდების კრიტიკული ანალიზი და მათი შერჩევის პრობლემა.	27
1.3. მაგისტრალური ცენტრიდანული ტუმბოების ძირითადი პარამეტრები და მახასიათებლები.	35
1.4. მილსადენებში არასტაციონარული პროცესების თანამედროვე მათემატიკური მოდელები.	40
1.5. ნაშრომის დასმული ამოცანების კვლევა.	41
თავი 2. მილსადენებში არასტაციონარული პროცესის წინააღმდეგობის კოეფიციენტის გაანგარიშება რიცხვითი მეთოდით.	43
2.1. მაგისტრალური მილსადენის არსტაციონარული პროცესის აღწერა, მიზანი და მეთოდის შემუშავება.	43
2.1.1. ამოცანის დასმა, ნაშრომის მიზანი და მეთოდიკა.	43
2.1.2. არასტაციონარული პროცესის წინააღმდეგობის კოეფიციენტის დადგენის ალგორითმი.	45
2.1.3. ინტერპოლაცია ლაგრანჟის მრავალწევრით.	47
2.1.4. ინტერპოლაცია კუბური სპლაინ-ფუნქციებით.	49
2.1.5. ლაგრანჟის პოლინომის და კუბური სპლაინ-ფუნქციების ინტერპოლაციის სქემა.	50
2.2. მაგისტრალური ნავთობსადენის გარდამავალი პროცესის გაანგარიშება, დამატებითი ტუმბოს ჩართვისას.	54
2.3. გარდამავალი პროცესის გაანგარიშება, ტუმბოს მყისი გათიშვისას. . .	56
2.4. გარდამავალი პროცესის გაანგარიშება (ტუმბოს ჩართვა).	59

2.5. ნავთობსადენი „სართიჭალა-გაჩიანის“ დამატებითი ტუმბოს გამორთვის პროცესის გაანგარიშება	65
2.6. „Blackridge“-ის წყალსაცავის მილსადენის არასტაციონარული პროცესის გამოკვლევა.	69
2.7. მილსადენში არასტაციონარული პროცესის ნატურული ექსპერიმენტალური გამოკვლევები.	76
2.7.1. ფარცხანაყანევის სათავედან ქვიტირის წყალშემკრებ ავზამდე მილსადენის აღწერა.	76
2.7.2. მილსადენზე წნევის გამზომი ხელსაწყოების აღწერა	81
2.7.3. ფარცხანაყანევის სათავედან ქვიტირამდე მილსადენის არასტაციონარული პროცესის ნატურული ექსპერიმენტის შედეგები.	82
2.7.4. ქვიტირის სატუმბოდან საქუსლიის რეზერვუარამდე მილსადენის აღწერა და არასტაციონარული პროცესის ნატურული ექსპერიმენტის შედეგები.	85
თავი 3. სატუმბი ცენტრიდანული ტუმბოების რეგულირებიანი ამძრავის მუშაობის ენერგოდამზოგავი რეჟიმების თეორიული დასაბუთება.	89
3.1. ცენტრიდანული ტუმბოების გადასატუმბი პროდუქტის დანახარჯის და სიმძლავრეს, მაგისტრალური მილსადენის სისტემის ჰიდრომექანიკური ფაქტორების გამოვლენა.	89
3.2. მაგისტრალური სატუმბი აგრეგატის მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის ცვლილების მართვის დასაბუთებელი მეთოდი, მარგი ქმედობის კოეფიციენტის მაქსიმიზაციისას.	91
3.3. ცენტრიდანული ტუმბოს მარგი ქმედების კოეფიციენტის მაქსიმიზაცია.	97
3.3.1. ცენტრიდანული სატუმბი აგრეგატის მართვის სისტემა, მარგი ქმედების კოეფიციენტის მაქსიმიზაციის გათვალისწინებით.	97
3.3.2. ცენტრიდანული სატუმბი აგრეგატის მართვის სისტემა, მილსადენის მახასიათებლის სიმრუდის ცვლილებით.	102
3.3.3. ცენტრიდანული სატუმბი აგრეგატის ოპტიმალური მართვის სისტემა, მილსადენში დაწნევის ცვლილებისას.	105
3.4. მაგისტრალური მილსადენის სისტემაში სატუმბი სადგურის მუშაობის რეჟიმის მათემატიკური მოდელის აგება, ბრუნვის სიხშირის რეგულირების მეთოდის გათვალისწინებით.	109

3.5. მაგისტრალური მილსადენის მუშაობის რეჟიმების რეგულირების მეთოდების გამოყენების ეფექტურობის ანალიზი.	113
თავი 4. მაგისტრალური მილსადენის ენერგოდაზოგვის ღონისძიებები, ტურბომექანიზმების რეგულირებისას მახასიათებლებით.	120
4.1. მაგისტრალური მილსადენით პროდუქტის ტრანსპორტირების ენერგოდაზოგვის ზოგადი ალგორითმი.	120
4.2. მაგისტრალური მილსადენის ენერგოდაზოგვის ღონისძიებები.	124
თავი 5. ცენტრიდანული ტუმბოების და სატუმბი სადგურების მაქსიმალური მარგი ქმედების კოეფიციენტის დადგენის საინჟინრო მეთოდიკის შემუშავება და უზრუნველყოფა.	143
5.1. მეთოდების რეგულირება და შესასვლელი პარამეტრების განსაზღვრა.	143
5.2. ნავთობსადენების და ცენტრიდანული ტუმბოების ტიპების მახასიათებლების დადგენა.	144
5.3. მაქსიმალური მარგი ქმედების კოეფიციენტის მქონე ცენტრიდანული ტუმბოების ნავთობსადენის სარეჟიმო პარამეტრების დადგენა.	145
5.4. მაგისტრალური ნავთობსადენის სატუმბი სადგურის მუშაობის რეჟიმის რაციონალური შერჩევა, კუთრი ენერგოდანახარჯების საფუძველზე.	146
დასკვნები.	152
ლიტერატურა.	154

ცხრილების ნუსხა

	83
ცხრილი 1. საკვანძო წერტილების ინტერპოლაციის სქემა.	47
ცხრილი 2. დამატებითი ტუმბოს ჩართვის დაწნევის მნიშვნელობები 0-დან 1500 მ-მდე.	55
ცხრილი 3. დამატებითი ტუმბოს ჩართვის დაწნევის მნიშვნელობები 1500-დან 3500 მ-მდე.	56
ცხრილი 4. წნევის მნიშვნელობები ნავთობსადენის გასწვრივ და დროში.	59
ცხრილი 5. გარდამავალი პროცესის წნევის მნიშვნელობები დროში და მილსადენის გასწვრივ (მპა)($\Delta t = 1$ წმ).	62
ცხრილი 6. წნევის ნაზრდის მნიშვნელობები, დამატებითი ტუმბოს გამორთვის შემთხვევაში.	67
ცხრილი 7. $\bar{\lambda}_i$ წინააღმდეგობის კოეფიციენტის მნიშვნელობები, სხვადასხვა Δt_i დროის ინტერვალისათვის.	70
ცხრილი 8. ტუმბო Omega 250-600 A GB P F-ს ტექნიკური პარამეტრები.	79
ცხრილი 9. ტუმბო Omega 250-600 A GB P F-ს საქსპლუატაციო მონაცემები.	79
ცხრილი 10. $\bar{\lambda}_i$ წინააღმდეგობის კოეფიციენტის მნიშვნელობები, სხვადასხვა Δt_i დროის ინტერვალის სხვადასხვა მნიშვნელობების.	84
ცხრილი 11. ქვიტირის სატუმბოდან საქუსლიის რეზერვუარამდე მილსადენის ტექნიკური პარამეტრები.	85
ცხრილი 12. $\bar{\lambda}_i$ წინააღმდეგობის კოეფიციენტის მნიშვნელობები, სხვადასხვა Δt_i დროის ინტერვალისათვის (აღმავალი ხაზი).	88
ცხრილი 13. ელექტროენერჯის დაზოგვის რეკომენდაციები ცენტრიდანული ტუმბოების აგრეგატების მქკ-ის განსაზღვრისათვის.	93
ცხრილი 14. შესაბამისი ფაქტორების მოცემული სიდიდეების მნიშვნელობები და გაანგარიშების შედეგები.	101
ცხრილი 15. ნავთობის გადატუმბვის ცენტრიდანული ტუმბოს მოწყობილობების კრებსითი მახასიათებლები.	108

ცხრილი 16. ცენტრიდანულ ტუმბოს მექანიკური მახასიათებლების მოცემული მნიშვნელობების აგება.	112
ცხრილი 17. სხვადასხვა მდგომარეობაში ნახშირწყალბადების ტრანსპორტის კუთრი ენერჯის დანახარჯი.	127
ცხრილი 18. სატუმბი სადგურის სარეჟიმო საწყისი პარამეტრების მნიშვნელობები.	143

ნახაზების ნუსხა

83.

- ნახ. 1. მილსადენის მუშაობის რეჟიმების რეგულირების მეთოდები. 29
- ნახ. 2. მილსადენის მუშაობის რეჟიმის რეგულირების მეთოდები
(გაგლუვების რეგულირების ხარისხის მიხედვით). 30
- ნახ. 3. მილსადენის და ტუმბოს ერთობლივი მახასიათებელი მუშა თვლის
ბრუნვის სიხშირის ცვლილებისას; 1. მაგისტრალური ტუმბოს სადაწნეო
მახასიათებელი n_1 ბრუნვის სიხშირისას; 2. იგივე n_2 ბრუნვის სიხშირისას;
3. ქსელის მახასიათებლის წირი. 34
- ნახ. 4. ცენტრიდანული ტუმბოებში ენერჯის დანაკარგების კ
ლასიფიკაცია. 37
- ნახ. 5. ა) კუბური სპლაინ-ფუნქციების ინტეპოლაციური სქემა;
ბ) ლაგრანჟის პოლინომით ინტერპოლაციური სქემა. 52
- ნახ. 6. კვანძების მიხედვით ლაგრანჟის პოლინომით და კუბური სპლაინ-
ფუნქციებით ინტერპოლაციის გრაფიკების შედარება. 52
- ნახ. 7 $\Delta P = \Delta P(x, t)$ -ს გრაფიკები მილსადენის გასწვრივ (ა) და
დროში (ბ). 52
- ნახ. 8. $\Delta P = \Delta P(x, t)$ -ს ზედაპირები, სხვადასხვა ორიენტაციისას
(ვარიანტი 1) 53
- ნახ. 9. $\Delta P = \Delta P(x, t)$ -ს ზედაპირები, სხვადასხვა ორიენტაციისას
(ვარიანტი 2) 53
- ნახ. 10. ცენტრიდანული ტუმბო **LQRY 600 – 165 – 2970** 54
- ნახ. 11. დაწნევის ნაზრდის ცვლილება დროში (ა) და მილსადენის გასწვრივ
(ბ). გ.დ. $\Delta H = \Delta H(x, t)$ ზედაპირები სხვადასხვა ორიენტაციისას. 57
- ნახ. 12. გარდამავალი პროცესის დაწნევის მნიშვნელობები დროის და
სიგრძის მიხედვით (ა,ბ). გარდამავალი პროცესის დაწნევის
მნიშვნელობების ზედაპირები, სხვადასხვა ორიენტაციისას (გ,დ). 58
- ნახ. 13. ორდიაფრაგმიანი ტუმბო Flow (GMP) 45-ის ხედი. 58
- ნახ. 14. გარდამავალი პროცესის წნევის ნაზრდის მნიშვნელობები დროის
და სიგრძის შესაბამისად (ა,ბ). გარდამავალი პროცესის
დაწნევის მნიშვნელობების ზედაპირები, სხვადასხვა ორიენტაციისას

(გ,დ). $\hat{\lambda}$ -ს მნიშვნელობები გაანგარიშებული გარდამავალი პროცესებისათვის (ე).....	60
ნახ. 15. პროცესის შესაბამისი წნევის მნიშვნელობები, ნავთობსადენის გასწვრივ და დროის განმავლობაში (ა,ბ). $\mathbf{p}(\mathbf{x}, \mathbf{t})$ ფუნქციის ზედაპირი, ორი ორიენტაციისას (გ და დ).....	61
ნახ. 16. $\hat{\lambda}(\mathbf{L}, \mathbf{t})$ -ს ფუნქციის ზედაპირი, ორი ორიენტაციის შემთხვევისათვის.....	61
ნახ. 17. ცენტრიდანული ტუმბო 38-200x2 (ИГН-400/105).....	62
ნახ. 18. (ა და ბ). ორდიაფრაგმიანი ტუმბოს გათიშვისას, შესაბამისი წნევის მნიშვნელობები, ნავთობსადენის გასწვრივ და დროის განმავლობაში. (გ და დ) $\mathbf{p}(\mathbf{x}, \mathbf{t})$ - ფუნქციის ზედაპირი, ორი ორიენტაციისას.....	63
ნახ. 19 (ა,ბ). $\hat{\lambda}(\mathbf{L}, \mathbf{t})$ -ს ზედაპირის ორი ორიენტაციის შემთხვევა ($\Delta t = 2$ წმ). გ.დ. $\hat{\lambda}(\mathbf{L}, \mathbf{t})$ -ს ზედაპირი, ორი ორიენტაციის შემთხვევა ($\Delta t = 0,5$ წმ)....	64
ნახ. 20. (ა,ბ). $\hat{\lambda}(\mathbf{L}, \mathbf{t})$ -ს ზედაპირი, ორი ორიენტაციის შემთხვევა ($\Delta t = 0,25$ წმ).....	65
ნახ. 21. სიგრძეზე წინააღმდეგობის ინტეგრალური კოეფიციენტის დინამიკა, დროის განახევრული ბიჯით.....	66
ნახ. 22. კონსოლური ტუმბო HK 560/300 -ს ხედი.....	67
ნახ. 23. ა და ბ. წნევის ნაზრდის გრაფიკები (ორი ორიენტაცია); გ და დ. ტალღური ზედაპირი.....	68
ნახ. 24. სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის $\hat{\lambda}(\mathbf{L}, \mathbf{t})$ -ს ზედაპირები (ა. $\Delta t = 4$ წმ; ბ. $\Delta t = 2$ წმ; გ. $\Delta t = 1$ წმ.....	68
ნახ. 25. $\hat{\lambda}(\mathbf{L}, \mathbf{t})$ -ს ზედაპირები ორი ორიენტაციისათვის $\Delta t = 0,1$	69
ნახ. 26. $\hat{\lambda}(\mathbf{L}, \mathbf{t})$ -ს ზედაპირები ორი ორიენტაციისათვის $\Delta t = 0,01$	69
ნახ. 28. სიგრძეზე წინააღმდეგობის ინტეგრალური კოეფიციენტის დინამიკა, დროის განახევრული ბიჯით.....	71
ნახ. 29. მაგისტრალური მილსადენის პროფილი და ნიშნულები.....	71

ნახ. 30. ჰიდრავლიკური დარტყმის პროცესის რიცხვითი კომპიუტერული რიცხვითი მოდელირება, კადრების მიხედვით, დროის ფიქსირებული სურათი, ყოველი 3 წამის შემდეგ.	72
ნახ. 31. ჰიდრავლიკური დარტყმის დაწნევის ნაზრდის ორდინატების ანსამბლი მილსადენის გასწვრივ, ფიქსირებული დროის მომენტში.	73
ნახ. 32. ჰიდრავლიკური დარტყმის დაწნევის ნაზრდის ორდინატების ანსამბლი, როდესაც ა) $t = 0$ წმ; $t = 3$ წმ; $t = 6$ წმ; $t = 9$ წმ; $t = 12$ წმ; $t = 15$ წმ; ბ) $t = 18$ წმ; $t = 21$ წმ; $t = 24$ წმ; $t = 27$ წმ; $t = 30$ წმ; გ) $t = 33$ წმ; $t = 36$ წმ; $t = 39$ წმ; $t = 42$ წმ; $t = 45$ წმ; დ. $t = 48$ წმ; $t = 51$ წმ; $t = 54$ წმ; $t = 57$ წმ; $t = 60$ წმ.	73
ნახ. 33. ჰიდრავლიკური დარტყმის დაწნევის ნაზრდის ორდინატების ანსამბლი.	74
ნახ.34. ჰიდრავლიკური დარტყმის დაწნევის ნაზრდის ორდინატების ანსამბლი: ა. $L = 0$ მ; $L = 1000$ მ; $L = 0$ მ; $L = 3000$ მ; $L = 4000$ მ. ბ. $L = 5000$ მ; $L = 6000$ მ; $L = 7000$ მ; $L = 8000$ მ; $L = 3000$ მ; $L = 9000$ მ. გ. $L = 10000$ მ; $L = 11000$ მ; $L = 12000$ მ; $L = 13000$ მ; $L = 14000$ მ. დ. $L = 15000$ მ; $L = 16000$ მ; $L = 12007$ მ; $L = 18000$ მ.	74
ნახ. 35. დაწნევის ნაზრდის ტალღური ზედაპირი $h = (L, t)$	75
ნახ. 36. სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის $\hat{\lambda}(L, t)$ -ს ორი სხვადასხვა ორიენტაციის ზედაპირი.	75
ნახ. 37. ფარცხანაყენევის ნაგებობის სიტუაციური სქემა.	77
ნახ. 38. ფარცხანაყენევის სათავედან ქვიტირის წყალშემკრებ ავზამდე მილსადენის პროფილი.	78
ნახ. 39. ცენტრიდანული Omega და Omega V^R ტუმბოს ხედი(ა) და ჭრა (ბ): 1. შემწოვი მილტუჩი; 2. საკისარის კორპუსი; 3, 8. რწევის საკისარი; 4. სპირალური კამერა; 5. მუშა თვალი; 6. დროსელის ღრიჭო; 7. ჭოკი; 9. ჭოკის შემჭიდროვება; 10. სადაწნეო მილტუჩი.	79
ნახ. 40. წნევის გამზომი ხელსაწყო testo 314-ს ხედი: ა. ხელსაწყო testo 314; ბ. ელექტრონული კეისი.	81
ნახ. 41. წნევის ნაზრდის გრაფიკები (ა და ბ) და ტალღური ზედაპირი ორი ორიენტაცია) (გ და დ)..	83

ნახ. 42. არასტაციონარული პროცესის $\hat{\lambda}$ -ს ზედაპირების აგება. ა. $\Delta t_1 = 60$ წმ; ბ. $\Delta t_2 = 30$ წმ; გ. $\Delta t_3 = 15$ წმ; დ. $\Delta t_4 = 7,5$ წმ.	83
ნახ. 43. ინტეგრალური სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის დინამიკა, დროის განახევრული ბიჯით.	84
ნახ. 44. საქუსლიის რეზერვუარების სქემა.	86
ნახ. 45. ა,ბ. დაწნევის ნაზრდის გრაფიკები; გ. ტალღური ზედაპირი.	86
ნახ. 46. არასტაციონარული პროცესის $\hat{\lambda}$ -ს ზედაპირების აგება. ა. $\Delta t_1 = 9$ წმ; ბ. $\Delta t_2 = 4$ წმ; გ. $\Delta t_3 = 2$ წმ; დ. $\Delta t_4 = 1$ წმ; ე. $\Delta t_5 = 0,5$ წმ.	87
ნახ. 47. ინტეგრალურ სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის დინამიკა, დროის განახევრული ბიჯით.	88
ნახ. 48. სისტემის „სატუმბო სადგურის - მილსადენის“ ენერგოდანახარჯების ჰიდრომექანიკური ფაქტორების გავლენის ბლოკ-სქემა.	90
ნახ. 49. ცენტრიდანული ტუმბოს მახასიათებელი $\eta - Q$ -ს ცვლილება, მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის ცვლილებისას.	93
ნახ. 50. ცენტრიდანული სატუმბო აგრეგატის მართვის პრინციპიალური ბლოკ-სქემა.	98
ნახ. 51. სატუმბო აგრეგატის და მილსადენის უბნის ერთობლივი მახასიათებლები: 1. მილსადენის უბნის ჰიდრაულიკური მახასიათებელი; 2. ტუმბოს მქც-ის წირი; 3. სადაწნეო საწყისი მახასიათებელი HM 7000-210, როდესაც $n = 3000$ ბრ/წთ; 4. HM 7000-210 ტუმბოს სადაწნეო მახასიათებელი, როდესაც $n = 2578$ ბრ/წთ; 5. HM 7000-210 ტუმბოს სადაწნეო მახასიათებელი, როდესაც $n = 2654$ ბრ/წთ; 6. მილსადენის უბნის ჰიდრაულიკური მახასიათებლის პროდუქტის სიბლანტის ცვლილებისას.	102
ნახ. 52. ცენტრიდანული ტუმბოს მქც-ის მახასიათებლები: 1. $n = 2578$ ბრ/წთ; 2. $n = 2654$ ბრ/წთ;	103
ნახ. 53. ცენტრიდანული სატუმბო აგრეგატის მართვის სისტემის ბლოკ-სქემა.	104
ნახ. 54. ცენტრიდანული სატუმბო აგრეგატის ოპტიმალური მართვის სისტემა.	106

ნახ. 55. j-ური განზოგადებული სატუმბი სადგური, i – k მაგისტრალური სატუმბი აგრეგატებით.	110
ნახ. 56. სადაწნეო მახასიათებლის გრაფიკები ორი ტუმბოსათვის.	113
ნახ. 57. მქკ-ის მახასიათებლის გრაფიკები ორი ტუმბოსათვის.	113
ნახ. 58. სადაწნეო მახასიათებლის და მქკ-ის შეთავსებული მახასიათებლის გრაფიკები ორი ტუმბოსათვის.	114
ნახ. 59. სატუმბი სადგურის და მილსადენის ერთობლივი მახასიათებლები დროსელირების საშუალებით: 1. მილსადენის მახასიათებელი; 2. სადგურის დაწნევის ჯამური მახასიათებელი შეტბორვის გათვალისწინებით; 3. მაგისტრალური ტუმბოების მქკ-ის $\eta - Q$ მახასიათებელი.	115
ნახ. 60. სატუმბი სადგურის და მილსადენის ერთობლივი მახასიათებლები დროსელირების საშუალებით: 1. მილსადენის მახასიათებელი; 2. სადგურის დაწნევის ჯამური მახასიათებელი შეტბორვის გათვალისწინებით; 3. მაგისტრალური ტუმბოების მქკ-ის $\eta - Q$ მახასიათებელი.	117
ნახ. 61. მილსადენის და სატუმბი სადგურის ერთობლივი მახასიათებლები: 1. მილსადენის მახასიათებელი; 2. სადგურის მაგისტრალური ტუმბოების საპასპარტო მახასიათებელი; 3. სადგურის მაგისტრალური ტუმბოების მახასიათებელი, მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირეს ცვლილებისას; 4. სადგურის მაგისტრალური ტუმბოების $\eta - Q$ მახასიათებელი; 5. მაქსიმალური მქკ-ის წირი; Q_0 და H_0 - დაწნევა და მწარმოელობა მაქსიმალური მქკ-ისას.	123
ნახ. 62. სატუმბი სადგურის ექსპლუატაციის რეჟიმების ოპტიმიზაციის სისტემის მუშაობის ფუნქციონალური სქემა. M - ელექტროძრავა.	125
ნახ. 63. ენერგეტიკული დანახარჯების სტრუქტურა (საშუალოდ სახაზო საწარმოო-სადისპეჩერო სადგურისათვის).	131
ნახ. 64. მაგისტრალური ნავთობპროდუქტსადენის გადატუმბვის სიმძლავრის დამოკიდებულება დიზელის საწვავის $\Pi-0,2-40$ -თვის: $1.v = 2,7 \cdot 10^{-6}$; $2.v = 8,8 \cdot 10^{-6}$	133
ნახ. 65. ტუმბოს კლასიკური მახასიათებელი.	135
ნახ. 66. ფარდობითი წნევა და ხარჯი ტუმბოს და ქსელის მახასიათებლები: 1. ტუმბო HM 500-300-ს მახასიათებელი $\frac{P}{P_M} = \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_M} \right)^2 \right]$; 2. ტუმბოების პარალელური მიერთება $\frac{P}{P_M} = \left[1 - \left(\frac{Q}{2Q_M} \right)^2 \right]$; 3. ტუმბოების მიმდევრობითი	

მიერთება $\frac{P}{P_M} = 2 \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_M} \right)^2 \right]$; 4. ტუმბოს ნაკადის დროსელირება	
$\frac{P}{P_M} = \alpha \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_M} \right)^2 \right]$, $\alpha = 0,8$; 5. ნაკადის ცირკულაცია შესასვლელზე	
$\frac{P}{P_M} = \left[1 - \left(\frac{Q}{\gamma Q_M} \right)^2 \right]$, $\gamma = 0,8$; 6. ტუმბოების მიმდევრობითი კორექტირება	
$\frac{P}{P_M} = \alpha \left[1 - \left(\frac{Q}{\gamma Q_M} \right)^2 \right]$, $\alpha = 0,8$, $\gamma = 0,8$; 7. ტუმბოების მიმდევრობითი კორექტირება; 8. ქსელის მახასიათებელი წინააღმდეგობით	
388,8 მპაწმ ² /მ ⁶	138
ნახ. 67. „სატუმბო სადგური-მილსადენის“ სისტემის რეგულირების მეთოდის შერჩევის სქემა, ტექნიკურ-ეკონომიკური ფაქტორების საფუძველზე.	148
ნახ. 68. სატუმბო სადგურის სატუმბო აგრეგატის კუთრი ენერგოდანახარჯები, რეგულირების სხვადასხვა მეთოდების შემთხვევაში.	150

შესავალი

ენერგოდაზოგვა წარმოადგენს სამართლებრივ, ორგანიზაციულ, სამეცნიერო, საწარმოო, ტექნიკურ და ეკონომიკურ ზომებს, რომლებიც მიმართავს სათბობ-ენერგეტიკული რესურსების ეფექტურ (რაციონალურ) გამოყენებას და მათი განახლებადი ენერჯის წყაროების ჩართვას წარმოებაში [1,2].

სამწუხაროთ, დღეისათვის საქართველოს კანონი „ენერგოდაზოგვის და ენერგოეფექტურობის გაზრდის შესახებ“, ჯერ არ არსებობს. თუმცა მიდის მუშაობა ამ კანონზე, რაც შემდეგში სიცხადეს მოიცავს მრავლ საკითხს.

ენერგოდაზოგვის თემა მეტად აქტუალურია, რადგანაც ენერგოეფექტურობის ხარისხის გაზრდა წარმოადგენს მაგისტრალური მილსადენების ექსპლუატაციის პრიორიტეტებს. სისტემების რეიტინგური ინდექსი, კერძოდ სისტემის საკვანძო მახასიათებლების ეფექტურობა, ქმნის კუთრი ენერჯის მოხმარების პროდუქტის ტრანსპორტირებას.

ქვეყნის ენერგეტიკული სტრატეგიის პრიორიტული ამოცანები შემდეგია: ქვეყნის და ეკონომიკის ენერგორესურსების ხელმისაწვდომი სრული და საიმედო უზრუნველყოფა და ამავე დროს ენერგოდაზოგვა სტიმულირებული ფასებით; ქვეყნის ენერგომოხმარების რისკების შემცირება და კრიზისული სიტუაციების განვითარების პრევენცია; საწარმოების კუთრი დანახარჯების შემცირება და ენერგორესურსების გამოყენების რაციონალური მოხმარება, ენერგოდაზოგავი ტექნოლოგიების და დანადგარების გამოყენება, დანაკარგების შემცირება და ა.შ. [3-5].

ასევე, მაგისტრალური გაზსადენების მუშაობის რეჟიმები ხასიათდება ბუნებრივი გაზის მიწოდების რხევით და ტექნოლოგიური უზნების დანაკლისის ნაწილს, რაც გარკვეულად იწვევს ენერგოდაზოგვის ღონისძიების რეალიზაციების შესაძლებლობას, დაკავშირებულს მაგისტრალურ გაზსადენებში არსებულ სახაზო ნაწილების, საკომპრესორო

სადგურების რაციონალურ რეგულირებას და მუშაობის რეჟიმების ოპტიმიზაციას.

მაგისტრალური ტრანსპორტისას, ენერგოდაზოგვის ამოცანების კვლევისას, აუცილებელია ძირითადი ობიექტების ურთიერთგავლენა და ურთიერთქმედება. მაგისტრალური გაზსადენების ტექნოლოგიური უბნები წარმოადგენს გაზსადენების ძირითად სტრუქტურულ კვანძებს, რაც შეიცავს საკომპრესორო სადგურებს და მათ შორის მყოფ სახაზო უბნებს.

მაგისტრალური მილსადენის ცოცხალი ციკლის ყველა სტადიის ფუნქციონირებისას, აუცილებელია ენერგოდაზოგვის გამოკვლევის კომპლექსის ჩატარება, რომელიც შეიცავს: მაგისტრალური მილსადენის სატუმბი (ან კომრესორული) სადგურების და სახაზო ნაწილის უბნების გამოკვლევა და ფინჩ-ანალიზი (ფინჩ-ანფლიზი (pinch - კუმშვადობა) წარმოადგენს პროცესის ენერჯის მოხმარების მინიმიზაციის მეთოდოლოგიას, მიზნური ენერჯის (ან ენერჯის მოხმარების მინიმუმი) განხორციელების ჰიდროთერმოდინამიკურ გაანგარიშებას, კონკრეტული ობიექტისათვის [6-8]. ფაქტიურად, ფინჩ-ანფლიზი არის ენერჯის მოხმარების შემცირების მეთოდოლოგია; მაგისტრალური მილსადენის ტექნოლოგიური და ენერგეტიკული დანადგარების მუშაობის ენერგოდაზოგვის ღონისძიების შემუშავება; მაგისტრალური მილსადენის ინფრასტრუქტურის ანალიზი და ოპტიმიზაცია.

მაგისტრალური მილსადენის არსებული ენერგოდაზოგვის შეფასების უზრუნველყოფა შემდეგშია: კომპანიების ერთობლივი ენერგოაუდიტის ჩატარება; თვითეული ტექნოლოგიური დანადგარების და ინფრასტრუქტურის ობიექტების, საჭიროა გამოვლინდეს ეკონომიის პოტენციალი, ანალოგიური დანადგარების შედარება მინიმალური ენერგომოხმარების მაჩვენებლის მისაღებად; მაგისტრალური მილსადენის ენერგოდაზოგვის მართვის და ენერგომოხმარების არსებული ოპტიმიზაციის პროგრამების შეფასება.

პოტენციური საშუალების ენერგომოხმარების შემცირებისა და რანჟირების გამოვლენა წარმოადგენს შემდეგს: ღონისძიებები, რომლებიც არ საჭიროებს ინვესტიციებს, საჭიროა ინვესტიციება და ა.შ.

პროგრამის რეალიზაცია მდგომარეობს შემდეგში: ღონისძიების საცდელი გარბენების ჩატარება, არ საჭიროებს ინვესტიციებს; საინვესტიციო ღონისძიების დანერგვა; ობიექტების ენერგოეფექტურობის მართვის სისტემის (ენერგომენეჯმენტი) შექმნა;

ამგვარად, საბოლოოდ საჭიროა: მაგისტრალური მილსადენის ენერგოტევადი მოწყობილობი, დანადგარები, და ინფრასტრუქტურის თბური და მატერიალური ბალანსები; მაგისტრალური მილსადენის ენერგოდაზოგვის სრული რეზერვების ანალიზი; მაგისტრალური მილსადენის ენერგოტევადი მოწყობილობის დანახარჯების მაქსიმალური შემცირება; ღონისძიებების სწრაფი დაბრუნების ხარჯები; ინვესტიციური პროექტები; მაგისტრალური მილსადენის ენერგოეფექტურობის ეკონომიკური ანალიზი.

პრაქტიკა გვიჩვენებს, რომ პროექტირების გადაწყვეტილების რეალიზაცია დაკავშირებულია მაგისტრალური მილსადენების დატვირთვის მუშა მახასიათებლების სატუმბო მოწყობილობის შერჩევას, მილების შიგა გლუვი ზედაპირებით, მუშა წნევის გაზრდა, თანამედროვე მართვის სისტემების და ტექნოლოგიური პროცესების ავტომატიზაციის ღონის გაზრდა, რაც იწვევს მაგისტრალური მილსადენების ენერგოეფექტურობის გაზრდას და შედეგად ამცირებს უსაფრთხოებას და საექსპლუატაციო დანახარჯებს [9-16].

უდავოა, რომ აქტუალურია მაგისტრალური მილსადენების თანამედროვე ტექნოლოგიების და მასალების გამოყენება. გამოვყოთ თბოიზოლაციური ეფექტური მასალების გამოყენება, თანამედროვე დანადგარები, გენერირებადი დანადგარების მარგი ქმედების კოეფიციენტის (მქკ) მაღალი მახასიათებლებით. ასევე ავტომატიზაციის და მართვის სისტემები, კომუნიკაციური სისტემების სიახლეების დანერგვა,

მოწყობილობის და სისტემების თვისობრივი მახასიათებლების გაუმჯობესობა, რაც წარმოადგენს საკვანძო ფაქტორების ეფექტურობის და უსაფრთხოების ზრდას.

მაგისტრალური მილსადენის მთავარი პრობლემა ქმნის პროდუქტის ტრანსპორტირების ოპტიმალური რეჟიმების შერჩევის დაგეგმვას. ობიექტის ენერგოდაზოგვი და ენერგოდანახარჯები წარმოადგენს მნიშვნელოვან მიმართულებას. ობიექტის გაანგარიშების კომპიუტერული პროგრამების გამოყენება და რეჟიმების ცვლილების მუდმივი კორექტირება. სატუმბი სადგურების სადაწნეო-ხარჯების და ძალოვანი აგრეგატების სიმძლავრის მახასიათებლების დადგენა, უნდა ხორციელდეს საბოლოო მილსადენის მუშაობის რეჟიმების ფორმირებას. პროდუქტის გადატუმბვის აუცილებელი მოცულობისათვის, შეირჩევა მუშა დანადგარების ეფექტურ კომბინაცია, რაც გვაძლევს მინიმალურ ენერგომოხმარებას [17-27].

სადისერტაციო ნაშრომის ერთ-ერთი მიზანია შემუშავდეს მაგისტრალური მილსადენების არასტაციონარული პროცესების მახასიათებლების განსაზღვრის მეთოდოლოგიის დადგენა. ნაშრომში, ამ მეთოდოლოგიის რეალიზაციისას, განისაზღვრება მიღებული მეთოდოლოგიის შედეგების შედარება ექსპერიმენტალურ, ნატურულ და რიცხვით შედეგებთან. განისაზღვრება იტერაციული პროცედურა, რომელიც გვაძლევს მაგისტრალური მილსადენების სიგრძეზე წინააღმდეგობების ინტეგრალური კოეფიციენტის ზუსტ მნიშვნელობას.

მაგისტრალურ მილსადენებში გარდამავალი პროცესების და წინააღმდეგობის კოეფიციენტის გამოკვლევა წარმოადგენს კვლევის დამხმარე ჰიდრავლიკურ აპარატს. მსგავსი კვლევისას, განიხილება მაგისტრალური ნავთობსადენის გამტარუნარიანობა, რომელიც წარმოადგენს ენერგეტიკული კვლევის ძირითად საგანს. მეტად მნიშვნელოვანია, თუ როგორ არის წინააღმდეგობის კოეფიციენტის ცვლილების დამოკიდებულება დროში - მაგალითად, ენერგეტიკული ობიექტის მდგომარეობისას, იცვლება მილსადენის შიგა ზედაპირი და

შესაბამისად იცვლება ისეთი ენერგეტიკული პარამეტრი როგორცაა გამტარუნარიანობა.

ამგვარად, ნაშრომის ერთერთი ნაწილი წარმოადგენს სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის განსაზღვრას, ანუ რიცხვითი და ანალიზის საშუალებით მოიძებნება ისეთი მეთოდი, რომლის საშუალებით მოიძებნება ამ პარამეტრის ზუსტი მნიშვნელობა. აქვე, შეიძლება გვექონდეს ისეთი პროცესები, სადაც გვხვდება ავარიული გაგლეჯა, მილსადენის დაცლა, მილსადენის შევსება და მრავალი სხვა.

სადისერტაციო სამუშაოს შედეგები მოხსენებულ იქნა საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სემინარებზე.

ნაშრომის მეცნიერულად დასაბუთებული პროგნოზებისა და პროგრამის ტექნიკური უზრუნველყოფის შედეგები, შემოთავაზებულია საქართველოს სათბობ-ენერგეტიკული სექტორის განვითარების სტრატეგიული გეგმისათვის.

თავი 1. მაგისტრალური მილსადენების სისტემის სარეჟიმო პარამეტრების განსაზღვრის თეორიისა და პრაქტიკის თანამედროვე მდგომარეობა

1.1. მაგისტრალური მილსადენების ტექნოლოგიური სარეჟიმო პარამეტრების ცვლილების მიზეზების განსაზღვრა

მაგისტრალური ნავთობ და ნავთობპროდუქტსადენების ექსპლუატაცია ხასიათდება გარკვეული მუშაობის რეჟიმით. მუშაობის რეჟიმი ვარაუდობს ტექნოლოგიური პარამეტრების მნიშვნელობების ერთობლიობას: სამილსადენო სისტემის მწარმოებლობას (ხარჯი) და წნევას. აქვე აღვნიშნავთ, რომ თუ ცალკე არ ვიხილებთ კონკრეტულ ობიექტს, მაშინ ყველგან ვიყენებთ ტერმინს „მაგისტრალური მილსადენი“.

მაგისტრალური მილსადენების მწარმოებლობა წარმოადგენს დროში ცვლად სიდიდეს, რომელიც გამოწვეულია მაგისტრალური მილსადენების სისტემის მუშაობის რეჟიმთან დაკავშირებულ მთელი რიგი ტექნოლოგიურ პარამეტრებთან, კერძოდ მომხმარებლების გეგმიურ მიწოდებას. ყოველთვიურად (და წლიურად) მაგისტრალური ნავთობსადენების მწარმოებლობა იცვლება ფართო ზღვრებში, მაგალითად ერთი თვის განმავლობაში შესაძლოა გვექონდეს ცვლილება 0-დან 15000 მ³/სთ-მდე [9]. ამგვარად, მილსადენის მწარმოებლობის ცვლილება კლასიფიცირდება როგორც დღიური, თვიური და წლიური მწარმოებლობა.

მაგისტრალური მილსადენების საკონტროლო კვებებში, მწარმოებლობის სიდიდის ცვლილება დამოკიდებულია მინიმალური და მაქსიმალური მნიშვნელობების წნევების არსებობაზე, აქ შესაძლოა გვექონდეს გარღვევები, ნაკადის წყვეტის შექმნა და კავიტაცია. მაგისტრალური მილსადენების მაგისტრალური ტუმბოების უბნებისათვის გვაქვს შემწოვი და სადაწნეო წერტილები, წერტილები დიდი გეოდეზიური ვარდნილებით და ა.შ.

მაგისტრალური მილსადენების სისტემის მუშაობის რეჟიმების გადახრის მიზეზების ანალიზი მნიშვნელოვანია მინიმალური და მაქსიმალური სიდიდეების წნევის აღმატებისას, აგრეთვე ელექტროენერჯის მიწოდების და მისი რაციონალური გამოყენებისას.

ნავთობისა და ნავთობპროდუქტების სამილსადენო ტრანსპორტში ენერგოდაზოგვის პრობლემას ეძღვნება სამეცნიერო ნაშრომების მთელი რიგი. მაგალითად, მეტად საინტერესოა ნაშრომი [10], იგი წარმოადგენს მაგისტრალურ ნავთობსადენის მწარმოებლობის ტექნიკური, ტექნოლოგიური და შემთხვევითი ფაქტორების ცვლილების გავლენის კვლევას. ამის თანახმად, სატუმბი სადგურის ელექტროენერჯის განაწილების გარკვეული წილი, გვიჩვენებს ნავთობის გადატუმბვის დანახარჯის 40%-მდე. თავის მხრივ ცენტრიდანული ტუმბოების ენერჯის წილი გვაძლევს დაახლოებით 25-30 %-მდე. ელექტროენერჯის დიდი დანახარჯები განსხვავებულია ნავთობსადენის საპროექტოს მწარმოებლობისგან, რის შედეგად იცვლება საჭირო სიმძლავრის სიდიდე და ტუმბოების და ელექტროძრავების მუშაობა რეჟიმში დაბალი მქკ-ის ზონაში. გადასატუმბი სადგურების ძირითადი მოწყობილობის მუშაობისას შექმნილი მტყუნები იწვევს იმას, რომ მტყუნების უშუალო პროცესის და მისი ლიკვიდაციის შემდეგ აუცილებელია გადასატუმბი სადგურების ახალი მუშაობის რეჟიმების დადგენა, რაც აკომპინსირებს ნავთობის გეგმურ მოცულობებს და უზრუნველყოფს მუშაობის საპროექტო სარეჟიმოს ცვლილებას. გარდა ამისა, ნავთობსადენის ექსპლუატაციის პროცესში, პროდუქტის გადატუმბის ცვლილებისას შესაძლოა იცვლებოდეს პროდუქტის რეოლოგიური თვისებები, რაც განისაზღვრება სიმკვრივისა და სიბლანტით.

ნაშრომში [11]-ში მოყვანილია მაგისტრალური ნავთობსადენის მუშაობის რეჟიმების გავლენის ამონაკრების ფაქტორები, რომლებიც ჯგუფდება ზემოქმედების დროითი ხასიათის გარშემო. ერთნი ფაქტორები

იყოფა გარე და შიგა ფაქტორებად, ხოლო სხვა - მუდმივები, დროში ცვლადი და შემთხვევითად.

ნაშრომ [12]-ში მოყვანილია მაგისტრალური მილსადენის ფაქტიური წნევების გადახრების მიზეზების კლასიფიკატორი. ავტორი ასხვავებს მიზეზების დაკავშირებულს მოწყობილობის მუშაობის ცვლილებას, ნავთობსადენის ტექნოლოგიური უბნის მუშაობის პირობებით და გადასატუმბი პროდუქტის თვისებების ცვლილების სამ ჯგუფს.

არსებული კლასიფიკაციის ანალიზიდან გამომდინარე შესაძლოა გამოვეყნოთ ცენტრიდანული ტუმბოების მუშა თვლებზე დატვირთვის უშუალოდ გავლენის ცვლილების ძირითადი ფაქტორები: ნავთობის მიმწოდებლებისა და მომხმარებლების მუშაობის რიტმულობა; სხვადასხვა ნავთობპროდუქტების გადატუმბვის სიმკვრივისა და სიბლანტის რხევა, და აგრეთვე მილსადენის გრუნტის ჩალაგების ტემპერატურის ცვლილება; მილსადენის შიგა დიამეტრის შემცირება, პარაფინული დალექვის ფენის გამო; რეზერვუარებთან შერთული ტუმბოების ჩართვის სქემის ცვლილება; სარემონტო გეგმურ-პრევენციული და არაგეგმიური სამუშაოები, რომლებიც დაკავშირებულია სადგურებში და მაგისტრალური მილსადენის სახაზო ნაწილში ავარიულ სიტუაციებთან; გამწმენდი მოწყობილობების გატარება.

ასეთი კლასიფიკაცია სრულად ასახავს იმ ფაქტორებს, რომლებიც იქმნება სამილსადენი სისტემის ექსპლუატაციის პერიოდში და იწვევს ამ რეჟიმების გავლენას. თუ ასეთი ფაქტორის გამო, პროდუქტის მოძრაობის რეჟიმები იცვლება, მაშინ ეს იწვევს სისტემის „სატუმბი სადგურის-მილსადენის“ მახასიათებლების მუშა წერტილის წანაცვლებას და აუცილებელია მისი რეგულირება მაგისტრალური სატუმბი აგრეგატების მქც-ის მაღალ ზონაში.

1.2. მაგისტრალური მილსადენების სისტემების მუშაობის რეჟიმების რეგულირების მეთოდების კრიტიკული ანალიზი და მათი შერჩევის პრობლემა

მაგისტრალური ნავთობსადენების ტექნოლოგიური პარამეტრების ცვლილების მიზეზების ანალიზიდან გამომდინარე უნდა ითქვას, რომ ასეთი სისტემების ექსპლუატაციისას ყოველთვის გვაქვს მუშაობის არათანაბარი რეჟიმები, რაც გამოისახება ნავთობსადენებში ხარჯისა და წნევის დროში ცვლილებით. საპროექტო მაგისტრალური მილსადენების ტექნიკურ-ეკონომიკური დასაბუთების საფუძველზე, შეირჩევა მუშაობის რეჟიმის რეგულირების მეთოდები.

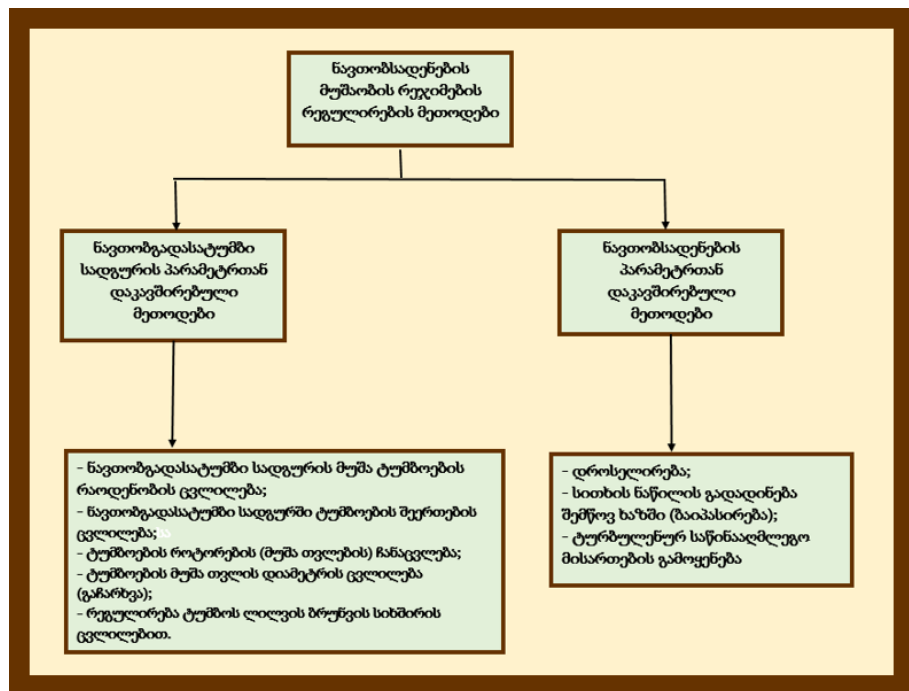
სისტემის „სატუმბო სადგურის-მაგისტრალური მილსადენის“ მუშაობის რეჟიმის რეგულირების აუცილებლობა განაპირობებს პროდუქტის ერთი მოცულობის (ან მასის) გადატუმბვის ენერჯის ეკონომიას.

რეგულირების არსი მდგომარეობს იმაში, რომ სატუმბო სადგურის და მაგისტრალური მილსადენის მახასიათებლები $H-Q$ უნდა იკვეთებოდეს მუშა წერტილში. სისტემის მოცემული წერტილი განსაზღვრავს ცალკეული ტუმბოების მუშა წერტილებს. მაგისტრალური მილსადენების მუშაობის რეჟიმის აღმწერი მეთოდები მოყვანილია მრავალ ნაშრომში. კერძოდ, არსებობს ნავთობგადასატუმბო სადგურის მუშაობის რეჟიმის რეგულირების კლასიფიკაციის მეთოდები, ექსპლუატაციის კონკრეტულ პირობების განხორციელება და ეფექტურობის ანალიზი.

დაწნევების ბალანსის განტოლებიდან გამომდინარე, მაგისტრალური მილსადენების რეგულირების მეთოდებისათვის, შეიძლება გამოიყოს სატუმბო სადგურის და მილსადენის ცვლად პარამეტრებიანი მეთოდებით [28,29] (ნახ. 1).

ნახ. 1-ზე ნაჩვენებია სატუმბო სადგურებთან დაკავშირებული პარამეტრის ცვლილებები და სატუმბო სადგურების სატუმბო მოწყობილობის მახასიათებლების რეგულირების მეთოდები.

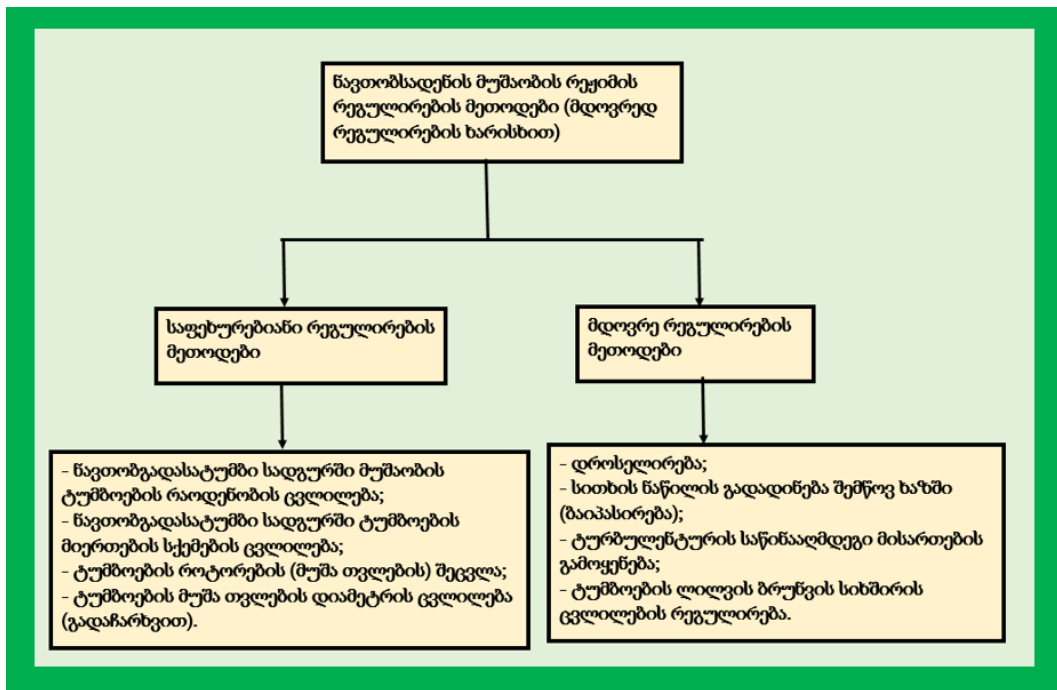
გარდა ამისა აგრეთვე კლასიციფირდება რეგულირების მდოვრობის ხარისხის მიხედვით: საფეხურებიანი [29] და მდოვრედ მეთოდები. პირველნი აგლუვებენ თვითურ და სეზონურ არათანაბრობას, ხოლო მეორენი - მუდმივად, აკორექტირებენ სისტემის „სატუმბო სადგურის-მაგისტრალური მილსადენის“ სისტემის მუშა წერტილს ოპტიმალურ რეჟიმებს. ე.ი., მუდმივად ხდება მიწოდების ცვლილების გაგლუვების უზრუნველყოფა (ნახ. 2).



ნახ. 1. მილსადენის მუშაობის რეჟიმების რეგულირების მეთოდები

განვიხილოთ, მომუშავე ტუმბოების რაოდენობა და სატუმბო სადგურში ტუმბოების მიერთების სქემის ცვლილება. ასეთი მეთოდები წარმოადგენს საფეხურიან მეთოდებს და გვადლევს ხარჯისა და წნევის დისკრეტული ცვლილების მკაფიო ვარიანტებს. ამის მიხედვით, მომუშავე მიერთების მაგისტრალური ტუმბოები გაანგარიშდება სამუშაო რეჟიმებით.

გარდა ამისა, აუცილებელია რეგულირების სქემით მაგისტრალური მილსადენის უბნის ჰიდრავლიკური ციკაბო მახასიათებლების გათვალისწინება. ნაშრომებში [28-30]-ში მოყვანილია ორი ერთნაირი, პარალელურად და მიმდევრობით მიერთებული ცენტრიდანული ტუმბოები, სხვადასხვა ჰიდრავლიკური მახასიათებლებით. ამ საფუძველზე, ცენტრიდანული ტუმბოებით, მიწოდების და წნევის ცვლილების და მარგი მქც-ის ანალიზის შედეგად მიიღება დასკვნა, რომ მიზანშეწონილია ტუმბოების პარალელური მიერთებისას ციკაბო მახასიათებლის გამოყენება. ცენტრიდანული ტუმბოების პარალელური სქემის მიერთება - დასაშვებია, რადგანაც აქ გვაქვს არაციკაბო მახასიათებელი.



ნახ. 2. მილსადენის მუშაობის რეჟიმის რეგულირების მეთოდები (გაგლუვების რეგულირების ხარისხის მიხედვით)

თუ განიხილება მაგისტრალური ნავთობსადენის ტრასის გეოდეზური პირობები, ზედაპირზე გატარებული მაგისტრალური მილსადენი და სატუმბო სადგურის ენერგოეფექტურობა, მაშინ გვაქვს ტუმბოების მიმდევრობითი მიერთება, ხოლო თუ გვაქვს სადგურის უბანი

დიდი სტატიკური დაწნევის, მაშინ საჭიროა ტუმბოების პარალელური მიერთება, შეტბორვის დამხმარე ტუმბოებით [31]. განხილული მართვის მეთოდი, მახასიათებლის მაღალი დანაკარგებისას, ხდება რეჟიმის შორის გადართვის და ელექტროენერჯის მცირე მქც-ით. იგი შორსაა ნომინალური მწარმოებლობისგან, რომლის დროს გვაქვს მისი მაქსიმალური სიდიდე.

განვიხილოთ ტუმბოების მუშა თვლების შეცვლა და დიამეტრის ცვლილება (გადაჩარხვით). ცნობილია, რომ მაგისტრალური ცენტრიდანული ტუმბოები დაკომპლექტებულია შემცვლელი მუშა თვლებით ნომინალური მიწოდებით, რომლებსაც გააჩნია სხვადასხვა ჰიდრავლიკური მახასიათებლები [30]. ტუმბოების რეგულირების ასეთი მეთოდი მიჩნეულია მდოვრე, რადგანაც ტუმბოების მუშა თვლების ხშირი შეცვლა პრაქტიკულად შეუძლებელია [31].

ცენტრიდანულ ტუმბოების მუშა თვლების რეგულირების მეთოდი მდგომარეობს იმაში, რომ ხდება მუშა თვლის გარე დიამეტრის შემცირება (გაჩარხვა). ამ მეთოდს გააჩნია მნიშვნელოვანი ხარვეზი - არ შეიძლება წინა მუშა თვლის უკუდაბრუნება, რადგანაც გაჩარხვა შესაძლებელია მხოლოდ 20%-ით, და მქც ვარირდება 1-3%-ით [30].

სატუმბო სადგურის მუშა რეჟიმის რეგულირება დროსელირებით წარმოადგენს სითხის ნაკადის წინააღმდეგობის ცვლილებას, ცოცხალი კვეთის ფართობის შევიწროვებით, სადგურის კვანძებში მოთავსებული წნევის რეგულატორების საშუალებით. რეგულირების ასეთი მეთოდი არაეკონომიკურია, რადგანაც სატუმბო სადგური ავითარებს ჭარბ დაწნევას, რაც ზრდის პროდუქტის ტრანსპორტის დანახარჯს. დანაკარგები დროსელირებისას შეიძლება მიაღწიოს ტუმბოების ამძრავზე დახარჯული ელექტროენერჯის სიმძლავრის 15-20%-მდე [32]. მიზანშეწონილია დროსელირების მეთოდის გამოყენება ტუმბოებისა, სადაც ხდება ისეთი დამრეცი სადაწნეო მახასიათებლებით, ხოლო ენერჯის დანაკარგი დროსელირებისას არ უნდა აღემატეს გადასატუმბის ენერგოდანახარჯების 2%-ს.

რეგულირების მეთოდი გადადინებით (ზაიპასირების მეთოდი) მდგომარეობს იმაში, რომ სითხის ნაწილი გადაედინება ტუმბოს გასასვლელზე და კვლავ ბრუნდება შესასვლელზე. ამ დროს ხდება სამილსადენო სისტემის მახასიათებლის ცვლილება, რომლის შემდეგ იცვლება მუშა წერტილის განლაგება. ეს იწვევს მილსადენის მუშაობის რეჟიმის ცვლილებას და დამატებით დანაკარგებს. ცხადია, რომ მილსადენის მწარმოებლობა ყოველთვის მცირდება. მაგისტრალური მილსადენების სისტემის ექსპლუატაციის პრაქტიკაში, ეს მეთოდი განიხილება საკმაოდ იშვიათად, რადგანაც სათავო სატუმბ სადგურებზე, შესაძლებელია პროდუქტის გატარება რეზერვუერებით საშუალებით [30].

ტურბულენტურის საწინააღმდეგო მისართების გამოყენებისას, სპეციალური მისართები გვამლევს მაგისტრალური მილსადენების ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის შემცირებას, ტურბულენტური პულსაციების ჩასაქრობად.

განვიხილოთ ტუმბოს ლილვის ბრუნვის სიხშირის ცვლილების რეგულირება. იგი მაგისტრალური მილსადენების მუშაობის რეჟიმების რეგულირების ყველაზე ეფექტური და პროგრესული მეთოდია - მაგისტრალური ცენტრიდანული ტუმბოს ლილვის ბრუნვის სიჩქარის სიხშირითი რეგულირება. იგი, როგორც წესი, დაიგეგმება ცენტრიდანული ტუმბოს ბრუნვის სიხშირის რეგულირების 60-70%-დან 100%-მდე [33, 36-38].

ბრუნვის სიხშირის ცვლილების მეთოდი დაფუძნებულია ცენტრიდანული ტუმბოს მსგავსების თეორიაზე [34,35].

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{Q_{n1}}{Q_{n2}} = \frac{n_1(\omega_1)}{n_2(\omega_2)}; \\ \frac{H_{n1}}{H_{n2}} = \left[\frac{n_1(\omega_1)}{n_2(\omega_2)} \right]^2; \\ \frac{N_{n1}}{N_{n2}} = \left[\frac{n_1(\omega_1)}{n_2(\omega_2)} \right]^3. \end{array} \right. \quad (1)$$

სადაც Q_{n1}, H_{n1}, N_{n1} შესაბამისად არის მაგისტრალური ტუმბოს მწარმოებლობა, დაწნევა და მოხმარებული სიმძლავრე, n_1 მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირისას (კუთხური სიჩქარე ω_1); Q_{n2}, H_{n2}, N_{n2} - იგივე n_2 მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირისას (კუთხური სიჩქარე ω_2).

ბრუნვის სიხშირის შემცირებისას, ტუმბოს მახასიათებელი იცვლება და მუშა წერტილი წაინაცვლება **A** წერტილიდან, **B**-ში (ნახ. 3).

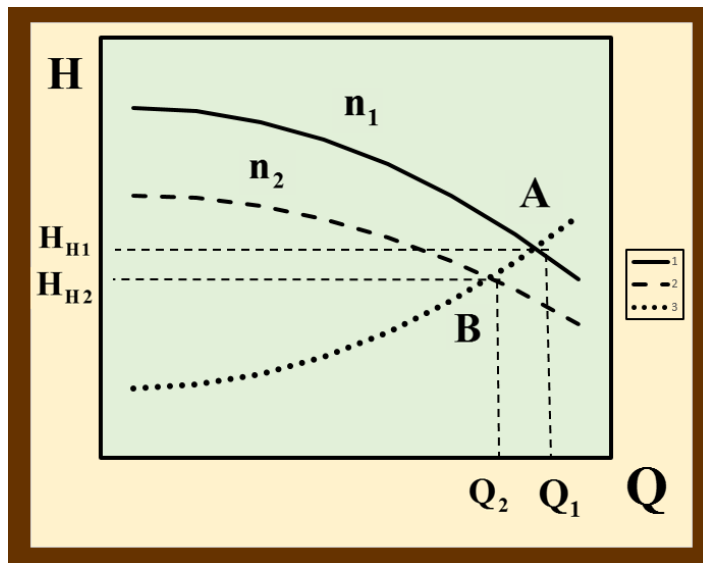
სატუმბო სადგურის მუშაობის რეჟიმის რეგულირებისას, ხდება ცენტრიდანული ტუმბოების მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის ცვლილება **H-Q** მახასიათებლებით, მქკ-ის უცვლელად. უფრო სწორედ, ტუმბოს სადაწნეო მახასიათებლების წაინაცვლება, ასევე წაინაცვლება მქკ-ის მახასიათებელიც. ასეთი მეთოდი უფრო ეკონომიკურია, თუმცა მისი მოწყობილობის შექმნა და მონტაჟი მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის ცვლილებისას, იწვევს დამატებით კაპიტალურ დანახარჯებს.

აღნიშნული მეთოდი ადვილებს სადგურების მუშაობის სინქრონიზაციას და ხდება ჰიდრავლიკური დარტყმების თავიდან აცილება. ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის ცვლილება შეიძლება განხორციელდეს შემდეგ სამ შემთხვევაში [8,10]: ცვლადი ბრუნვის სიხშირის ცვლადი ძრავების გამოყენება; ტუმბოს ლილვზე სპეციალური გასრიალების რეგულირებადი კოეფიციენტით მყოფი მუფტების დაყენება; ელექტროძრავების ცვლადი დენის სიხშირის გარდაქმნელების გამოყენება.

დღეისათვის, ელექტროძრავების მართვა სიხშირის გარდაქმნელებით, ხდება ორი არხით, სიხშირის და ძაბვის ცვლილებით. მაგისტრალური სატუმბო აგრეგატების სიხშირითი-მარეგულირებადი ამძრავის კვლევა, საშუალებას იძლევა გარკვეულ განსაკუთრებლებს [39-41].

ამგვარად, სიხშირითი რეგულირებადი ამძრავის არ არსებობის შემთხვევაში, გამოიყენება დროსელირების მეთოდი. სიხშირითი რეგულირებადი ამძრავის არსებობის შემთხვევაში, შეიძლება მოხდეს დროსელირების კვანძის ლიკვიდაცია და აგრეგატები ქმნის მუშაობის საჭირო რეჟიმს შემდგომი წნევის რეგულირებისას. სიხშირითი

რეგულირებადი ამძრავის სიხშირის ცვლილება ფართე დიაპაზონშია და ხდება აგრეგატის მქკ-ის არსებითი შემცირების დროს. ამ დროს, გაცილების მეტია დანახარჯების ეკონომია დროსელირების გამოყენებისას. სიხშირითი რეგულირებადი ამძრავის არსებობის, აგრეგატების ჩართვა და გაჩერება ხდება მდოვრედ, რის დროს არარსებობს დატვირთვის იმპულსური ხასიათი. გადატუმბვის გამოსვლა სტაციონარულ რეჟიმზე - მდოვრეა, რაც ზრდის მაგისტრალური მილსადენის ნარჩენ რესურს. სადგურში სიხშირითი რეგულირებადი ამძრავის არსებობა, მიზანშეწონილია გადატუმბვის დიდი არათანობრობის გამოყენებისას.



ნახ. 3. მილსადენის და ტუმბოს ერთობლივი მახასიათებელი მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის ცვლილებისას; 1. მაგისტრალური ტუმბოს სადაწნეო მახასიათებელი n_1 ბრუნვის სიხშირისას; 2. იგივე n_2 ბრუნვის სიხშირისას; 3. ქსელის მახასიათებლის წირო

ოპტიმიზაციის ამოცანა ამოიხსნება მუშაობის ოპტიმალური რეჟიმის შერჩევისას, სადაც ოპტიმიზაციის კრიტერიმად, როგორც წესი, მიიღება პროდუქტის ერთეული მოცულობის (ან მასის) გადატუმბვის კუთრი ენერგოდანახარჯები.

სატუმბ სადგურში ამძრავის ძირითად ტიპებად წარმოადგენს ელექტრომძრავას. ელექტროენერგია იხარჯება არა მხოლოდ უშუალოდ

პროდუქტის გადატუმბვისას, არამედ საკუთარი საჭიროებების დროს. ელექტროძრავაში, ელექტრული ენერგია გადადის ცენტრიდანული ტუმბოს ლილვზე მექანიკურში, ხოლო ეს ენერგია გადადის ჰიდრავლიკურში.

დღეისათვის, მეტად აქტუალურია გადატუმბვის პროცესის ელექტროენერჯის მოხმარების კონტროლის საკითხი. კერძოდ [42]-ში განიხილება ენერგო მოხმარების საკითხები, უშუალოდ მუშაობის რეჟიმებთან დაკავშირებული ელექტროენერჯის დანახარჯის კლასიფიკაციასთან.

მაგისტრალური მილსადენის სისტემის მუშაობის რეჟიმი განსაზღვრავს გარკვეული პარამეტრების ნაკრებს, რომლებიც შეიძლება იცვლებოდეს ფართო დიაპაზონში. ისინი უზრუნველყოფს ერთეული მოცულობის (ან მასის) ნავთობის გადატუმბვის დანახარჯების მინიმიზაციას, რომლებიც აკმაყოფილებს დასაშვები მახასიათებლების საიმედოობას და უსაფრთხოებას.

მაგისტრალური მილსადენის სისტემის მუშაობის რეჟიმის რეგულირების მეთოდები და ოპტიმიზაციის ვარიანტები მეტად მრავალფეროვნებია, რაც გვიჩვენებს არაცალსხობის პრობლემას და რეჟიმების შერჩევის კრიტერიუმების ვარიანტობას [43-45].

1.3. მაგისტრალური ცენტრიდანული ტუმბოების ძირითადი პარამეტრები და მახასიათებლები

მაგისტრალური მილსადენების სისტემის ერთერთი ძირითადი კვანძებია - სატუმბი სადგურები. სატუმბ სადგურებში ძირითად გამოიყენება ცენტრიდანული ტუმბოები, რომლებსაც გააჩნიათ შემდეგი ჰიდრომექანიკური მახასიათებლები: სადაწნეო, მქკ, სიმძლავრე და კავიტაციური მახასიათებლები. მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის და მოცემული გადასატუმბი პროდუქტის თვისებები განსაზღვრულია

პარამეტრებით, რომლებზეც დამოკიდებულია ცენტრიდანული ტუმბოს მწარმოებულობაზე.

ძირითადი მახასიათებლების და ცენტრიდანული ტუმბოების ექსპლუატაციის განსაკუთრებულებების აღწერაში დიდი მნიშვნელობაა ისეთი ნაშრომები როგორებიცაა [46-51], სადაც შემუშავდა კონსრუქციული პარამეტრების, ჰიდრავლიკურ სისტემების მათემატიკური მოდელები და გადასატუმბი პროდუქტის თვისებები.

ფუნქციონალურად, ცენტრიდანული ტუმბოს შექმნილი დიფერენციალური დაწნევა, განისაზღვრება შემდეგი დამოკიდებულებით.

$$H = n^2 D^2 f \left(\frac{Q}{\pi D}, \frac{\pi D^2}{v} \right), \quad (2)$$

სადაც n არის მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირე; D - ტუმბოს მუშა თვლის გარე დიამეტრი; v - გადასატუმბი პროდუქტის კინემატიკური სიბლანტე.

ცენტრიდანული ტუმბოს ძირითად განტოლებას წარმოადგენს შემდეგი სახე (ეილერის განტოლება) [46-48];

$$H_T = \frac{\mu(v_{2n}u_2 - v_{1n}u_1)}{g}, \quad (3)$$

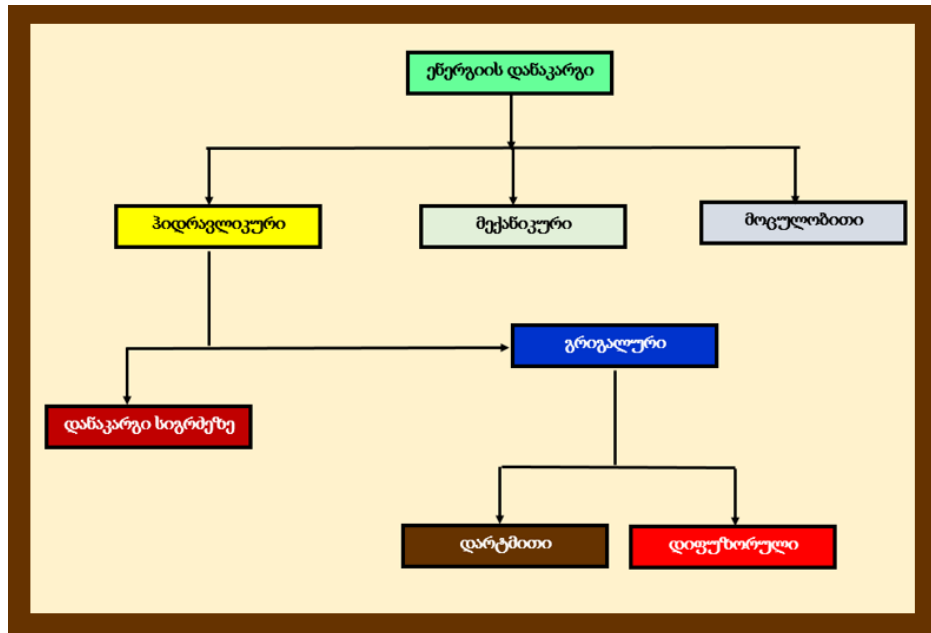
სადაც H_T არის თეორიული დაწნევა; μ - მუშა თვლის ფრთების რაოდენობა; v_{1n}, v_{2n} - ნაკადის სიჩქარის აბსოლუტური პროექციები, და შესაბამისი წრიული სიჩქარეები - u_1, u_2 , თვლის შესასვლელზე და გამოსასვლელზე.

რადიალური შესასვლელის პირობებში, განტოლება (3) გარდაიქმნება თეორიული მწარმოებლობის წრფივ დამოკიდებულებად, თეორიული დაწნევისას [51-55].

$$H_T = \frac{u_2^2}{g} - \frac{u_2}{g} \frac{Q_T \text{ctg} \beta_2}{\pi b_2 D_2}, \quad (4)$$

სადაც Q_T არის ტუმბოს თეორიული მწარმოებლობა; u_2 - წრიული სიჩქარე თვლის შემოსასვლელზე; D_2 - დიამეტრი თვლის შემოსასვლელზე; b_2 - სიგანე თვლის შემოსასვლელზე; β_2 - ფრთების დახრის კუთხე.

რეალურ პირობებში, სადაწნეო მახასიათებელი განსხვავდება თეორიულისგან. ცენტრიდანული ტუმბოს მუშაობა თან სდევს ენერჯის დანაკარგებს, რაც იწვევს ეკონომიკურ მუშაობას და დახარჯული ენერჯის სიდიდეს. ითვლება, რომ ცენტრიდანულ ტუმბოებში გამოიყოფა სამი სახის დანაკარგი: ჰიდრავლიკური, მექანიკური და მოცულობითი (ნახ. 4) [56]



ნახ. 4. ცენტრიდანული ტუმბოებში ენერჯის დანაკარგების კლასიფიკაცია

ჰიდრავლიკური დანაკარგები შეიქმნება სითხის ჰიდრავლიკური ფრთებს შორის გამდინარე არხებში ხახუნის გამო, ხოლო ადგილობრივი დანაკარგები განისაზღვრება თვლის კონსტრუქციით. ჰიდრავლიკური დანაკარგები განაპირობებს ხახუნს სიგრძეზე და გრიგალურ დანაკარგებს, როგორც მუშა თვალში, ასევე კორპუსში. გრიგალური დანაკარგები შეიძლება იყოს დარტყმითი და დიფუზორი, რაც განპირობებულია სასაზღვრო ფენის მოწყვეტისას ტუმბოს გამდინარე ნაწილში. შედეგად იქმნება გრიგალური ზონები, რომლებიც ზრდის ენერჯის დანაკარგს. ჰიდრავლიკური მქკ-ს ახასიათებენ შემდეგნაირად:

$$\eta_r = \frac{H_T - h_r}{H_T}, \quad (5)$$

სადაც h_T არის ჰიდრავლიკური დანაკარგები ცენტრიდანულ ტუმბოში.

ენერგიის მექანიკური დანაკარგები განისაზღვრება ხახუნით საკისარებში და შესქელებებში, ასევე დისკური ხახუნის გამო. ასეთი ენერგიის დანაკარგები გვაქვს ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის მთელ დიაპაზონში. მექანიკური დანაკარგების გავლენა აისახება მექანიკური მქკ-ით:

$$\eta_M = \frac{N_T - N_M}{N_T}, \quad (6)$$

სადაც N_T და N_M შესაბამისად არის ტუმბოს თეორიული სიმძლავრე და მექანიკური სიმძლავრის დანაკარგი.

მოცულობითი დანაკარგები იქმნება სითხის გადადინებისას გამოსასვლიდან შესასვლელზე, სპირალურ ამრინებში და თვლის სხვა ელემენტებში, გაჟონვები შესქელებლებში. ასეთი დანაკარგები გამოისახება მოცულობითი მქკ-ით:

$$\eta_o = \frac{Q_T - \Delta Q}{Q_T}, \quad (7)$$

სადაც ΔQ არის გაჟონვები ცენტრიდანულ ტუმბოში.

ცენტრიდანულ ტუმბოს რეალური სადაწნეო მახასიათებელი, მუდმივი ბრუნვის სიხშირით აღიწერება მეორე რიგის სრული პოლინომით:

$$H = a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2 : \quad (8)$$

სადაც a_0, a_1, a_2 არის მუდმივი კონსტრუქციული კოეფიციენტები, რომლებიც განისაზღვრება ცენტრიდანული ტუმბოების საპასპორტო მახასიათებლებით, ან ექსპლუატაციის პროცესში გამოცდების შედეგად.

ხშირად მაგისტრალური ტუმბოების სადაწნეო მახასიათებლის აღსაწერად გამოიყენება მეორე რიგის არასრული პოლინომი:

$$H = a - bQ^2. \quad (9)$$

კოეფიციენტი a_0 (a - (9) გამოსახულებაში ასახავს ცენტრიდანული ტუმბოს განვითარებულ დაწნვის სიდიდეს, ნულოვანი მიწოდებისას ($H_{Q=0}$)).

კოეფიციენტი $a_1 = \frac{u_2 \text{ctg} \beta_2}{g \pi b_2 D_2}$, ძირითადად განსაზღვრავს მუშა თვლის

კონტრუქციულ განასუთრებულებებს და ასახავს ჰიდრავლიკურ დანაკარგებს ხახუნზე.

კოეფიციენტი a_2 (b - გამოსახულება (9)-ში), ხასიათდება დარტყმითი და დიფუზორული დანაკარგების სიდიდით.

ცენტრიდანული ტუმბოს სრული მქკ ტოლია:

$$\eta_H = \eta_r \eta_M \eta_o \quad (10)$$

ცენტრიდანული ტუმბოს მქკ დამოკიდებულია დაწნევაზე და აპროქსიმირდება გარკვეულ ბრუნვის სიხშირეზე მესამე რიგის პოლინომით, თანაც თავისუფელი წევრი ნულის ტოლია, რადგანაც ნულოვანი მიწოდებისას არ გვაქვს ჰიდრავლიკური და მოულობითი დანაკარგები:

$$\eta_H = c_1 Q + c_2 Q^2 + c_3 Q^3 \quad (11)$$

სადაც კოეფიციენტები c_1, c_2, c_3 განისაზღვრება ცენტრიდანული ტუმბოს საპასპორტო მახასიათლებიდან ან ექსპლუატაციის პროცესში გამოცდების ჩატარებისას.

სატუმბი აგრეგატის სრული მქკ ტოლია:

$$\eta = \eta_H \eta_\Sigma \eta_{\text{Meq}} \quad (12)$$

სადაც η_H არის ტუმბოს სრული, η_Σ - ამძრავის (ელექტროძრავის) და η_{Meq} - გადაცემის მექანიკური შესაბამისად მქკ-ები.

ცენტრიდანული სატუმბი აგრეგატის სრული სიმძლავრე ტოლია:

$$N_{sr} = \rho g \frac{QH}{\eta} \quad (13)$$

სადაც ρ არის გადასატუმბი პროდუქტის სიმკვრივე; η - ცენტრიდანული აგრეგატის სრული მქკ.

პროდუქტის გადასატუმბად, სადაწნეო მახასიათებლები შეესაბამება ავტომოდელურ რეჟიმებს, თუ ასეთი პროდუქტები არ დამოკიდებულია სიბლანტეზე. მაგრამ მქკ-ის მახასიათებლები მეტად მგრძნობიერა და

აუცილებელია გაანგარიშების გათვალისწინება [54]. ასეთი ზუსტი დამოკიდებულების მიღება, მეტად რთულია. ამავე ნაშრომში [54], გამოიყენება მქკ-ის მახასიათებლის გადაანგარიშების მიახლოებითი ფორმულა.

$$\eta_v = \eta_b \left[1 - \eta_b \left(\text{alg} \frac{\mathbf{Re}_b}{\mathbf{Re}_v} + \frac{\mathbf{A}}{\mathbf{Re}_v^{0,89}} \right) \right], \quad (14)$$

სადაც η_v, η_b არის ტუმბოს მქკ, შესაბამისად ბლანტი ნავთობის და წყლისათვის; $\mathbf{Re}_b, \mathbf{Re}_v$ - შესაბამისად წყლის და ნავთობის რეინოლდსის რიცხვები; \mathbf{A} - კოეფიციენტი, რომელიც დამოკიდებულია ტუმბოს კონსტრუქციაზე და განისაზღვრება სწრაფმავლობის \mathbf{n}_s -ით.

1.4. მილსადენებში არასტაციონარული პროცესების თანამედროვე

მათემატიკური მოდელები

მილსადენებში არსებობს არასტაციონარული პროცესები, რომლის დროს პროდუქტის ნაკადის პარამეტრები იცვლება სიგრძისა და დროში [52]. ამ ნაშრომის თანახმად, არასტაციონარულ პროცესად ითვლება ისეთი პროცესი, რომლის გარკვეული დროის მონაკვეთოსათვის ხდება წნევის, ნაკადის სიჩქარის, ტემპერატურის და სხვა პარამეტრების ცვლილება.

არასტაციონარული რეჟიმების წარმოქმნის შესაძლო მიზეზები შემდეგია: მაგისტრალური მილსადენის გაშვება და გაჩერება; სათავო, ან საშუალო სადგურების მაგისტრალური სატუმბო აგრეგატების ჩართვა და გამორთვა; სადგურში, ან მილსადენის სახაზი ნაწილში ურდულების სრული ან ნაწილობრივი გაღება; რეზერვუარების გადართვა სათავო სადგურში; სითხის ამრინება ან შეჭირხვნა; მილსადენის რღვევა.

აღნიშნული მიზეზების გამო, წნევა, სიჩქარე, ხარჯი, ტემპერატურა და ა.შ. იცვლება. ასეთი ცვლილებები მიმდინარეობს იქამდე, სანამ დამყარდება ახალი რეჟიმი, რომელსაც ხშირად გარდამავალი რეჟიმები

ეწოდება [56]. არასტაციონარული რეჟიმების პროცესებს, და შესაბამად მათი სასაზღვრო პირობებს იკვლევდა ისეთი გამოჩენილი მეცნიერი როგორცებია ნ.ე. ჟუკოვსკი, ი.ა. ჩარნი, დ.ა. ფოქსი, მ.ვ. ლურიე და ა.შ.[57-60].

მილსადენებში ნაკლებ კუმშვადი სითხის არასტაციონარული ნაკადის მოდელი აღწერებულია [58]-ში. კერძოდ მიღებულია მილსადენის სიგრძეზე არასტაციონარული პროცესის აღმწერი ორი დიფერენციალური განტოლება კერძო წარმოებულებში:

$$\begin{cases} \frac{\partial H(x,t)}{\partial t} + \frac{\rho_0 c^2}{\omega_0} \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} = 0; \\ \frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} + g\omega_0 \frac{\partial H(x,t)}{\partial x} = -\lambda \frac{Q^2(x,t)}{1\omega_0 D_0}. \end{cases} \quad (15)$$

სადაც $c = \frac{c_0}{\sqrt{\frac{\rho_0}{K} + \frac{\rho_0 D_0}{E\delta}}}$; ρ_0 - სითხის სიმკვრივე; ω_0 - ცოცხალი კვეთის

ფართობი; λ - ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის კოეფიციენტი; D_0 - მილსადენის შიგა დიამეტრი; δ - მილსადენის კედლის სისქე; K - სითხის დრეკადობის მოცულობითი მოდული; E - მილის მასალის დრეკადობის მოცულობითი მოდული.

აღნიშნული განტოლებებისათვის ცნობილი უნდა იყოს საწყისი და სასაზღვრო პირობები. საწყისი პირობებისას, ცნობილი უნდა იყოს წნევის და სიჩქარე მილსადენის ნებისმიერ კვეთში და დროის საწყისი მომენტებში. სასაზღვრო პირობებისას განიხილება მილსადენის საწყის და ბოლო კვეთში წნევის და სიჩქარის მნიშვნელობები (ან ფუნქციები) დროის განმავლობაში. ამის გარდა აღნიშნული განტოლებებისას, უნდა დაემატოს $H-Q$ სადგურის მახასიათებლები და ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირეს განტოლება.

ხშირად გამოიყენება მილსადენებში არასტაციონარული პროცესების ამოცანების გრაფო-ანალიზურ მეთოდები [61,62], აგრეთვე მაგისტრალური სატუმბო აგრეგატების ჩართვისა და გამორთვის საკითხები, სხვადასხვა პირობებში.

1.5. ნაშრომის დასმული ამოცანების კვლევა

1. მაგისტრალური სისტემების ექსპლუატაცია დაკავშირებულია მუშაობის ენერგოეფექტური რეჟიმის ტექნიკური პრობლემების შერჩევასთან, დროის გარკვეული ინტერვალის პროდუქტის გადატუმბვის არათანაბარი მიზეზით გამო;

2. „სატუმბო მოწყობილობა - მაგისტრალური მილსადენი“ სისტემის მუშაობის რეჟიმების რეგულირების არსებულ მეთოდებს გააჩნია მთელი რიგი ხარვეზები, რის გამოც საჭიროა მათი შერჩევის აუცილებლობა პროექტირების და ექსპლუატაციის გარკვეული პირობებისას;

3. „სატუმბო მოწყობილობა - მაგისტრალური მილსადენი“ სისტემის მუშაობის რეჟიმების შერჩევა ხორციელდება ერთეული გადასატუმბი პროდუქტის კუთრი ენერგოდანახარჯების კრიტერიუმით, აუცილებელი მოწყობილობის შექმნის და მონტაჟის კაპიტალური დანახარჯების გათვალისწინებით;

4. რეგულირების პერსპექტიულ მეთოდად მიჩნეულია ცენტრიდანული ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის რეგულირების მეთოდად;

5. მაგისტრალური მილსადენის მუშაობის რეჟიმის ოპტიმიზაციის ერთერთი ვარიანტი, კერძოდ მაქსიმალური სატუმბი აგრეგატის მქც-ის მაქსიმიზაცია - არასკმარისია გამოკვლეულ ლიტერატურაში.

ამგვარად, კვლევის ძირითადი ამოცანები შემდეგშია:

1. შემუშავდეს მაგისტრალური სატუმბი აგრეგატების მართვის ახალი მეთოდი, რომელიც უზრუნველყოფს მათი ექსპლუატაციის ენერგოდაზოგვის რეჟიმს და შესაბამისად რეალიზაციას;

2. შემუშავდეს „სატუმბო მოწყობილობა - მაგისტრალური მილსადენი“ სისტემის მუშაობის პროცესების მათემატიკური მოდელი, ცენტრიდანული ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის ცვლილების გათვალისწინებით;

3. შემუშავდეს სატუმბი სადგურის მოწყობილობის სარეჟიმო პარამეტრების საინჟინრო მეთოდოლოგია, პროექტირების სტადიაზე;

4. შემუშავდეს „სატუმბო მოწყობილობა - მაგისტრალური ნავთობსადენი“ სისტემის გადასტუმბი სადგურის მუშაობის რაციონალური რეჟიმის ალგორითმი, პროექტირების სტადიაზე და შედარდეს არსებული რეგულირების მეთოდებთან.

თავი 2. მილსადენებში არასტაციონარული პროცესის წინააღმდეგობის კოეფიციენტის გაანგარიშება რიცხვითი მეთოდით

2.1. მაგისტრალური მილსადენის არასტაციონარული პროცესის აღწერა, მიზანი და მეთოდიკის შემუშავება

2.1.1. ამოცანის დასმა, ნაშრომის მიზანი და მეთოდიკა

განვიხილოთ მილსადენში სითხის არასტაციონარული პროცესი. ჩვენი მიზანია პროცესის სრული დროის განმავლობაში და მილსადენის სიგრძის გასწვრივ, დავადგინოთ წინააღმდეგობის კოეფიციენტის ფუნქცია, ე.ი. $\hat{\lambda} = \hat{\lambda}(\mathbf{x}, t)$. პროცესის გასაანგარიშებლად, მივყვეთ გაანგარიშების მეთოდიკას, ბიჯების მიხედვით.

1. განვიხილოთ სადაწნეო, არასტაციონარული სითხეების მოძრაობა მილში და მათი შესაბამისი დიფერენციალური განტოლებები (ჩარნის განტოლებები).

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \frac{\lambda \rho V^2}{2D} + \rho g \sin \alpha + \frac{\partial}{\partial x} [(1 + \beta) \rho V^2] \\ -\frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial(\rho V)}{\partial x} \end{array} \right. \quad (16)$$

სადაც p და V შესაბამისად არის ცოცხალ კვეთში საშუალო წნევა და სიჩქარე; ρ - სითხის სიმკვრივე ; λ - ჰიდრავლიკური ხახუნის კოეფიციენტი; D - მილის შიგა დიამეტრი; α - მილის ჰორიზონტისადმი დახრის კუთხე; β - კორიოლისის კოეფიციენტი სიჩქარეთა არათანაბარი განაწილების გამო.

2. აღნიშნულ განტოლებებში შედის სამი უცნობი: საშუალო სიჩქარე - $V(\mathbf{x}, t)$, წნევა - $p(\mathbf{x}, t)$ და სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტი $\lambda(\mathbf{x}, t)$. განტოლებების სისტემა, საწყისი და სასაზღვრო პირობებით - ჩაკეტილი არ

არის, რადგანაც $\lambda(\mathbf{x}, t)$ ცნობილია მხოლოდ სტაციონარული რეჟიმები და $\lambda = \text{const}$.

3. რადგანაც $\lambda(\mathbf{x}, t)$ -ფუნქცია უცნობია, ამიტომ შეუძლებელია არასტაციონარული რეჟიმების მართვა. ამიტომ, საჭიროა - მოიძებნოს ზედაპირი $\lambda(\mathbf{x}, t)$, შესაბამის რეალიზაციების საშუალებით.

4. არსებული რეალიზაციების მიხედვით, ანალიზი უზუსტოა, რადგანაც მილსადენის სიგრძის კვანძების რაოდენობები შეზღუდულია. ამიტომ ხდება არსებული რეალიზაციების მიხედვით, წერტილების „გაბევრება“. მაგალითად „სპლაინ-ფუნქციების“ გამოყენება.

5. უკვე „ახალი რეალიზაციებისათვის“, შემუშავდება რიცხვითი ალგორითმი, კერძოდ ხდება $\lambda(\mathbf{x}, t)$ -ს ზედაპირის აგება.

6. კერძოდ შემთხვევებში შესაძლოა სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის ინტეგრალური მნიშვნელობის დადგენა.

2.1.2. არასტაციონარული პროცესის წინააღმდეგობის კოეფიციენტის დადგენის ალგორითმი

როგორც ცნობილია, მილსადენის გარკვეულ უბანზე, მასური ხარჯი გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$\mathbf{M} = -\frac{\omega}{\mathbf{k}} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}}, \quad (24)$$

სადაც \mathbf{M} არის მასური ხარჯი, \mathbf{p} - წნევა, \mathbf{X} - გრძივი კოორდინატა, ω - ცოცხალი კვეთის ფართობი, ხოლო კოეფიციენტი $\mathbf{k} = \left(\frac{\lambda \mathbf{V}}{2\mathbf{D}} \right)$ (λ - წინააღმდეგობის კოეფიციენტი).

რადგანაც $\mathbf{Q} = \frac{\mathbf{M}}{\rho}$, ამიტომ საბოლოოდ გვექნება:

$$\begin{cases} \mathbf{M} = -\frac{\omega}{\mathbf{k}} \frac{\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2}{\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2}; \\ \mathbf{Q} = -\frac{\omega}{\rho \mathbf{k}} \frac{\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2}{\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2}. \end{cases} \quad (25)$$

რადგანაც $p = \rho g H$ (სადაც ρ არის სითხის სიმკვრივე), ამიტომ გვექნება:

$$Q = -\frac{\omega \rho g (H_1 - H_2)}{\rho k x_1 - x_2} = -\frac{\omega g (H_1 - H_2)}{k x_1 - x_2}. \quad (26)$$

რადგანაც ცოცხალი კვეთის ფართობი ტოლია $\omega = \frac{\pi D^2}{4}$, ამიტომ საბოლოოდ გვექნება:

$$Q = -\frac{\pi D^2 g H_1 - H_2}{4k x_1 - x_2}. \quad (27)$$

თუ ვიხილავთ სტაციონარულ პროცესს, მაგალითად ჰიდრავლიკურ დარტყმას. ამიტომ საწყისი და საბოლოო პირობები შემდეგია:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \lambda; \lambda_2 = 0. \\ V_1 = V; V_2 = 0. \end{cases} \quad (17)$$

ამიტომ ლინეარიზაციის სიდიდე ტოლი იქნება:

$$k = \left(\frac{\lambda V}{2D} \right) = \left[\frac{\left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \right) \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right)}{2D} \right] = \frac{\lambda V}{8D}, \quad (18)$$

ამიტომ საბოლოოდ მოცულობითი ხარჯის დადგენა გვექნება:

$$Q = -\frac{2\pi D^3 g H_1 - H_2}{\lambda V x_1 - x_2}. \quad (19)$$

დავადგინოთ სიჩქარის შეფასება, მილსადენის უბნისათვის ($x_1 \div x_2$)

:

$$\hat{V} = \frac{Q}{\omega} = -\frac{2\pi D^3 g H_1 - H_2}{\lambda V \frac{\pi D^2}{4} x_1 - x_2} = -\frac{8Dg H_1 - H_2}{\lambda V x_1 - x_2}. \quad (20)$$

მიღებული (20) ფორმულისათვის მივიღებთ პროცესის აღმწერი წინააღმდეგობის კოეფიციენტ $\hat{\lambda}$ -ს შეფასებას დარსის ფორმულისათვის:

$$h = \hat{\lambda} \frac{x_1 - x_2}{D} \frac{\hat{V}^2}{2g}. \quad (21)$$

აქედან

$$\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2 = \hat{\lambda} \frac{\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2}{\mathbf{D}} \frac{64\mathbf{D}^2 \mathbf{g}^2 (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2)^2}{\lambda^2 \mathbf{V}^2 (\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2)^2}. \quad (22)$$

საბოლოოდ:

$$\hat{\lambda} = \frac{\lambda^2 \mathbf{V}^2 (\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2)}{64\mathbf{D} \mathbf{g}^2 (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2)}. \quad (23)$$

აღვნიშნოთ: $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2$; $\Delta \mathbf{H} = \mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2$ და საბოლოოდ, გვექნება:

$$\hat{\lambda} = \frac{\lambda^2 \mathbf{V}^2}{64\mathbf{D} \mathbf{g}^2} \frac{\Delta \mathbf{x}}{\Delta \mathbf{H}}. \quad (28)$$

ვთქვათ, გვაქვს მილსადენის უბანი, რომლის სიგრძეა $\Delta \mathbf{x}$ და დიამეტრი \mathbf{D} . ჩავთვალოთ, რომ პროცესის დასაწყისამდე გვაქვს სტაციონარული პროცესი და საშუალო სიჩქარეა \mathbf{V} , ხოლო წინააღმდეგობის კოეფიციენტია λ . ამგვარად სიდიდეები $\Delta \mathbf{x}$, \mathbf{D} , \mathbf{V} და λ - ალგორითმის მიხედვით, ეს სიდიდეები ცნობილი არიან. წარმოვიდგენოთ, რომ ვიხილავთ გარკვეულ დამყარებულ პროცესს და რეალიზაციის შედეგად გვაქვს დროში და სიგრძეზე დაწნევის ვარდნილი $\Delta \mathbf{H}$. მაშინ, (28) ფორმულის მიხედვით, მცირე დროის ინტერვალისათვის, და მცირე უბნის სიგრძის $\Delta \mathbf{x}$ -თვის, შესაძლოა განვსაზღვროთ $\hat{\lambda}$ კვაზისტაციონარული წინააღმდეგობის კოეფიციენტის შეფასება. იმისათვის, რომ მიღებული შედეგი იყოს ზუსტი, ამისათვის სიდიდეები $\Delta \mathbf{x}$ და $\Delta \mathbf{H}$ - უნდა იყოს მცირე. პრაქტიკულად, როდესაც ვიხილავთ მაგისტრალური მილსადენის სიგრძეს, მაშინ მისი სიგრძის მიხედვით, ე.წ. „საკვანძო“ წერტილების შორის მანძილი -საკმაოდ დიდია. ვთქვათ, ამ წერტილებში დაყენებული გამზომი აპარატურა, მაგალითად წარმოადგენს 1 კმ-ს, 5 კმ-ს და ა.შ. ამიტომ იმისათვის, რომ საკვანძო წერტილებში მივიღოთ დაწნევების მნიშვნელობები $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \mathbf{H}_3, \dots$, ამიტომ საჭიროა გარკვეული რიგის მნიშვნელობების „გაბეჭერება“. ამ შემთხვევაში საჭიროა გარკვეული ინტერპოლაციის მეთოდების გამოყენება. ამასთან დაკავშირებით, ნაშრომში

გამოვიყენოთ ინტერპოლაცია ლაგრანჟის მრავალწევრით [63,64], ან კუბური სპლაინ-ფუნქციებით [65-67].

2.1.3. ინტერპოლაცია ლაგრანჟის მრავალწევრით

ვთქვათ მოცემულია $y = f(x)$ ფუნქცია ცხრილის სახით (ცხრილი 1).

ცხრილი 1. საკვანძო წერტილების ინტერპოლაციის სქემა

i	x_i	y_i
0	x_0	y_0
1	x_1	y_1
*	*	*
*	*	*
*	*	*
n	x_n	y_n

ცხრილში x_1, x_2, \dots, x_n მნიშვნელობები - ინტერპოლაციის კვანძებია (მანძილი კვანძებს შორის შესაძლოა იყოს ნებისმიერი). ინტერპოლაციისას საჭიროა მოცემული x_k წერტილი ეკუთვნოდეს მონაკვეთს $[x_0, x_n]$, მაგრამ x_k არ თანხვდება არცერთ ინტერპოლაციის კვანძებს (x_k არ უდრის x_1, x_2, \dots, x_n).

ინტერპოლაციის ფუნქციის მოსაძებნად ირჩევენ გარკვეული კლასის ფუნქციებს, კერძოდ ხშირად იყენებენ ლაგრანჟის $F_n(x)$ ინტერპოლაციურ მრავალწევრის ფუნქციას. ეს ფუნქცია აიგება შემდეგნაირად:

$$L_n(x) = L_1(x) + L_2(x) + \dots + L_n(x), \quad (29)$$

სადაც $L_i(x)$ გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$L_i(x) = \frac{(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{j-1})(x - x_{j+1}) \dots (x - x_n)}{(x_i - x_0)(x_i - x_1) \dots (x_i - x_{j-1})(x_i - x_{j+1}) \dots (x_i - x_n)}. \quad (30)$$

ამგვარად, ლაგრანჟის მრავალწევრი ფუნქციისათვის, სხვადასხვა კვანძების მანძილებისათვის, გვექნება:

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^n \frac{(x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_{j-1})(x-x_{j+1})\dots(x-x_n)}{(x_i-x_0)(x_i-x_1)\dots(x_i-x_{j-1})(x_i-x_{j+1})\dots(x_i-x_n)}. \quad (31)$$

თუ განვიხილავთ ინტერპოლაციის კვანძების თანაბარი განაწილების შემთხვევას, ამ შემთხვევაში, ინტერპოლაციის კვანძების თანაბარი განაწილება გამოისახება x_i -ით, კვანძებს შორის მანძილით h და საწყისი წერტილით x_0 .

$$\begin{cases} x_i = x_0 + ih. \\ x_j - x_i = (j-i)h. \end{cases} \quad (32)$$

შევიტანოთ და განვსაზღვროთ $L_j(x)$ ფუნქციები. გვექნება:

$$L_j(x) = \prod_{i=0; i \neq j}^n \frac{(x-x_i)}{(x_j-x_i)} = \frac{\prod_{i=0; i \neq j}^n (x-x_0-ih)}{h^{n-1} \prod_{i=0; i \neq j}^n (j-i)}. \quad (33)$$

ამის შემდეგ, შესაძლებელია ახალი ცვლადის $z = \frac{x-x_0}{h}$ შემოტანა და მივიღებთ პოლინომს z -ის მიმართ.

2.1.4. ინტერპოლაცია კუბური სპლაინ-ფუნქციებით

ჩვენი მიზანია, შევადგინოთ შედარებით მარტივი ალგორითმი ოთხ წერტილიანი ინტერპოლაციას, კერძოდ ინტერპოლაცია კუბური სპლაინ-ფუნქციებით. ვთქვათ გვაქვს საკვანძო წერტილები $x_1, x_2, \dots, x_n \in (a, b)$ და შესაბამისი მათი მნიშვნელობები y_0, y_1, \dots, y_n მაშინ ინტერპოლაციურ კუბურ სპლაინს ეწოდება $S_3(x) \in C_{[a,b]}^2$. აქ გვაქვს [64,65]:

$$\begin{cases} S_3(x) = f_i(x) = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d, \\ x \in [x_{i-1}, x_i] \quad \forall i = \overline{1, n}. \end{cases} \quad (34)$$

რადგანაც გვაქვს $4n$ უცნობი, ამიტომ $4n-2$ განტოლებათა სისტემას გააჩნია რამდენიმე ამონახსენი.

განვიხილოთ კუბური სპლაინ-ფუნქციის აგების ეფექტური მეთოდი. თუ შევადგენთ

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{x} \in [\mathbf{x}_{i-1}, \mathbf{x}_i]; \\ \mathbf{S}''_3 = \mathbf{p}''_i(\mathbf{x}) = \mathbf{M}_{i-1} \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}}{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i-1}} + \mathbf{M}_i \frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_{i-1}}{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i-1}}; \\ \mathbf{p}''_i(\mathbf{x}_{i-1}) = \mathbf{M}_{i-1}; \\ \mathbf{p}''_i(\mathbf{x}_i) = \mathbf{M}_i; \\ \mathbf{h}_i = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i-1}. \end{array} \right. \quad (35)$$

მაშინ

$$\mathbf{p}'_i(\mathbf{x}) = \int \mathbf{p}''_i(\mathbf{x}) d\mathbf{x} + \mathbf{A}_i = -\mathbf{M}_{i-1} \frac{(\mathbf{x}_i - \mathbf{x})^2}{2\mathbf{h}_i} + \mathbf{M}_i \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{i-1})^2}{2\mathbf{h}_i} + \mathbf{A}_i; \quad (36)$$

$$\mathbf{p}_i(\mathbf{x}) = \int \mathbf{p}'_i(\mathbf{x}) d\mathbf{x} + \mathbf{B}_i = \mathbf{M}_{i-1} \frac{(\mathbf{x}_i - \mathbf{x})^3}{6\mathbf{h}_i} + \mathbf{M}_i \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{i-1})^3}{2\mathbf{h}_i} + \mathbf{A}_i \mathbf{x} + \mathbf{B}_i. \quad (37)$$

საკმაოდ რთული და გრძელი გარდაქმნის შემდეგ, მივიღებთ კუბური სპლაინ-ფუნქციის ანალიზურ გამოსახულებებს:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{f}_1(\mathbf{x}) = \mathbf{M}_1 \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)^3}{6\mathbf{h}} + \frac{\mathbf{y}_0}{\mathbf{h}} (\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}) + \left(\frac{\mathbf{y}_1}{\mathbf{h}} - \mathbf{M}_1 \frac{\mathbf{h}}{6} \right) (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0); \\ \mathbf{f}_2(\mathbf{x}) = \mathbf{M}_1 \frac{(\mathbf{x}_2 - \mathbf{x})^3}{6\mathbf{h}} + \mathbf{M}_2 \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}_1)^3}{6\mathbf{h}} + \left(\frac{\mathbf{y}_1}{\mathbf{h}} - \mathbf{M}_1 \frac{\mathbf{h}}{6} \right) (\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}) + \\ + \left(\frac{\mathbf{y}_2}{\mathbf{h}} - \mathbf{M}_2 \frac{\mathbf{h}}{6} \right) (\mathbf{x} - \mathbf{x}_1); \\ \mathbf{f}_3(\mathbf{x}) = \mathbf{M}_2 \frac{(\mathbf{x}_3 - \mathbf{x})^3}{6\mathbf{h}} + \left(\frac{\mathbf{y}_2}{\mathbf{h}} - \mathbf{M}_2 \frac{\mathbf{h}}{6} \right) (\mathbf{x}_3 - \mathbf{x}) + \frac{\mathbf{y}_3}{\mathbf{h}} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_3). \end{array} \right. \quad (38)$$

სადაც $\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1 = \mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_2 = \Delta \mathbf{x} = \mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2 = \mathbf{h}_3 = \mathbf{h}$, და ვიღებთ მარტივ ფორმულებს.

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{M}_1 = \frac{12}{15\mathbf{h}^2} (3\mathbf{y}_2 - 3\mathbf{y}_1 - \mathbf{y}_3 + \mathbf{y}_0); \\ \mathbf{M}_2 = \frac{12}{15\mathbf{h}^2} (3\mathbf{y}_1 - 3\mathbf{y}_2 + \mathbf{y}_3 - \mathbf{y}_0). \end{array} \right. \quad (39)$$

საბოლოოდ, ჩვენს მიერ მიღებულია ალგორითმი ოთხ წერტილიანი ინტერპოლაცია, რომელიც მარტივია და შესაძლოა რიცხვითი გაანგარიშების მიღება. აგრეთვე მიღებულია მარტივი პროგრამა Excel-ში.

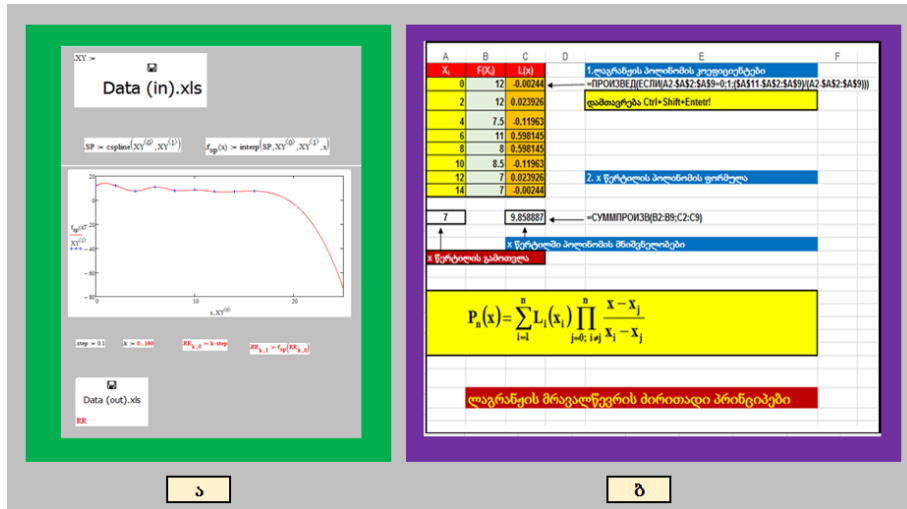
2.1.5. ლაგრანჟის პოლინომის და კუბური სპლაინ-ფუნქციების ინტერპოლაციის სქემა

განვიხილოთ ადრე აღნიშნული ინტერპოლაციის სქემა კუბური სპლაინ-ფუნქციებით. კერძოდ განვიხილება Matcab'150 მათემატიკური პროგრამის მოდიფიკაცია. ნახ. 6-ზე ნაჩვენებია სქემა. აგრეთვე დართულია Excel-ის ორი ფაილი (in და out). ფაილი (in) გვაძლევს კვანძების წყვილ კორდინატს, ხოლო ფაილი (out) - შედეგი გარკვეული ბიჯით. Matcab'150-ის საშუალებით შეგვყავს ბიჯი (step) და მიღებული წყვილების რაოდენობა (k). ინტერპოლაციური სქემა კუბური სპლაინ-ფუნქციებით ნაჩვენებია ნახ. 6-ზე.

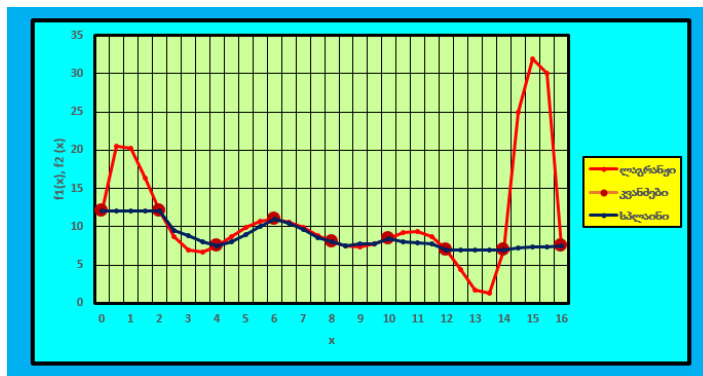
აგრეთვე განვიხილოთ ინტერპოლაცია სქემა ლაგრანჟის პოლინომით, რომელიც შემუშავებულია Excel-ში (ნახ. 5). ნახ. 6-ზე ნაჩვენებია კვანძების ლაგრანჟის პოლინომით და კუბური სპლაინ-ფუნქციებით ინტერპოლაციის გრაფიკები.

ამგვარად, ვიზუალურადაც, ლაგრანჟის პოლინომის ინტერპოლაციის სქემა უვარგისია. ეს მეთოდი იძლევა დიდ განსხვავებას კვანძების დასაწყისში და ბოლოში, თუმცა სხვა კვანძებს შორისაც აგრეთვე გვაქვს დიდი ცდომილება. ამის გამო, მიუხედავად იმისა, მომავალში ჩვენ მივყევით კუბური სპლაინ-ფუნქციებით ინტერპოლაციის ორიგინალურ სქემას.

ამ და შემდგომ პარაგრაფში დაწვრილებით განვიხილება დაუმყარებელი პროცესის პარამეტრების დადგენა, წინა აღნიშნული რიცხვითი მეთოდის გამოყენებით. აქვე, დაწვრილებით მოყვანილია საანგარიშო ცხრილები, ვინაიდან შემდგომში იქნება ანალოგიური, მაგრამ სხვა პროცესები. ამიტომ, მომავალში ცხრილები აღარ მოგვყავს. გარდა ამისა, მოყვანილ იქნება დაწვრილებითი ცხრილები, რომლებიც შეესაბამება ნატურული ექსპერიმენტის მონაცემებს და შედეგებს.



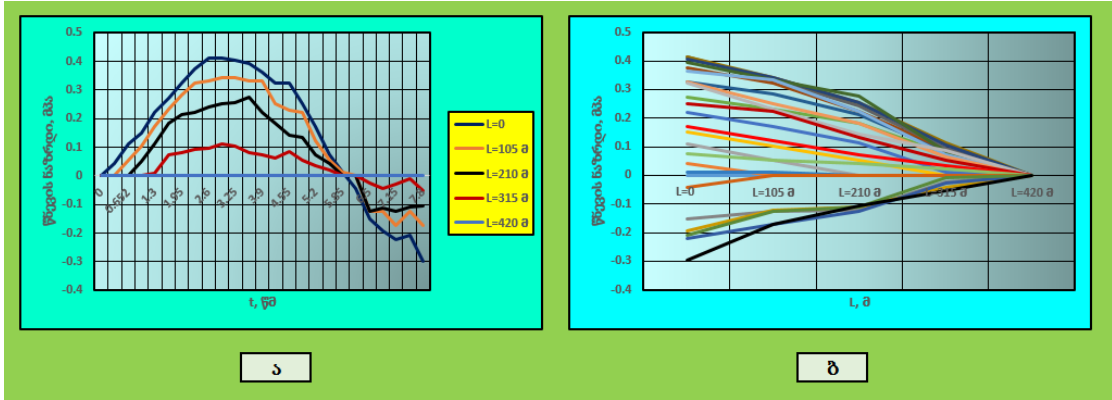
ნახ. 5. ა) კუბური სპლაინ-ფუნქციების ინტერპოლაციური სქემა; ბ) ლაგრანჟის პოლინომით ინტერპოლაციური სქემა



ნახ. 6. კვანძების მიხედვით ლაგრანჟის პოლინომით და კუბური სპლაინ-ფუნქციებით ინტერპოლაციის გრაფიკების შედარება

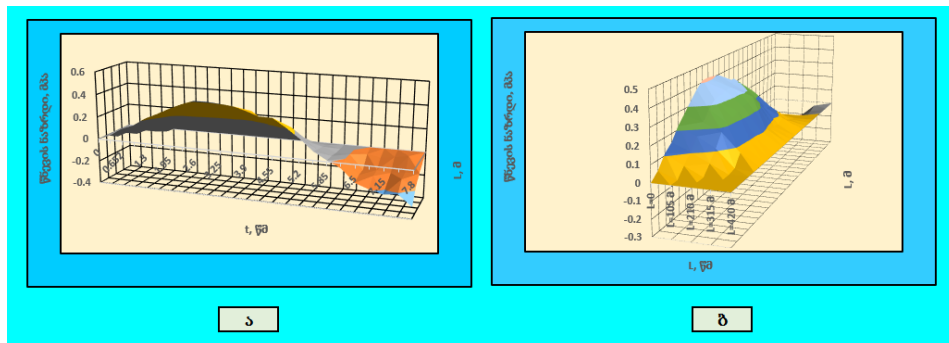
მაგალითისათვის განვიხილოთ ნახ. 7-ზე წარმოდგენილი არაპირდაპირი ჰიდრავლიკური დარტყმის რეალური პრონოგრამა, რომელიც შეესაბამება ექსპერიმენტულ მილსადენს.

როგორც ნახაზიდან ჩანს, ჰიდრავლიკური დარტყმის ფარდობითი ორდინატების მაქსიმალური მნიშვნელობა (ე.ი. დარტყმის სიდიდის შეფარდება სტატიკურ დაწნევასთან) აღწევს 0,4-ს და შეესაბამება მე-9 ნახევარ ფაზას. 20 ნახევარფაზის შესაბამის დროის მომენტში (კვანძი A), წარმოიქმნება ვაკუუმი, რომელიც შემდგომში განაპირობებს წნევის სიდიდეს ამ კვანძში და გავლენას ახდენს დიაგრამის შემდგომ მსვლელობაზე [68].



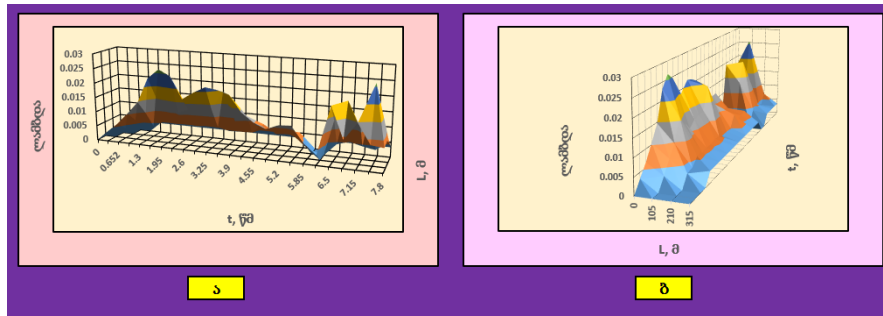
ნახ. 7. $\Delta P = \Delta P(x, t)$ -ს გრაფიკები მილსადენის გასწვრივ (ა) და დროში (ბ)

[68]-ში მოყვანილია წნევის ფარდობითი მნიშვნელობები, რომლებიც გაზომილია მილსადენის ხუთ საკვანძო წერტილში $\Delta x = 105$ მ და დროის $\Delta t = \tau/2 = 0,325$ წმ ინტერვალებით. ე.ი. ΔP_{ij} -ს მნიშვნელობები ტოლია 125-ის. სიგრძეზე წინააღმდეგობის საშუალო კოეფიციენტი $\hat{\lambda}$ -ს მნიშვნელობა ტოლია 0,0076-ის. ცხადია, რომ ზუსტი გაანგარიშების შემთხვევაში შესაძლებელია $\hat{\lambda} = \hat{\lambda}(x, t)$ ზედაპირის აგებაც. ნახ. 7-ზე ნაჩვენებია $\Delta P = \Delta P(x, t)$ -ს გრაფიკები მილსადენის გასწვრივ და დროში, ხოლო ნახ. 8-ზე ნაჩვენებია $\Delta P = \Delta P(x, t)$ -ს ზედაპირები, სხვადასხვა ორიენტაციისას.



ნახ. 8. $\Delta P = \Delta P(x, t)$ -ს ზედაპირები, სხვადასხვა ორიენტაციისას (ვარიანტი 1)

ნახ. 9-ზე ნაჩვენებია $\hat{\lambda}(x, t)$ ფუნქციის ზედაპირი, სხვადასხვა ორიენტაციისას.



ნახ. 9. $\Delta P = \Delta P(x, t)$ -ს ზედაპირები, სხვადასხვა ორიენტაციისას (ვარიანტი 2)

2.2. მაგისტრალური ნავთობსადენის გარდამავალი პროცესის გაანგარიშება, დამატებითი ტუმბოს ჩართვისას

განვიხილოთ ნავთობსადენის გარდამავალი პროცესის გაანგარიშება, დამატებითი ტუმბოს ჩართვისას, რომლისათვის ცნობილია შემდეგი პარამეტრები: ნავთობსადენის სიგრძე $L = 3500$ მ; ნავთობსადენის შიგა დიამეტრი $D = 0,32$ მ; ცოცხალი კვეთის ფართობი $\omega = 0,0804$ მ²; ხარჯი ნომინალურ რეჟიმში $Q_1 = 0,1431$ მ³/წმ; დაწნევა ნავთობსადენის დასაწყისში $h_1 = 40,78$ მ; საშუალო სიჩქარე ნომინალურ რეჟიმში $V_1 = 1,78$ მ/წმ; რეინოლდსის რიცხვი $Re_1 = 569600$; სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტი $\lambda_1 = 0,0115$. დაწნევის ვარდნილი $\Delta h_1 = 20,31$.

დამატებითი ტუმბოს ჩართვისას, ახალი რეჟიმისათვის გვექნება ანალოგიური პარამეტრები: $Q_2 = 0,1688$ მ³/წმ; $V_2 = 2,12$ მ/წმ; $h_2 = 141,14$ მ; $Re_2 = 672000$; $\lambda_2 = 0,0111$; $\Delta h_2 = 27,29$ მ.

თანამედროვე ცენტრიდანული ტუმბო **LQRY 600–165–2970** გამოიყენება ნავთობ და ნავთობპროდუქტების გადასაქაჩავად (ნახ. 10). მაქსიმალური მწარმოებლობა $Q_{max} = 600$ მ³/სთ = $0,17$ მ³/წმ; მაქსიმალური დაწნევა $H_{max} = 165$ მ; მაქსიმალური ბრუნვის სიჩქარე $\Omega = 2970$ რად/წთ [69,70].



ნახ. 10. ცენტრიდანული ტუმბო **LQRY 600 – 165 – 2970**

ცხრილ 4-ზე და ცხრილ 5-ზე, ამავედროულად ნახ. 17-ზე ნაჩვენებია დამატებითი ტუმბოს ჩართვის დაწნევის მნიშვნელობები, გარდამავალი პროცესისათვის. ნახ. 17-ზე ნაჩვენებია დაწნევის ნაზრდის ცვლილება დროში მილსადენის გასწვრივ. ნახ. 17-ზე, გ და დ-ზე ნაჩვენებია $\Delta H = \Delta H(x, t)$ ზედაპირები სხვადასხვა ორიენტაციისას.

ნახ. 18-ზე ნაჩვენებია გარდამავალი პროცესის დაწნევის მნიშვნელობები, როგორც სიგრძის, ასევე დროის მიხედვით და $\mathbf{H} = \mathbf{H}(\mathbf{x}, t)$ აღმწერი პროცესის ფუნქციის მნიშვნელობები, სხვადასხვა ორიენტაციისას.

გადავიდეთ სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის განსაზღვრაზე. მიღებული არასტაციონარული პროცესის ზედაპირების აგების შემდეგ, $\hat{\lambda}$ -ს გაანგარიშება ანალოგიურად მიმდინარეობს ძირითადი (28) ფორმულის შესაბამისად. $\hat{\lambda}$ -ს მნიშვნელობები გაანგარიშებული გარდამავალი პროცესებისათვის, ნაჩვენებია ნახ. 12 (ა,ბ)-ზე. კერძოდ $\hat{\lambda}(\mathbf{L}, t)$ -ს ზედაპირი, ორი ორიენტაციის შემთხვევისათვის.

საბოლოოდ, წინააღმდეგობის კოეფიციენტის საშუალო მნიშვნელობა შემდეგია: $\bar{\lambda} = 0,005976$.

ცხრილი 2. დამატებითი ტუმბოს ჩართვის დაწნევის მნიშვნელობები 0-დან 1500 მ-მდე

t, წმ	L = 0 მ	L = 500 მ	L = 1000 მ	L = 1500 მ
0	40,77	37,88	34,98	32,08
0,2	40,77	37,88	34,98	32,08
0,4	66,06	37,88	34,98	32,08
0,6	64,42	62,49	34,98	32,08
0,8	127,00	120,36	34,98	32,08
1,0	130,65	126,02	114,68	32,08
1,2	128,90	125,03	113,78	106,95
1,4	134,30	130,27	118,55	111,43
1,6	137,22	133,10	121,12	113,86
1,8	137,37	133,25	121,25	113,98
2,0	138,53	134,38	122,28	114,95
2,2	139,99	136,61	124,31	116,85

ცხრილი 3. დამატებითი ტუმბოს ჩართვის დაწნევის მნიშვნელობები 1500-დან 3500 მ-მდე

t, წმ	L = 2000 მ	L = 2500 მ	L = 3000 მ	L = 3500 მ
0	29,17	26,27	23,37	20,47
0,2	29,17	26,27	23,37	20,47
0,4	29,17	26,27	23,37	20,47
0,6	29,17	26,27	23,37	20,47
0,8	29,17	26,27	23,37	20,47
1,0	29,17	26,27	23,37	20,47
1,2	29,17	28,30	23,37	20,47
1,4	109,85	104,85	23,37	20,47
1,6	110,37	107,13	23,37	20,47
1,8	110,68	107,24	104,02	20,47
2,0	111,50	108,15	104,91	101,65
2,2	113,34	109,94	105,94	102,76

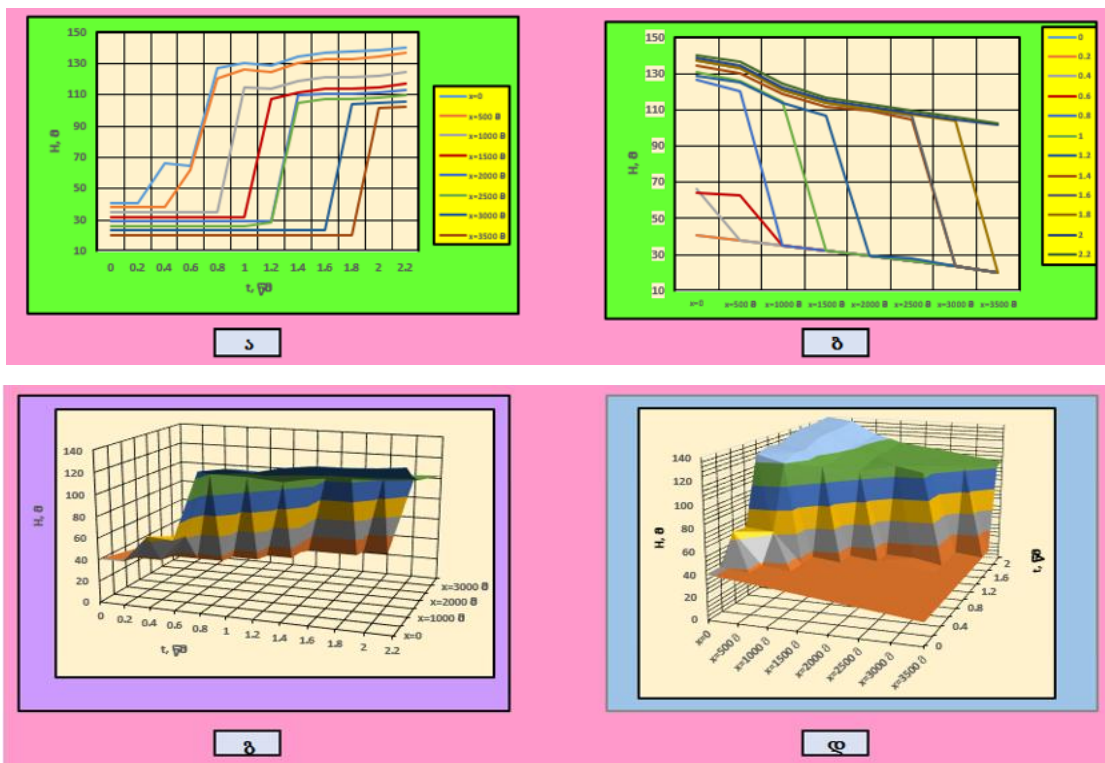
2.3. გარდამავალი პროცესის გაანგარიშება, ტუმბოს მყისი გათიშვისას

განვიხილოთ, ტუმბოს მყისი გათიშვის გარდამავალი პროცესი. ტუმბოს გათიშვამ შესაძლოა გამოიწვიოს ამპრავის ელექტროენერჯის შეწყვეტა.

იხილება ორდიაფრაგმიანი (მემბრანული) ტუმბო, ერთ დიუმიანი დიაფრაგმის სისქით, მოდელი Flow (GMP) 45 № S1FB1ABWAN5000. მაქსიმალური წნევა 800 psi = 54,4 ატ (ნახ. 13) [71].

განვიხილოთ მაგისტრალური ნავთობსადენის უბანი, რომლის პარამეტრებია შემდეგი: უბნის სიგრძე $L = 2500$ მ; ნავთობსადენის შიგა დიამეტრი $D = 0,5$ მ; ნავთობსადენის ცოცხალი კვეთის ფართობი $\omega = 0,1963$ მ².

ხარჯი $Q = 0,45$ მ³/წმ; ნომინალური საშუალო სიჩქარე $V = 8$ მ/წმ; სითხეში დარტყმის სიჩქარე $c = 1425$ მ/წმ; საწყისი წნევა უბნის დასაწყისში $p = 0,5$ ატ $= 12 \cdot 10^5$ პა; $k = 0,133$ 1/წმ; სიბლანტის კინემატიკური კოეფიციენტი $\nu = 50$ მმ²/წმ $= 0,5$ სმ²/წმ; რეინოლდსი რიცხვი $Re = 1800$; სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტი $\lambda = 0,02427$; ფაზა $\tau = 2L/c = 3,5$ წმ.



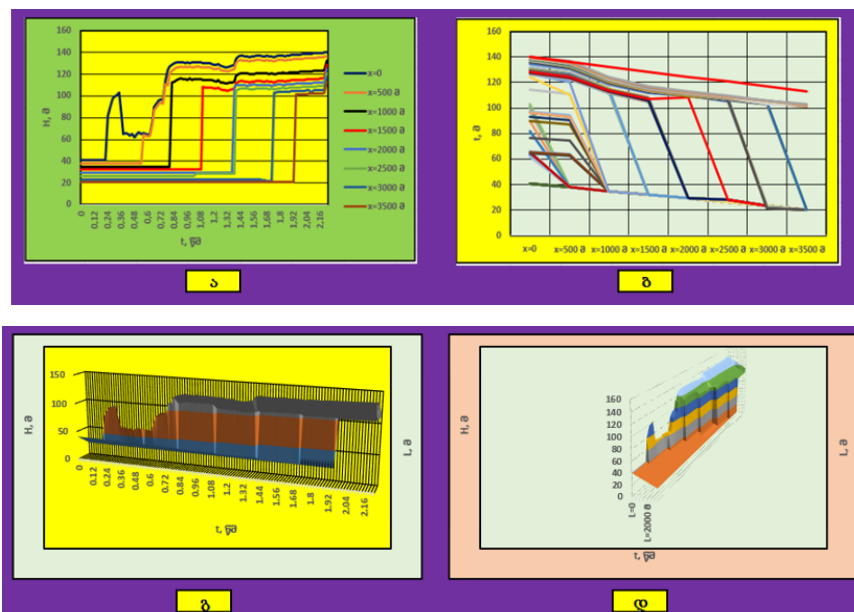
ნახ. 11. დაწნევის ნაზრდის ცვლილება დროში (ა) და მილსადენის გასწვრივ (ბ). გ, დ $\Delta H = \Delta H(x, t)$ ზედაპირები სხვადასხვა ორიენტაციისას

ცხრილ 4-ში ნაჩვენებია ორდიაფრაგმიანი ტუმბოს გათიშვისას, შესაბამისი წნევის მნიშვნელობები, ნავთობსადენის გასწვრივ და დროის განმავლობაში.

ნახ. 14ე-ზე ნაჩვენებია $\hat{\lambda}$ -ს მნიშვნელობები გაანგარიშებული გარდამავალი პროცესებისათვის.

ამ შემთხვევაში, მივიღებთ სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის საშუალო კოეფიციენტის მნიშვნელობას, რომელიც ტოლია: $\bar{\lambda}_1 = 0,005738$. შემდეგ მიღებული შედეგები წარმოადგენს მარტივ სურათს, როდესაც პროცესი აღიწერება სპლაინ-ფუნქციების გარეშე (ინტერვალი ხდება $\Delta t = 0,5$ წმ). ამიტომ შემდგომში ხდება სპლაინ-ფუნქციების გაანგარიშება შესაბამისი წნევის მნიშვნელობები, ნავთობსადენის გასწვრივ და დროის განმავლობაში.

ნახ. 15 (ა და ბ)-ზე ნაჩვენებია ორდიაფრაგმიანი ტუმბოს გათიშვისას, შესაბამისი წნევის მნიშვნელობები, ნავთობსადენის გასწვრივ და დროის განმავლობაში (როგორც დროში, ასევე სიგრძის მიხედვით), ხოლო ნახ. 15(გ და დ)-ზე ნაჩვენებია $p(x,t)$ ფუნქციის ზედაპირი, ორნაირი ორიენტაციისას.



ნახ. 12. გარდამავალი პროცესის დაწნევის მნიშვნელობები დროის და სიგრძის მიხედვით (ა,ბ). გარდამავალი პროცესის დაწნევის მნიშვნელობების ზედაპირები, სხვადასხვა ორიენტაციისას (გ,დ)



ნახ. 13. ორდიაფრაგმიანი ტუმბო Flow (GMP) 45-ის ხედი

გადავიდეთ სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის განსაზღვრა. მიღებული დაუმყარებელი პროცესის ზედაპირების აგების შემდეგ, $\hat{\lambda}$ -ს გაანგარიშება ანალოგიურად მიმდინარეობს (28) ფორმულის შესაბამისად. ნახ. 16 (ა,ბ)-ზე ნაჩვენებია $\hat{\lambda}$ -ს მნიშვნელობები გაანგარიშებული გარდამავალი პროცესებისათვის, კერძოდ $\hat{\lambda}(L, t)$ -ს ზედაპირი, ორი ორიენტაციის შემთხვევისათვის.

ცხრილი 4. წნევის მნიშვნელობები ნავთობსადენის გასწვრივ და დროში

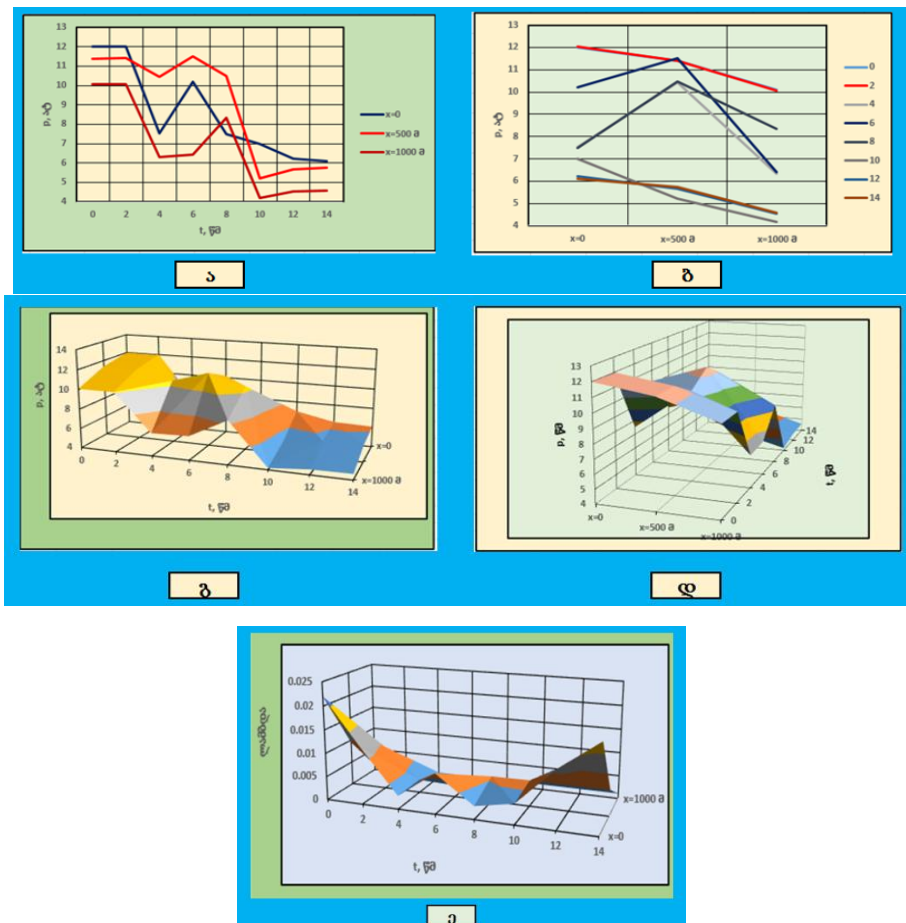
t, წმ	L = 0	L = 500 მ	L = 1000 მ
0	12,00	11,40	10,08
2	12,02	11,41	10,07
4	7,52	10,44	6,31
6	20,02	11,52	6,42
8	7,50	10,47	8,35
10	7,00	5,22	4,18
12	6,22	5,66	4,52
14	6,11	5,74	4,58

სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის საშუალო კოეფიციენტის მნიშვნელობა ტოლია: $\overline{\lambda_2} = 0,007676$.

ამგვარად, გვექნება მნიშვნელოვანი განსხვავება $\overline{\lambda_1} = 0,005738$ და $\overline{\lambda_2} = 0,007676$ შორის და ტოლია 30%-მდე.

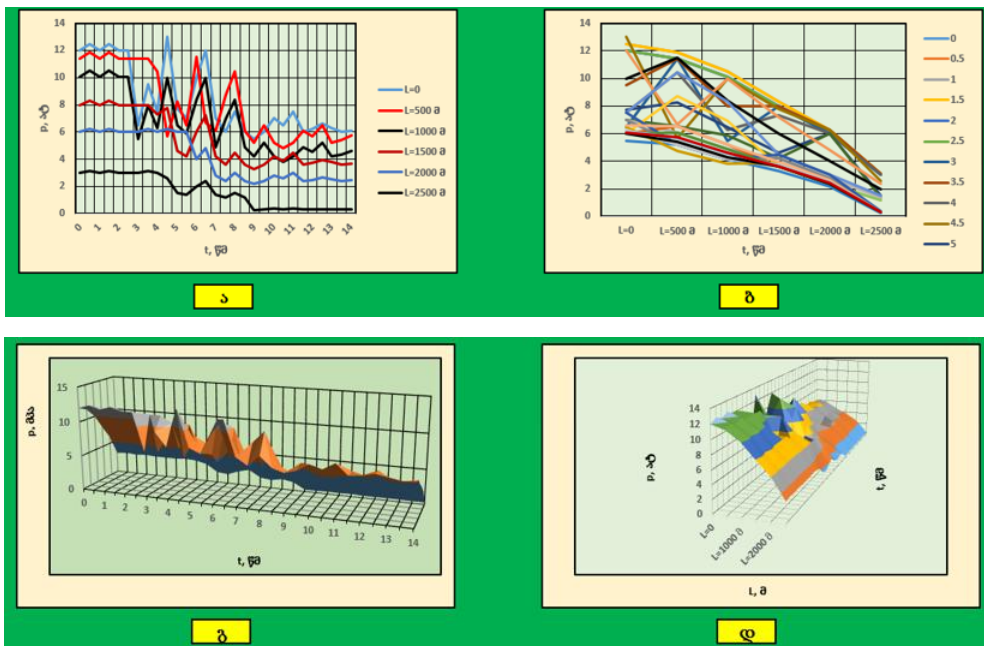
2.4. გარდამავალი პროცესის გაანგარიშება (ტუმბოს ჩართვა)

განვიხილოთ კოსტრომის მაგისტრალური ნავთობპროდუქტსადენი. სისტემა შედგება ფოლადის მილსადენები შიგა დიამეტრებით 250 მმ და 300 მმ. სრული სიგრძე 7875 მ. რეჟიმების მუშაობის საშტატო გარდამავალ სიტუაციებში, წნევა არ უნდა აღემატოს 1,5 მპა. პროდუქტის მოწოდება წარმოებს სამი ცენტრიდანული ტუმბოებით, აგრეგატებით 38-200x2 (ИН-400/105). გარდა ამისა არსებობს ორი სარეზერვო ტუმბოები, რომელთა ტიპია 3В-200x2 (ИН-400/105) (ნახ. 17) [72-74].

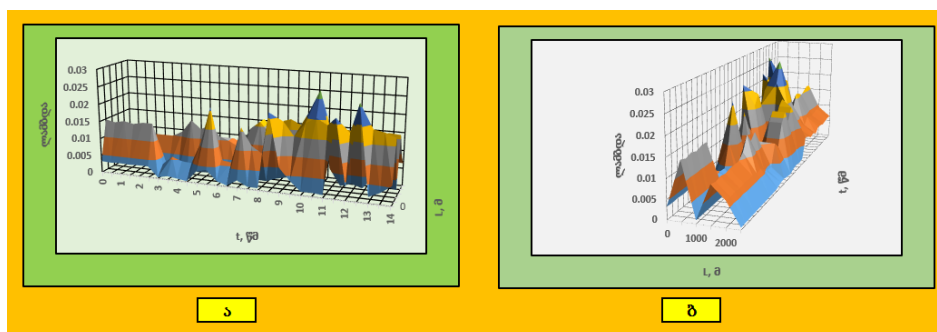


ნახ. 14. გარდამავალი პროცესის წნევის ნაზრდის მნიშვნელობები დროის და სიგრძის შესაბამისად (ა,ბ). გარდამავალი პროცესის დაწნევის მნიშვნელობების ზედაპირები, სხვადასხვა ორიენტაციისას (გ,დ). λ -ს მნიშვნელობები გაანგარიშებული გარდამავალი პროცესებისათვის (ე)

აღნიშნულმა სისტემამ უნდა უზრუნველყოს უწყვეტი მიწოდება არა ნაკლები დასაშვები წნევით. ამ შემთხვევაში, სარეზერვო ტუმბოების გაშვება ხდება ღია საკეტით. გაანგარიშება გვიჩვენებს, რომ ერთ-ერთი სარეზერვო ტუმბოს ჩართვისას ღია ჩაკეტისას შეადგენს 1,9 მპა წნევას, ხოლო ჯამური წნევა გახდება 2,5 მპა, რაც დაუშვებელია, რადგანაც გამოიწვევს სისტემაში მილსადენის რღვევას. ამგვარი სიტუაციების თავიდან აცილებისას ტალღური პროცესების და ვიბრაციული პროცესებისათვის, გამოიყენება ჩაქრობის მოწყობილობები, კერძოდ წნევის სტაბილიზატორები.



ნახ. 15. პროცესის შესაბამისი წნევის მნიშვნელობები, ნავთობსადენის გასწვრივ და დროის განმავლობაში (ა,ბ). $p(x, t)$ ფუნქციის ზედაპირი, ორი ორიენტაციისას (გ და დ)



ნახ. 16. $\hat{\lambda}(L, t)$ -ს ფუნქციის ზედაპირი, ორი ორიენტაციის შემთხვევისათვის

განვიხილოთ აღნიშნულ მილსადენში გარდამავალი პროცესი, კერძოდ ტუმბოს ჩართვის პროცესი. სისტემაში გარდამავალი პროცესის დრო არ აღემატება 5-6 წმ-ს. ამ დროს, გარდამავალ პროცესში სტაბილიზატორის არსებობისას, დარტყმის ნაზრდი მცირდება დაახლოებით 10-ჯერ. განვიხილოთ შიგა დიამეტრის მქონე $D = 0,35$ მ. როდესაც მუშა წნევაა $p = 1,1$ ატ.



ნახ. 17. ცენტრიდანული ტუმბო 38-200x2 (ЦН-400/105)

განვიხილოთ აღნიშნულ მილსადენში გარდამავალი პროცესი, კერძოდ ტუმბოს ჩართვის პროცესი. სისტემაში გარდამავალი პროცესის დრო არ აღემატება 5-6 წმ-ს. ამ დროს, გარდამავალ პროცესში სტაბილიზატორის არსებობისას, დარტყმის ნაზრდი მცირდება დაახლოებით 10-ჯერ. განვიხილოთ შიგა დიამეტრის მქონე $D = 0,35$ მ. როდესაც მუშა წნევაა $p = 1,1$ ატ.

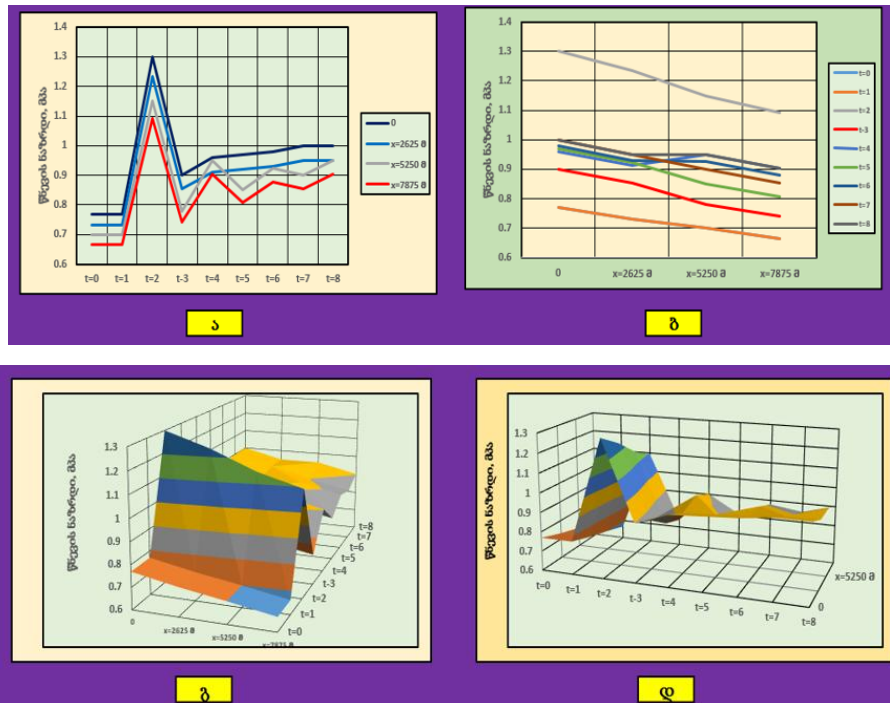
ნაშრომში მოყვანილია გარდამავალი პროცესის წნევის მნიშვნელობები, როგორც დროში, ასევე მილსადენის გასწვრივ. მიღებული წნევის ნაზრდის ანათვალეები (საკვანძო წერტილებში) აღებულია შემდეგი ბიჯით: $\Delta t = 1$ წმ; $\Delta x = 2625$ მ. ამგვარად პირველადი ინფორმაცია პროცესის შესახებ მიღებულია და მოყვანილია ცხრილ 5-ში და ნახ. 18-ზე.

იმისათვის, რომ მოვახდინოთ ზუსტი აღწერა დინამიკური პროცესი, ამიტომ განვიხილოთ ჩვენს მიერ შემუშავებული მეთოდოლოგია, კერძოდ პროცესის აპროქსიმაცია სპლაინ-ფუნქციებით და აღნიშნული გარდამავალი პროცესის ალგორითმი. შესაბამისად განვსაზღვროთ სიგრძეზე

წინააღმდეგობის კოეფიციენტის მნიშვნელობები, რომლებიც მოყვანილია ნახ 19ა-ზე.

ცხრილი 5. გარდამავალი პროცესის წნევის მნიშვნელობები დროში და მილსადენის გასწვრივ (მზა)($\Delta t = 1$ წმ)

t, წმ	x = 0	x = 2625 მ	x = 5250 მ	x = L = 7875 მ
0	0,773	0,734	0,716	0,674
1	0,015	0,015	0,014	0,021
2	1,317	1,243	1,157	1,092
3	0,012	0,004	0,008	0,007
4	0,962	0,912	0,953	0,903
5	0,0100	0,0129	0,0102	0,0069
6	0,984	0,931	0,925	0,879
7	0,014	0,012	0,009	0,003
8	1,002	0,954	0,952	0,903

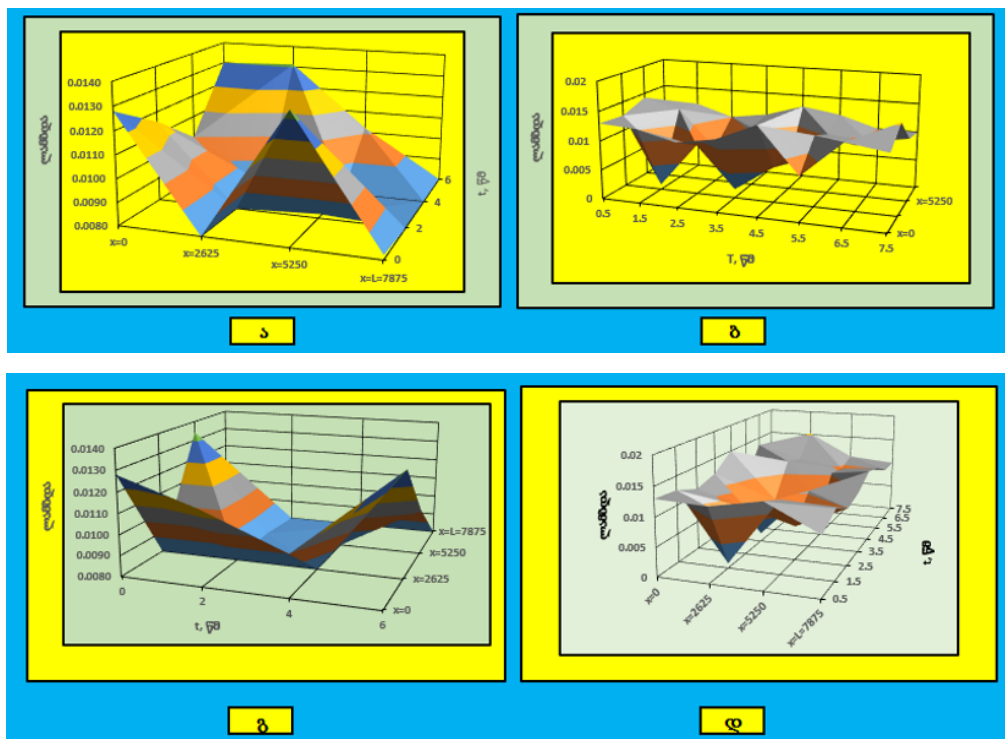


ნახ. 18. (ა და ბ). ორდიაფრაგმიანი ტუმბოს გათიშვისას, შესაბამისი წნევის მნიშვნელობები, ნავთობსადენის გასწვრივ და დროის განმავლობაში. (გ და დ) $p(x, t)$ - ფუნქციის ზედაპირი, ორი ორიენტაციისას

გადავიდეთ სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის განსაზღვრაზე. მიღებული დაუმყარებელი პროცესის ზედაპირების აგების შემდეგ, $\hat{\lambda}$ -ს გაანგარიშება ნაჩვენებია ნახ. 19 (ა,ბ)-ზე ნაჩვენებია $\hat{\lambda}(L,t)$ -ს ზედაპირი, ორი ორიენტაციის შემთხვევისათვის. პროცესის ინტეგრალური მახასიათებლისათვის, გვექნება სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის საშუალო მნიშვნელობა: $\bar{\lambda}_0 = 0,0143$ და $\bar{\lambda}_1 = 0,0104$ (ნახ. 19, გ,დ).

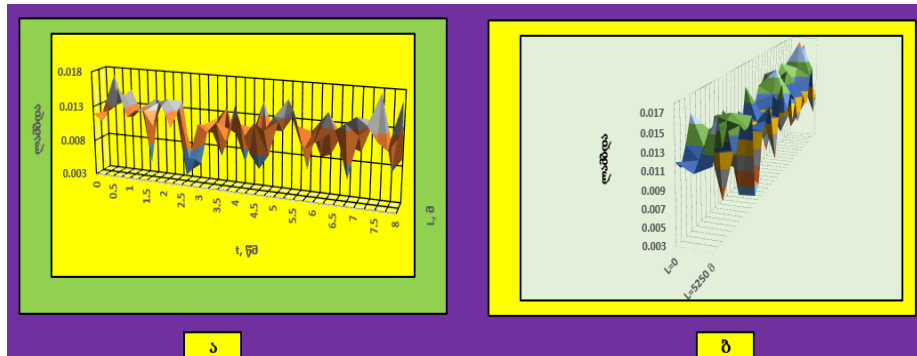
ჩავატაროთ პროცესის ანალიზი სპლაინ-ფუნქციების საშუალებით, კერძოდ ჩავთვალოთ, რომ დროის ბიჯი ტოლია 0,5 წამის ტოლი. ამ შემთხვევაში ანალოგიურად, ნახ. 19 (ა და ბ)-ზე მივიღებთ $\hat{\lambda}(L,t)$ -ს ზედაპირს, ორი ორიენტაციის შემთხვევისათვის.

პროცესის ინტეგრალური მახასიათებლისათვის, გვექნება სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის საშუალო მნიშვნელობა: $\bar{\lambda}_2 = 0,0132$.



ნახ. 19 (ა,ბ). $\hat{\lambda}(L,t)$ -ს ზედაპირის ორი ორიენტაციის შემთხვევა ($\Delta t = 2$ წმ). გ,დ. $\hat{\lambda}(L,t)$ -ს ზედაპირი, ორი ორიენტაციის შემთხვევა ($\Delta t = 0,5$ წმ)

კვლავ გავაგრძელოთ პროცესი და ჩავთვალოთ, რომ გვექნება $\Delta t = 0,25$ წმ. ამ შემთხვევაში შესაბამისად გვექნება ნახ. 20-ზე.



ნახ. 20. (ა,ბ). $\hat{\lambda}(L, t)$ -ს ზედაპირი, ორი ორიენტაციის შემთხვევა ($\Delta t = 0,25$ წმ)

ანალოგიურად, ინტეგრალური მახასიათებლისათვის გვექნება სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის საშუალო ახალი მნიშვნელობა: $\bar{\lambda}_3 = 0,0113$.

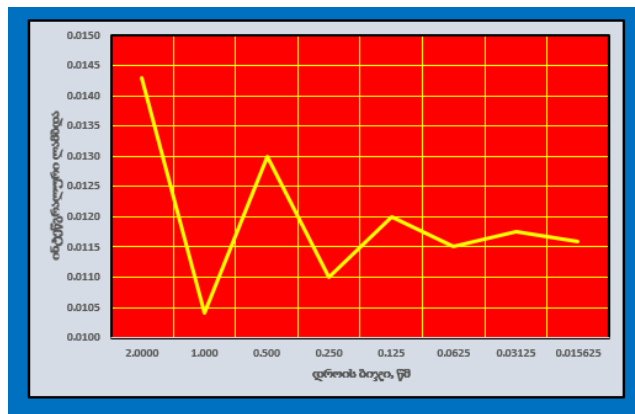
ამგვარად გამოვიკვლიოთ ინტეგრალური სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის დინამიკა. რადგანაც უკვე მიღებულია აღნიშნული კოეფიციენტის მნიშვნელობები: $\bar{\lambda}_0 = 0,0143$; $\bar{\lambda}_1 = 0,0104$; $\bar{\lambda}_2 = 0,0132$ და $\bar{\lambda}_3 = 0,0113$, დროის შესაბამისი ბიჯებით $\Delta t_0 = 2$ წმ; $\Delta t_1 = 1$; $\Delta t_2 = 0,5$ წმ; $\Delta t_3 = 0,25$ წმ, ამიტომ გავაგრძელოთ შემდეგი პროცესი, დროის ბიჯის განახევრებით.

ნახ. 21-ზე ნაჩვენებია ინტეგრალური სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის დინამიკა, დროის განახევრული ბიჯით.

ცხადია, რომ გვაქვს მარტივი იტერაცია და პროცესი თანდათანობით ილევს. ამიტომ მიღებული ჩვენი მეთოდოლოგია დაზუსტებულია, მარტივია და ექვემდებარება რიცხვითი ალგორითმის თვლას კომპიუტერზე, რაც შესაძლოა მიღებული შედეგების გარდამავალი პროცესის მართვისათვის.

2.5. ნავთობსადენი „სართიჭალა-გაჩიანის“ დამატებითი ტუმბოს გამორთვის პროცესის გაანგარიშება

განვიხილოთ ნავთობსადენი, რომელიც მიეწოდებოდა სართიჭალიდან (საბადოდან) - გაჩიანამდე (ნავთობგადამუშავების ქარხანა). დღეისათვის ეს ნავთობსადენი აღარ არსებობს, თუმცა არსებობს გარკვეული მონაცემები, ისინი წარმოადგენენ არსებულ ფაქტიურ მონაცემებს და შესაძლოა მისი დამუშავება ტესტის მიზნად.



**ნახ. 21. სიგრძეზე წინააღმდეგობის ინტეგრალური კოეფიციენტის დინამიკა,
დროის განახევრული ბიჯით**

აღნიშნული ნავთობსადენის ტექნიკური მახასიათებლები შემდეგია: შესაბამისად ნავთობსადენის სიგრძე და დიამეტრი $L = 22$ კმ და $D = 500$ მმ; საწყისი წნევა $p_0 = 6$ ატ; ნედლი ნავთობის სიმკვრივე და სიბლანტის კინემატიკური სიბლანტის კოეფიციენტი შესაბამისად $\rho = 0,825$ გ/სმ³ და $\nu = 0,0733$ სმ²/წმ; მაქსიმალური ხარჯი $Q = 450$ მ³/სთ. გამოყენებულია კონსოლური ტუმბო **HK 560/300** (მაქსიმალური ხარჯი $Q_{max} = 560$ მ³/სთ; მაქსიმალური დაწნევა $H_{max} = 300$; $n = 3000$ ბრ/წთ; სიმძლავრე $P = 400$ კვტ). ნახ. 22-ზე ნაჩვენებია კონსოლური ტუმბო **HK 560/300** -ს ხედი [74].

განიხილება შემთხვევა დამატებითი (სადაწნეო) ტუმბოს გამორთვა, როდესაც ნედლი ნავთობი მიეწოდება რეზერვუარში, მანძილით $L = 11000$

მ. ამ შემთხვევაში, დარტყმის ტალღის სიჩქარეა $c = 1200$ მ/წმ, ხოლო ფაზაა

$$\tau = \frac{2L}{c} = \frac{2 \cdot 11000}{1200} = 18,3 \text{ წმ.}$$



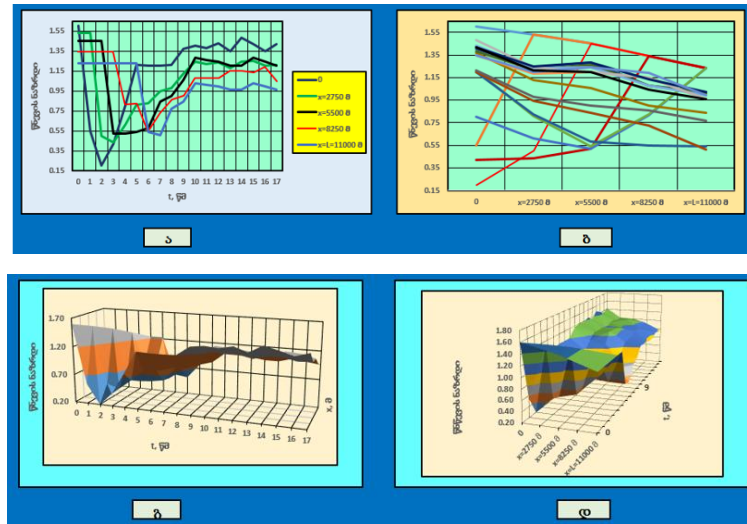
ნახ. 22. კონსოლური ტუმბო HK 560/300 -ს ხედი

მიღებული ქრონოგრამა მოყვანილია ცხრილ 6-ში

ცხრილი 6. წნევის ნაზრდის მნიშვნელობები, დამატებითი ტუმბოს გამორთვის შემთხვევაში

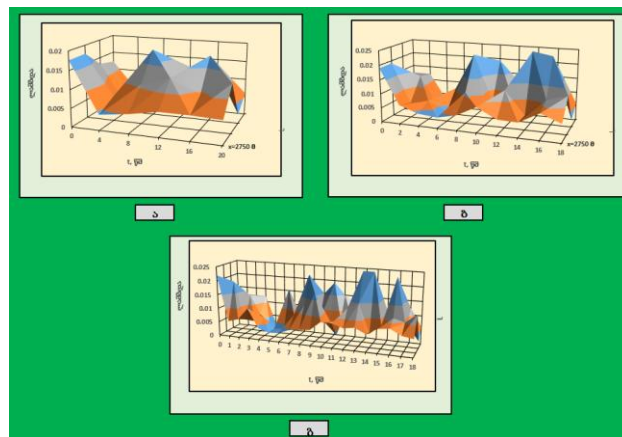
t , წმ	x = 0	x = 2750 მ	x = 5500 მ	x = 8250 მ	x = L = 11000 მ
0	1,60	1,53	1,45	1,34	1,23
1	0,55	1,53	1,45	1,34	1,23
2	0,21	0,51	1,45	1,34	1,23
3	0,42	0,44	0,52	1,34	1,23
4	0,82	0,61	0,52	0,82	1,23
5	1,21	0,81	0,54	0,83	1,23
6	1,20	0,82	0,58	0,55	0,54
7	1,23	0,94	0,84	0,73	0,51
8	1,20	0,98	0,90	0,86	0,77
9	1,37	1,13	1,06	0,92	0,84
10	1,40	1,24	1,28	1,08	1,02
11	1,38	1,22	1,26	1,08	1,01
12	1,43	1,24	1,23	1,09	0,99
13	1,35	1,18	1,20	1,15	0,96
14	1,48	1,24	1,20	1,15	0,96
15	1,42	1,25	1,28	1,13	1,02
16	1,35	1,22	1,26	1,19	0,97
17	1,42	1,21	1,20	1,04	0,96

ნახ. 23 (ა, ბ და გ)-ზე ნაჩვენებია წნევის ნაზრდის გრაფიკები (ა და ბ, ორი ორიენტაციისათვის) და ტალღური ზედაპირი (გ,დ).



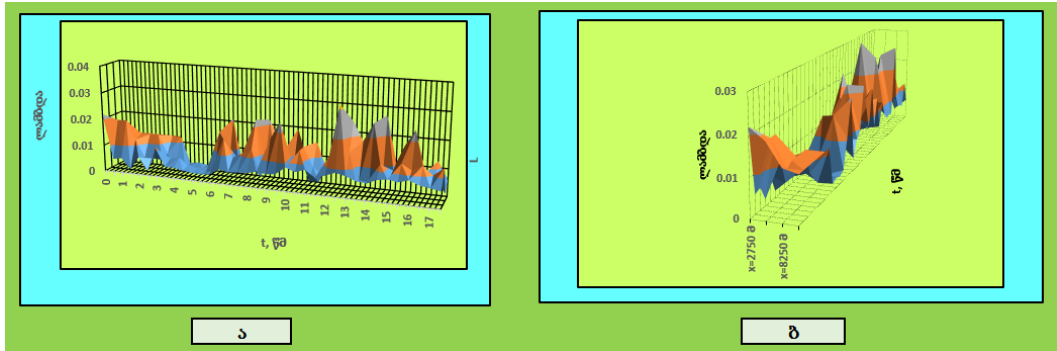
ნახ. 23. ა და ბ. წნევის ნაზრდის გრაფიკები (ორი ორიენტაცია); გ და დ. ტალღური ზედაპირი

გადავიდეთ სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის განსაზღვრა. მიღებული არასტაციონარული პროცესის ზედაპირების აგების შემდეგ, $\hat{\lambda}$ -ს გაანგარიშება მიმდინარეობს ძირითადი ფორმულის (28)-ს შესაბამისად. მოყვანილია $\hat{\lambda}$ -ს მნიშვნელობები გაანგარიშებული გარდამავალი პროცესებისათვის. ნახ. 24 (ა,ბ,გ)-ზე.



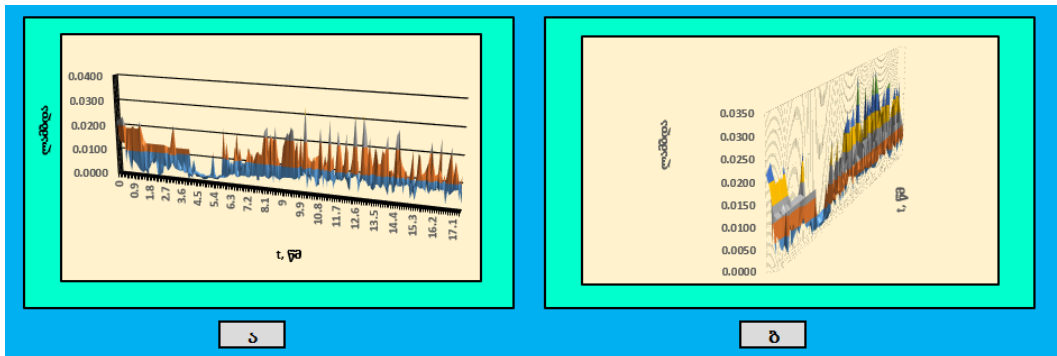
ნახ. 24. სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის $\hat{\lambda}(L, t)$ -ს ზედაპირები (ა. $\Delta t = 4$ წმ; ბ. $\Delta t = 2$ წმ; გ. $\Delta t = 1$ წმ)

ნახ. 25-ზე ნაჩვენებია $\hat{\lambda}(L, t)$ -ს ზედაპირების შემთხვევა, როდესაც გვაქვს $\Delta t = 0,1$ წმ, ორი ორიენტაციის შემთხვევაში.



ნახ. 25. $\hat{\lambda}(L, t)$ -ს ზედაპირები ორი ორიენტაციისათვის $\Delta t = 0,1$

საბოლოოდ, გვაქვს შემთხვევა, როდესაც $\Delta t = 0,01$ (ნახ. 26), ორი ორიენტაციის შემთხვევაში.



ნახ. 26. $\hat{\lambda}(L, t)$ -ს ზედაპირები ორი ორიენტაციისათვის $\Delta t = 0,01$

განვიხილოთ $\hat{\lambda}$ -ს მნიშვნელობები და განვსაზღვროთ სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის საშუალო მნიშვნელობა $\bar{\lambda}_i$. შემდეგ გამოვიკვლიოთ ინტეგრალური სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის დინამიკა (ცხრილი 7 და ნახ. 28). ამგვარად მოხდა Δt_i -ს გაგრძელება პროცესი დროის ბიჯის განახევრებით.

ცხადია, რომ გვაქვს მარტივი იტერაცია და პროცესი თანდათანობით ილევს.

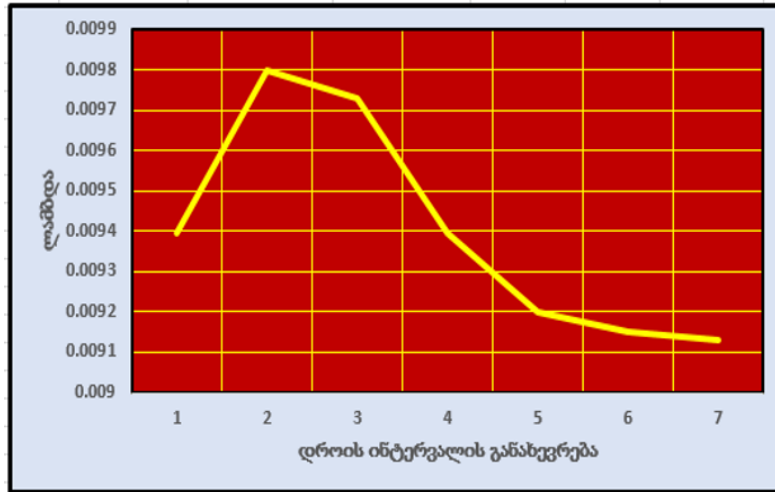
2.6. „Blackridge“-ის წყალსაცავის მილსადენის არასტაციონარული პროცესის გამოკვლევა

პროცესის მოდელირებისათვის განხილულია 30 დიუმინი დიამეტრის კვეთის მილსადენი (0,762 მ), რომლის ხარჯი არის $Q = 12000$ გალონი/წთ, ე.ი. $Q = 4,542$ მ³/წმ. პლუნჟერული ტუმბო ტუმბვას მეორად (ტექნიკურ) წყალს Blackridge-ის წყალსაცავში (ქ. ჰერიმანი, შტატი იუტა, აშშ). ნიშნულების სხვაობა (ტუმბოსა და წყალსაცავის სარკის ზედაპირზე) ტოლია $\nabla_2 - \nabla_1 = 34,84$ მ. გამოყენებულია თანამედროვე ხუთპლუნჟერული ტუმბოს მოქმედების პრინციპი [75], კერძოდ, AGIS-ის ტიპს მექანიკური ხუთპლუნჟერული ტუმბო, რომლის წნევა ტოლია $p = 150$ ft/inch²=10,21 ატ=10,34 ბარი.

ცხრილი 7. $\bar{\lambda}_i$ წინააღმდეგობის კოეფიციენტის მნიშვნელობები, სხვადასხვა Δt_i დროის ინტერვალისათვის

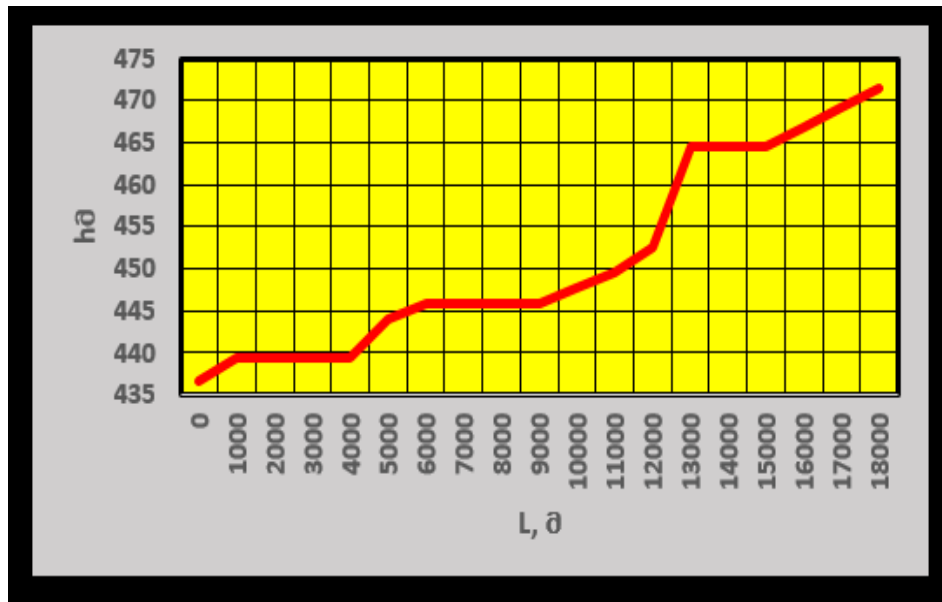
პროცედურის #	$\bar{\lambda}_i$ წინააღმდეგობის კოეფიციენტი	Δt_i დროის ინტერვალი, წმ
1	0,00941	4
2	0,00980	2
3	0,00973	1
4	0,00941	0,5
5	0,00921	0,25
6	0,00915	0,125
7	0,00913	0,0625

განვიხილოთ მაგისტრალური მილსადენის ჰიდრავლიკური დარტყმა. ნახ. 30-ზე ნაჩვენებია ჰიდრავლიკური დარტყმის პროცესის რიცხვითი კომპიუტერული რიცხვითი მოდელირება, კადრების მიხედვით, დროის ფიქსირებული სურათი, ყოველი 3 წამის შემდეგ.



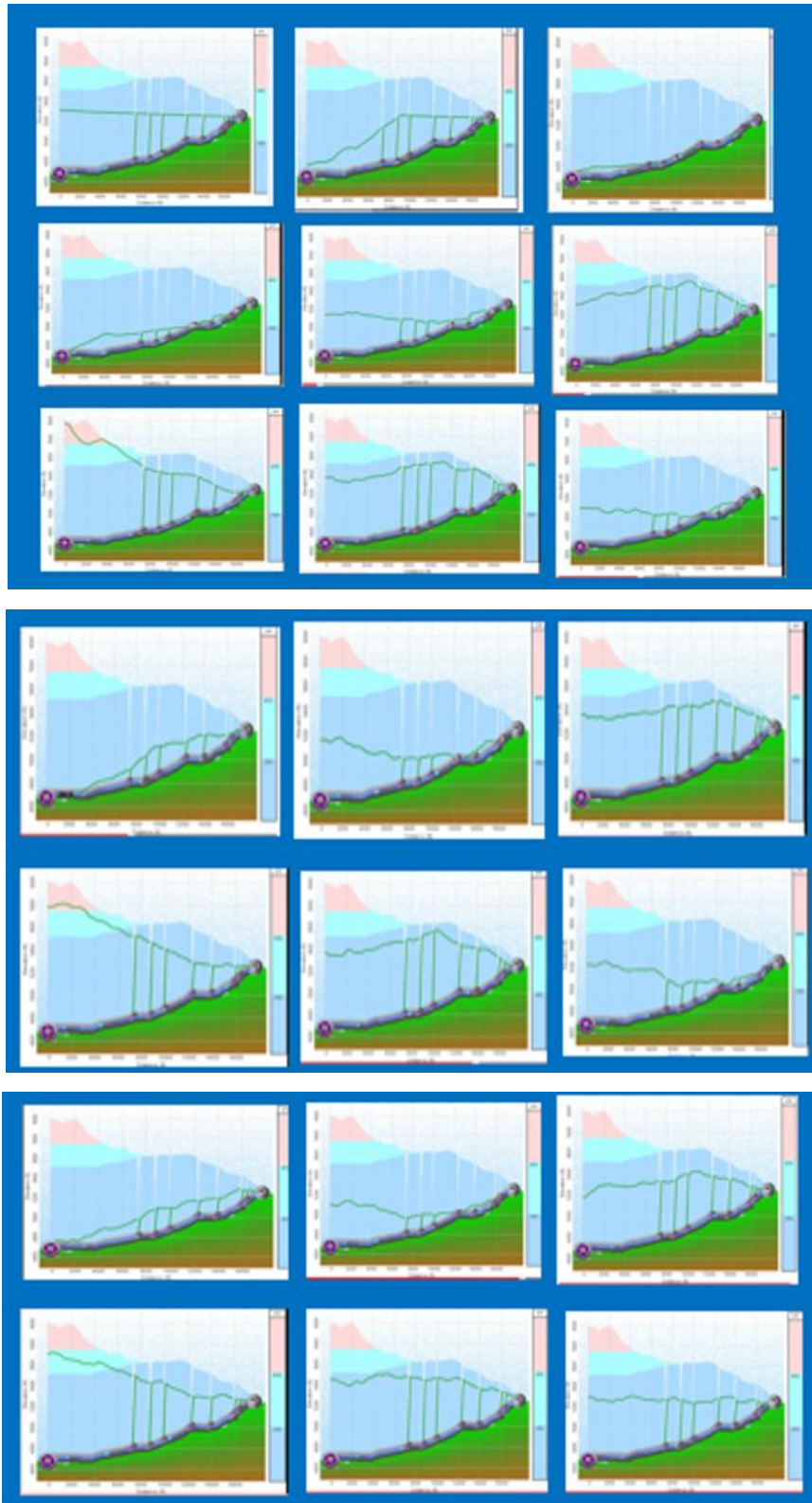
ნახ. 28. სიგრძეზე წინააღმდეგობის ინტეგრალური კოეფიციენტის დინამიკა, დროის განახევრული ბიჯით

განვიხილოთ მაგისტრალური წყალსადენი, უფრო სწორედ მისი აღმავალი უბანი. ნაჩვენებია უბნის შესაბამისი პროფილი (ნახ. 29).



ნახ. 29. მაგისტრალური მილსადენის პროფილი და ნიშნულები

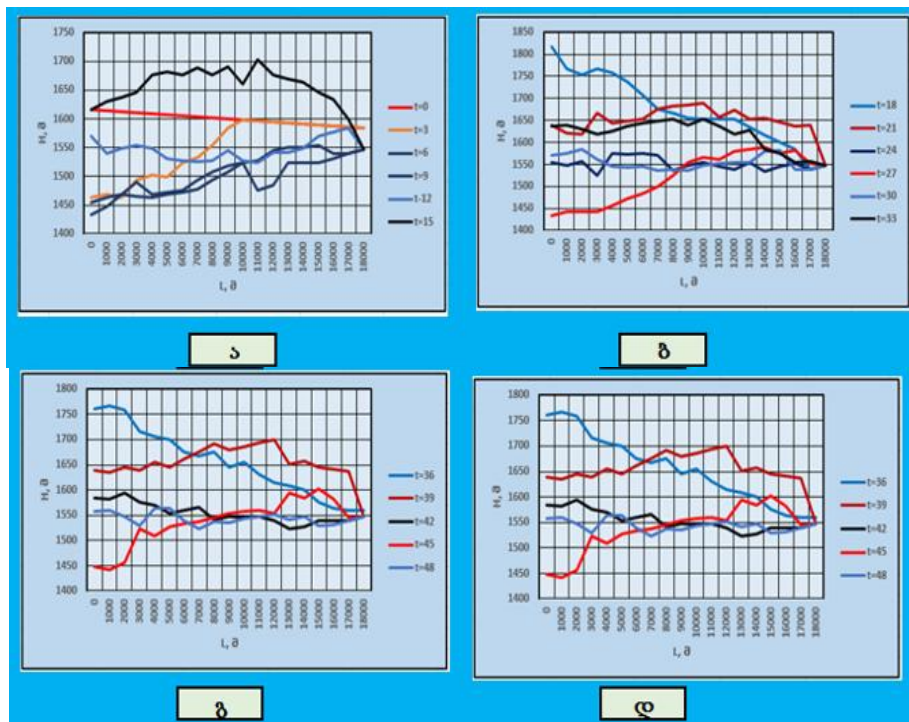
ნახ. 31-ზე ილუსტრაციისათვის ნაჩვენებია ჰიდრავლიკური დარტყმის დაწნევის ნაზრდის ორდინატების ანსამბლი მილსადენის გასწვრივ, ფიქსირებული დროის მომენტში, ხოლო ნახ. 32-ზე ნაჩვენებია ცალკეული მრუდები.



ნახ. 30. ჰიდრაულიკური დარტყმის პროცესის რიცხვითი კომპიუტერული რიცხვითი მოდელირება, კადრების მიხედვით, დროის ფიქსირებული სურათი, ყოველი 3 წამის შემდეგ

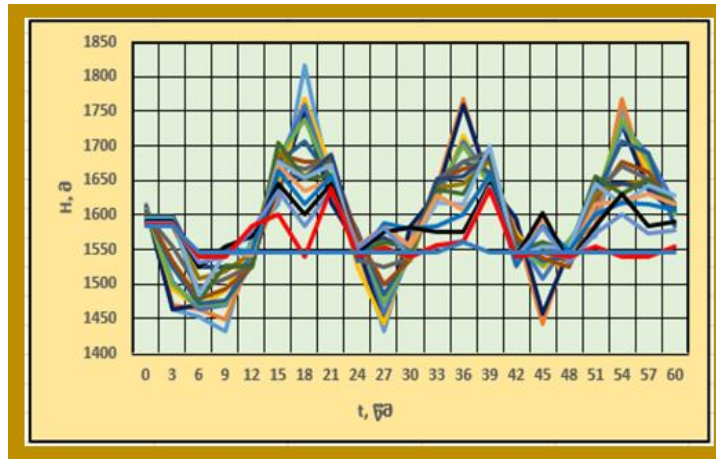


ნახ. 31. ჰიდრავლიკური დარტყმის დაწნევის ნაზრდის ორდინატების ანსამბლი მილსადენის გასწვრივ, ფიქსირებული დროის მომენტში

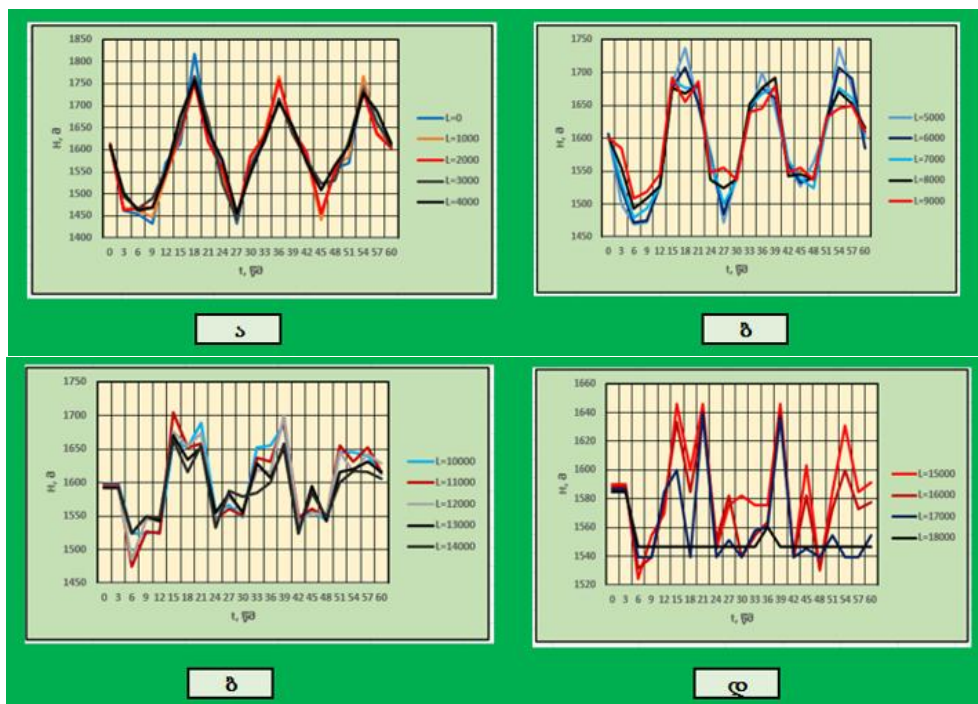


ნახ. 32. ჰიდრავლიკური დარტყმის დაწნევის ნაზრდის ორდინატების ანსამბლი, როდესაც ა) $t = 0$ წმ; $t = 3$ წმ; $t = 6$ წმ; $t = 9$ წმ; $t = 12$ წმ; $t = 15$ წმ; ბ) $t = 18$ წმ; $t = 21$ წმ; $t = 24$ წმ; $t = 27$ წმ; $t = 30$ წმ; გ) $t = 33$ წმ; $t = 36$ წმ; $t = 39$ წმ; $t = 42$ წმ; $t = 45$ წმ; დ. $t = 48$ წმ; $t = 51$ წმ; $t = 54$ წმ; $t = 57$ წმ; $t = 60$ წმ

ნახ. 33-ზე, ილუსტრაციისათვის, ნაჩვენებია ჰიდრავლიკური დარტყმის დაწნევის ნაზრდის ორდინატების ანსამბლი, მილსადენის ფიქსირებულ ცოცხალ კვეთებში, ხოლო ნახ. 34-ზე ნაჩვენებია ცალკეული მრუდები.

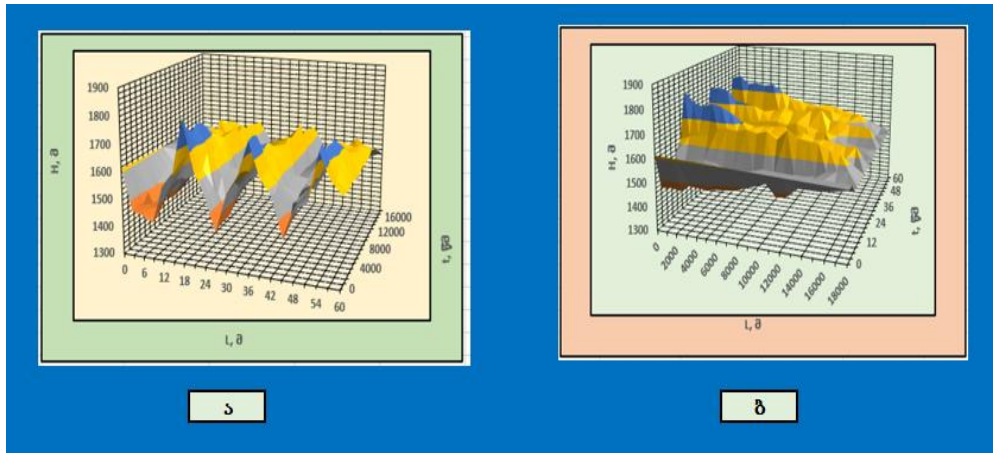


ნახ. 33. ჰიდრაულიკური დარტყმის დაწნევის ნაზრდის ორდინატების ანსამბლი



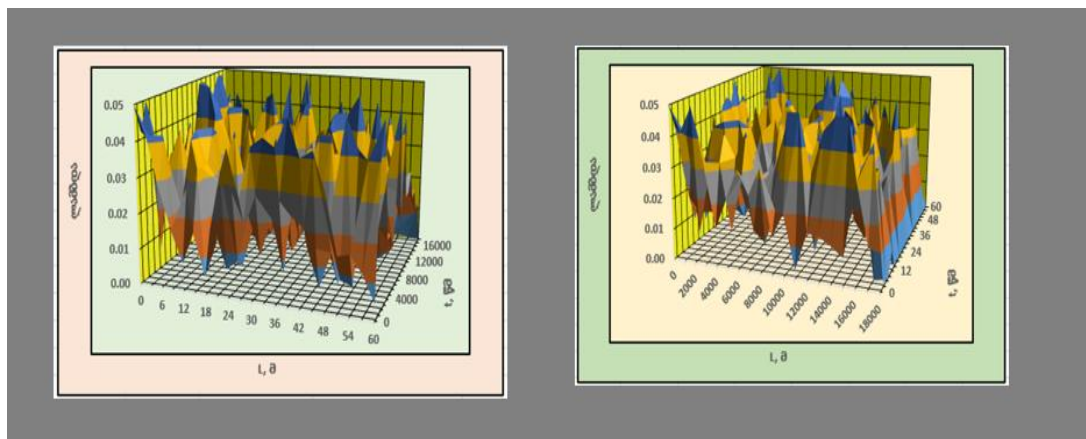
ნახ.34. ჰიდრაულიკური დარტყმის დაწნევის ნაზრდის ორდინატების ანსამბლი: ა. $L = 0$ მ; $L = 1000$ მ; $L = 0$ მ; $L = 3000$ მ; $L = 4000$ მ. ბ. $L = 5000$ მ; $L = 6000$ მ; $L = 7000$ მ; $L = 8000$ მ; $L = 3000$ მ; $L = 9000$ მ. გ. $L = 10000$ მ; $L = 11000$ მ; $L = 12000$ მ; $L = 13000$ მ; $L = 14000$ მ. დ. $L = 15000$ მ; $L = 16000$ მ; $L = 12007$ მ; $L = 18000$ მ

საბოლოოდ, ნახ. 35-ზე ნაჩვენებია დაწნევის ნაზრდის ტალღური ორი ორიენტაციის ზედაპირი $\mathbf{h} = (\mathbf{L}, \mathbf{t})$.



ნახ. 35. დაწნევის ნაზრდის ტალღური ზედაპირი $h = (L, t)$

გადავიდეთ სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის განსაზღვრა. მიღებული არასტაციონარული პროცესის ზედაპირების აგების შემდეგ, $\hat{\lambda}$ -ს გაანგარიშება მიმდინარეობს (28) ფორმულის შესაბამისად. $\hat{\lambda}$ -ს მნიშვნელობები მოყვანილია გაანგარიშებული გარდამავალი პროცესებისათვის. ნახ. 36 (ა,ბ)-ზე ნაჩვენებია $\hat{\lambda}(L, t)$ -ს ზედაპირი, ორი ორიენტაციის მქონე შემთხვევისათვის.



ნახ. 36. სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის $\hat{\lambda}(L, t)$ -ს ორი სხვადასხვა ორიენტაციის ზედაპირი

საბოლოოდ, საშუალო ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის კოეფიციენტი ტოლია $\bar{\lambda} = 0,023256$.

2.7. მილსადენში არასტაციონარული პროცესის ნატურული ექსპერიმენტალური გამოკვლევები

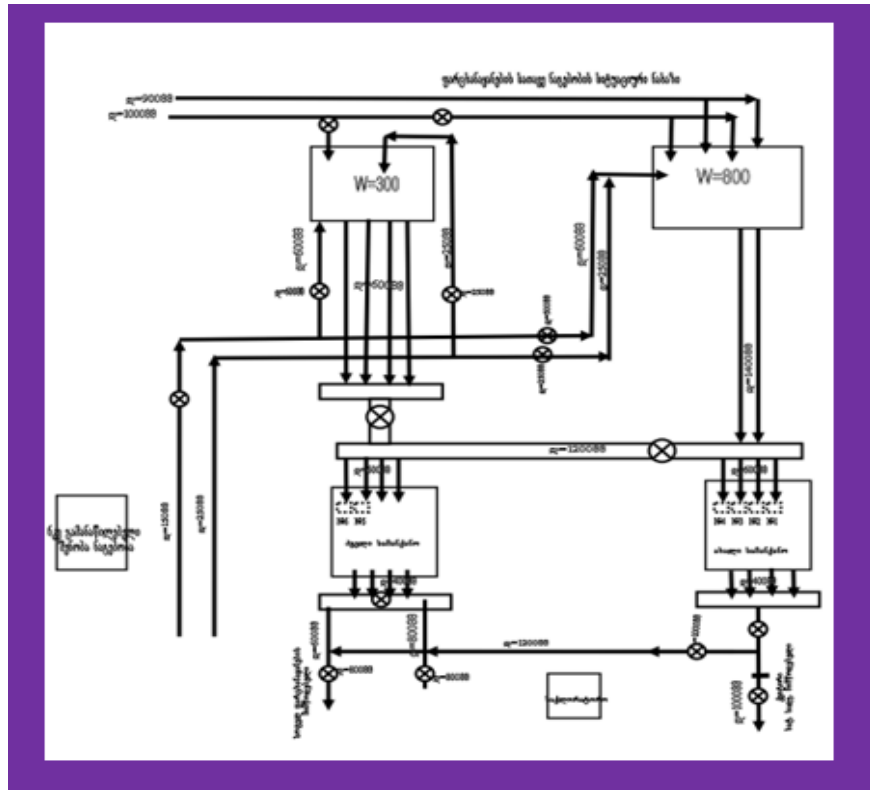
2.7.1. ფარცხანაყანევის სათავედან ქვიტირის წყალშემკრებ ავზამდე მილსადენის აღწერა

ქ. ქუთაისის ფარცხანაყანევის სათავე მერყეობს სეზონურად 4600 ± 5200 მ³/სთ-ს ფარგლებში, აღნიშნული ჭაბურღილებიდან წყალი შეედინება სათავე ნაგებობის ტერიტორიაზე არსებულ წყალშემკრებ მიწისქვეშა რკინა-ბეტონის რეზერვუარში საიდანაც იკვებება ტერიტორიაზე არსებული წყალსაქაჩი სადგური. ტერიტორიაზე არსებულ წყალსაქაჩ სადგურში ჯამში აყენია 6 ტუმბო აგრეგატი მონაცემებით 10803/85მ (Omega/Omega V^R-ს ანალოგი), ამ უკანასკნელიდან კი წყალი მაგისტრალური $D=1200$ მმ ფოლადის მილით, საერთო სიგრძით $L=16000$ მ, წყალი მიეწოდება ქვიტირის დასახლების მიმდებარე არსებულ წყალშემკრებ ავზს, რომელიც თავის მხრივ კვებავს იმავე ტერიტორიაზე არსებულ წყალსაქაჩ სადგურს. ფარცხანაყანებიდან საშუალოდ გადატუმბული წყლის მოცულობა შეადგენს $Q=4500$ მ³/სთ-ში წყლის მოცულობას.

წყალსატუმბ სადგურში ჯამში განთავსებულია 8 ტუმბო აგრეგატი მონაცემებით 10803/85მ-ზე, საიდანაც გამოდის რამოდენიმე მაგისტრალური მილსადენი სხვადასხვა მიმართულებით, კერძოდ [76-78].

ნახ. 37 -ზე ნაჩვენებია ფარცხანაყანევის ნაგებობის და ქვიტირის სატუმბი სადგურის სიტუაციური სქემა.

აღნიშნული სატუმბი სადგურიდან საშუალოდ გადატუმბული წყლის მოცულობა შეადგენს 6000 მ³/სთ-ში წყლის მოცულობას. აქედან 4500 მ³/სთ-ში, წყლის მოცულობის შემოდინება, როგორც უკვე ავღნიშნეთ, ხდება ე.წ. ფარცხანაყანევის სათავე ნაგებობიდან, ხოლო დანარჩენი 1500 მ³/სთ წყლის ხარჯი წარმოადგენს ქვიტირის სათავე ნაგებობაზე შემოსული ე.წ. მუხიანის სათავე ნაგებობიდან.

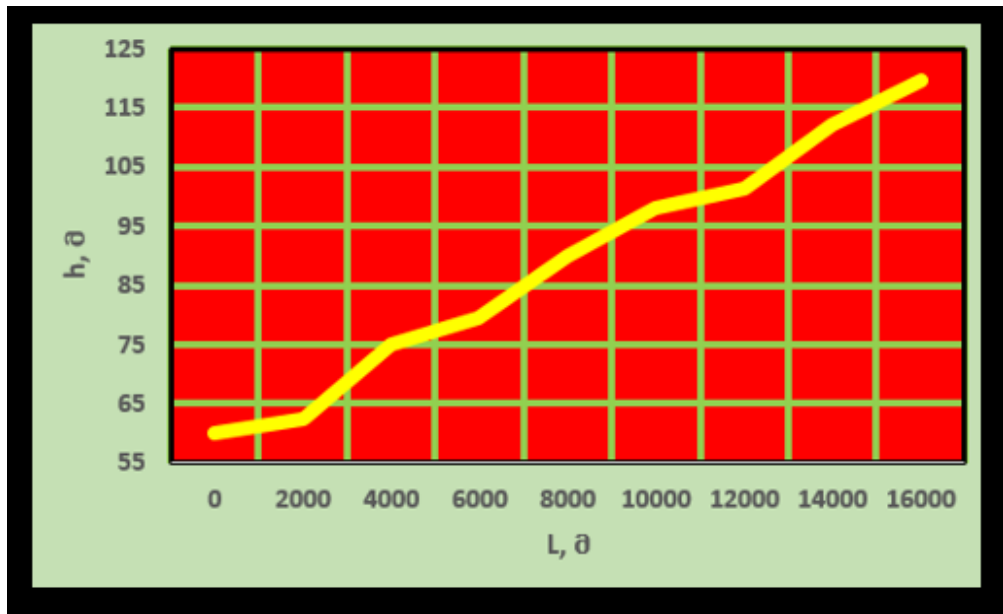


ნახ. 37. ფარგანაყენევის ნაგებობის სიტუაციური სქემა

ქვიტორის სათავე ნაგებობიდან გამოსულ მილსადენებში ხარჯების გადანაწილება ხდება შემდეგნაირად:

1. $D=1000$ მმ-იანი ფოლადის მილი (საერთო სიგრძით 5000 მ.) ეწ. საქუსლიის 42 000 მ³ ტევადობის რეზერვუარების კომპლექსისაკენ, მიედინება საშუალოდ 3 200 მ³.
2. $D=1200$ მმ-იანი ფოლადის მილი (საერთო სიგრძით 7 000 მ.) ეწ. ვ.ფშაველას 10 000 მ³-ის მოცულობის რეზერვუარებისაკენ, მიედინება საშუალოდ 2 000 მ³.
3. $D=600$ მმ-იანი ფოლადის მილი (საერთო სიგრძით 4 000 მ.) პირდაპირ ქსელში 800 მ³.

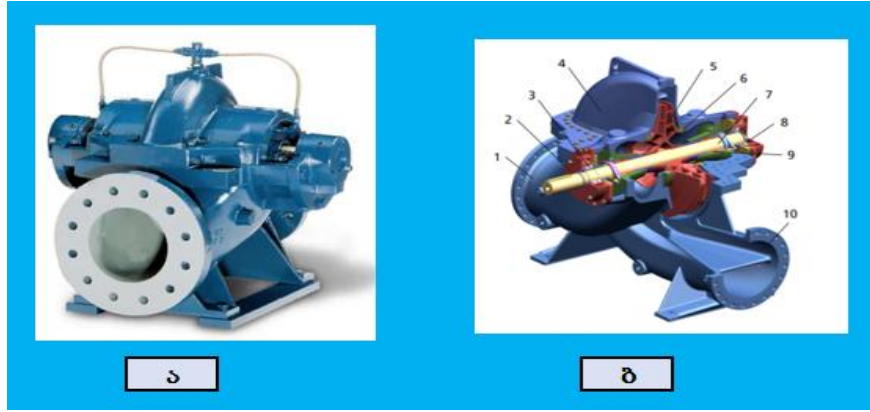
ნიშნულები, სათავე ნაგებობის ზღვის დონიდან - ტოლია: $\nabla_1 = 60,0$ მ; ქვიტორის გადამქაჩი სადგურის ზღვის დონიდან - $\nabla_2 = 119,7$ მ. მილსადენის პროფილი ნაჩვენებია ნახ. 38-ზე.



ნახ. 38. ფარცხანაყანევის სათავედან ქვიტირის წყალშემკრებ ავზამდე მილსადენის პროფილი

აღნიშნული მილსადენზე დამონტაჟებულია ცენტრიდანული ტუმბო Omega/Omega V^R. განვიხილოთ ტუმბო Omega 250-600 A GB P F-ს ხედი და ჭრა (ნახ. 39), ხოლო ტუმბოს ტექნიკური პარამეტრები ნაჩვენებია ცხრილ 8-ში.

გადასატუმბი სითხე შედის შემწოვ მილტუჩში (1) ტუმბოში ტანგენციალური მიმართულებით და იძულებულია მუშის ბორბლის (5) ბრუნვას და შემოდის გარე ცილინდრული ნაკადით. ტუმბოს კორპუსის არხის კონტურში გადასაქაჩი სითხის კინეტიკური ენერგია გადადის პოტენციურში (წნევა), და გადასაქაჩი სითხე გადადის სადაწნეი მილტუჩით (10) და გამოდის ტუმბოდან. გადასაქაჩი სითხის უკუდინება კორპუსის შემწოვი მილტუჩში აფერხებს ღრიჭოთი (6). გამდინარე ნაწილი შემოსაზღვრულია სპირალური კორპუსით (4), რომლითაც გადის ჭოკით (7). ტუმბოს კორპუსის ჭოკის ნახვრეტში იზოლირებულია სითხესა და ჭოკის შემჭიდროვებით. ჭოკზე დაყენებულია რწევის საკისარები (3 და 8), რომლებიც შეერთებულია სპირალური კამერასთან (4), განლაგებულებს კორპუსში საკისარები (2).



ნახ. 39. ცენტრიდანული Omega და Omega V^R ტუმბოს ხედი (ა) და ჭრა (ბ):
 1. შემწოვი მილტუჩი; 2. საკისარის კორპუსი; 3, 8. რწევის საკისარი; 4. სპირალური კამერა; 5. მუშა თვალი; 6. დროსელის ღრიჭო; 7. ჭოკი; 9. ჭოკის შემჭიდროვება; 10. სადაწნეო მილტუჩი

ცხრილი 8. ტუმბო Omega 250-600 A GB P F-ს ტექნიკური პარამეტრები

აბრევიატურა	დანიშნულება
ომეგა	პროდუქციის ასორტიმენტი
250	შესასვლელი მილტუჩის ნომინალური დიამეტრი (მმ)
600	თვალის ნომინალური დიამეტრი (მმ)
1150	Q , მაქსიმალური ხარჯი (მ ³ /სთ)
120	H , დაწნევა
1475	n , სიხშირე (1/წთ)

ჩვენს შემთხვევაში მიზანია სათავე სატუმბოდან ქვიტირის სადგურამდე განლაგებული მაგისტრალური წყალსადენის გარდამავალი პროცესის აღწერა და კვლევა.

ცხრილ 9-ში ნაჩვენებია საქსპლუატაციო მონაცემები.

ცხრილი 9. ტუმბო Omega 250-600 A GB P F-ს საქსპლუატაციო მონაცემები

ტიპო-ზომები	DN 80 – 350		3 ÷ 14 დიუიმი
მწარმოებლობა	Q	800 ლ/წმ-მდე	12,328 აშშ გალონი/წთ
დაწნევა	H	170 მ-მდე	558 ფუტი
მუშა წნევა	P	25 ბარამდე	363 ფუნტი/დიუიმი ²
მუშა ტემპერატურა	t	+105°C	221°F

ფარცხანაყანევის სატუმბოდან ქვიტირის სადგურამდე განლაგებულია მაგისტრალური წყალსადენი, რომლის პარამეტრებია შემდეგი: მილსადენის სიგრძე $L = 16000$ მ; მილსადენის გარე დიამეტრი $D = 1240$ მმ; მილსადენის კედლის სისქე $\delta = 18$ მმ; მილსადენის შიგა დიამეტრი $D_0 = D - 2\delta = 1240 - 36 = 1204$ მმ; ცოცხალი კვეთის ფართობი $\omega = \frac{\pi D_0^2}{4} = 1,1348$ მ².

განვიხილოთ პირველი და მეორე შემთხვევა, როდესაც მუშაობს სამი და ოთხი ტუმბო, მიერთებულებია პარალელურად. პირველი შემთხვევა - მუშაობს 3 ტუმბო; მილსადენის ხარჯი $Q = 3375$ მ³/სთ = 0,9375 მ³/წმ; მილსადენის საწყისი დაწნევა $H_0 = 81,75$ მ; დაწნევა მილსადენის ბოლოში $H_B = 66,23$ მ; მილსადენის საშუალო სიჩქარე $V = 0,8239$ მ/წმ. მეორე შემთხვევა - მუშაობს 4 ტუმბო; მილსადენის ხარჯი $Q = 4500$ მ³/სთ = 1,25 მ³/წმ; მილსადენის საწყისი დაწნევა $H_0 = 84,3$ მ; წნევა მილსადენის ბოლოში $H_B = 75,82$ მ; მილსადენის საშუალო სიჩქარე $V = 1,0985$ მ/წმ.

არსებული სიგრძეზე ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის კოეფიციენტები ფორმულების საშუალებით, შესაძლოა განისაზღვროს (შესაბამისად რეინოლდსის რიცხვებია $Re_1 = 1182000$ $Re_2 = 1200000$): $\lambda_1 = 0,0313$ და $\lambda_2 = 0,0197$.

ამგვარად ვიხილავთ გარდამავალ პროცესს, როდესაც ხდება სტაციონარული რეჟიმის (მიწოდება სამი პარალელური ტუმბოთი) გადასვლა, ახალ სტაციონარულ რეჟიმში (მიწოდება ოთხი პარალელური ტუმბოთი). ე.ი. ხდება დამატებითი ტუმბოს ჩართვა.

აღნიშნული მილსადენი, რომლის სიგრძეა 16000 მ, ხუთ კვეთში მოთავსებულია წნევის აღმრიცხავი მოწყობილობა. კერძოდ, წნევის გადამწოდები.

მილსადენისათვის გამოიყენება: მილის ფოლადი მარკით **AISI 304** (The American Iron and Steel Institute), რომლის ანალოგია ფოლადის მარკა 10X18H10T და დრეკადობის მოდულია $E_{st} = 2,119 \cdot 10^{11}$ პა, წყლის

მოდული - $E_w = 1,96 \cdot 10^9$ პა; ბერის სიჩქარე წყალში $c = 1425$ მ/წმ;
 შესაბამისად მილის დიამეტრი და კედლის სისქეა $D = 1240$ მმ და $\delta = 18$ მ.
 ამიტომ საბოლოოდ დარტყმითი ტალღის სიჩქარისათვის გვექნება:

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{1 + \frac{E_w D}{E_{st} \delta}}} = 1120 \text{ მ/წმ. ამგვარად, დროის ფაზა ტოლია } \tau = \frac{2L}{c} = 28,57 \text{ წმ.}$$

2.7.2. მილსადენზე წნევის გამზომი ხელსაწყოების აღწერა

წნევის გამზომი ხელსაწყო testo 314-ს დანიშნულებაა ჰიდრავლიკური რეჟიმების აღრიცხვა, წნევის ნახტომების რეგისტრირება და შესაძლო დაზიანების აღმოჩენა (ნახ. 40).

ხელსაწყოს მუშაობა ეფუძნება წნევის ცვლილების პროპორციულ გარდაქმნას, ელექტრულ სიგნალად. კერძოდ, წნევის ცვლილებისას (სიჩქარით არა უმეტეს 0,5 ატ/წთ), მილსადენის შესასვლელი გადამწოდი, აფორმირებს ელექტრულ სიგნალად. შესასვლელი გადამწოდის დროის ინტერვალით, ელექტრული სიგნალი საზღვრავს ციფრულ მასივს და გადადის ელექტრონული ბლოკის კონტროლერში. შედეგების დამუშავება ეფარდება ზღვრულ მნიშვნელობებს.



ნახ. 40. წნევის გამზომი ხელსაწყო testo 314-ს ხედი: ა. ხელსაწყო testo 314; ბ. ელექტრონული კეისი

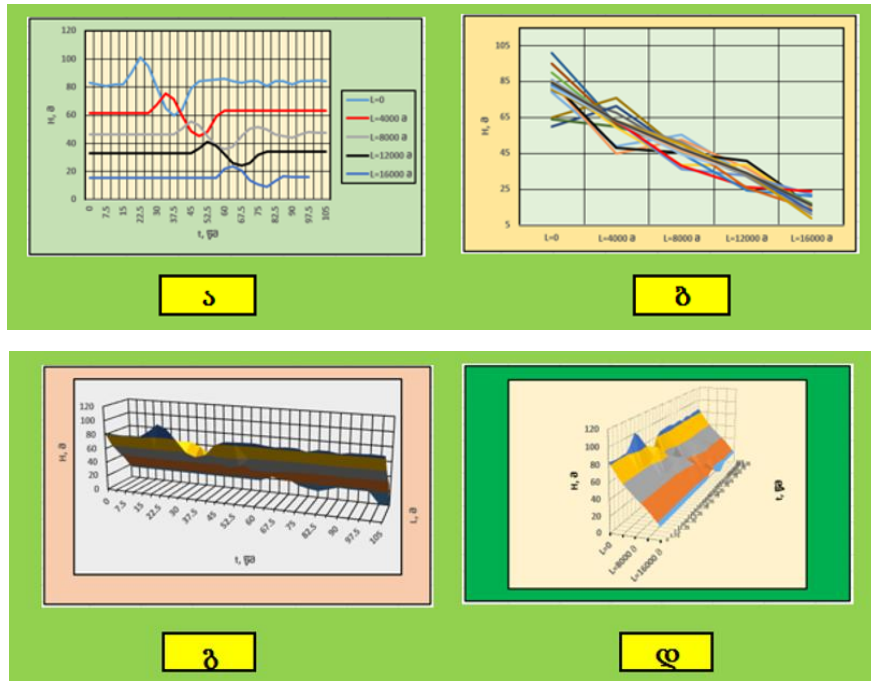
დამუშავების შედეგებად, ფორმირდება შესასვლელი სიგნალი, მართვადი ფერადი ინდიკატორებით, რომლებიც გადადის რეგისტრში.

ხელსაწყო testo 314 ზომავს მილსადენის შემდეგ კვთებში: 1. მილსადენი სატუმბი სადგურიდან, ქვიტირამდე ($\Delta x = 4000$ მ); 2. მილსადენი ქვიტირიდან, რეზერვუარამდე ($\Delta x = 1250$ მ).

მილსადენისათვის (ქვიტირიდან - საქუსლიას რეზერვუარამდე), აგრეთვე გამოყენებულია რუსული წარმოების ხელსაწყო „Радион ПД“, რომელიც გამოიყენება სადაწნეო წყალმდენებისათვის, აგრეთვე წნევის ავარიული სიგნალების ცვლილების ფორმირებისას. ხელსაწყო მონტაჟდება მილსადენზე შეჭრილი სფერული ონკანის მეშვეობით, GSM მოდემით და კვების ავტონომური წყაროთი [98-99]. წნევის ცვლილებისას (მეტი და 0,5 ატ/წმ ცვლილებისას), ელექტრული სქემის შესასვლელზე ფორმირდება სიგნალი, რომელიც უზრუნველყოფს ჩანაწერის რეგისტრაციას მახსოვრობაში. შესაძლოა მონაცემების არქივიზაცია. ტექნიკური მახასიათებლები: წნევის რეგისტრაციის დიაპაზონი 0,025 ÷ 2,50 მპა, ზღვრული დიაპაზონი +0,5 %; კვება - ავტონომურია.

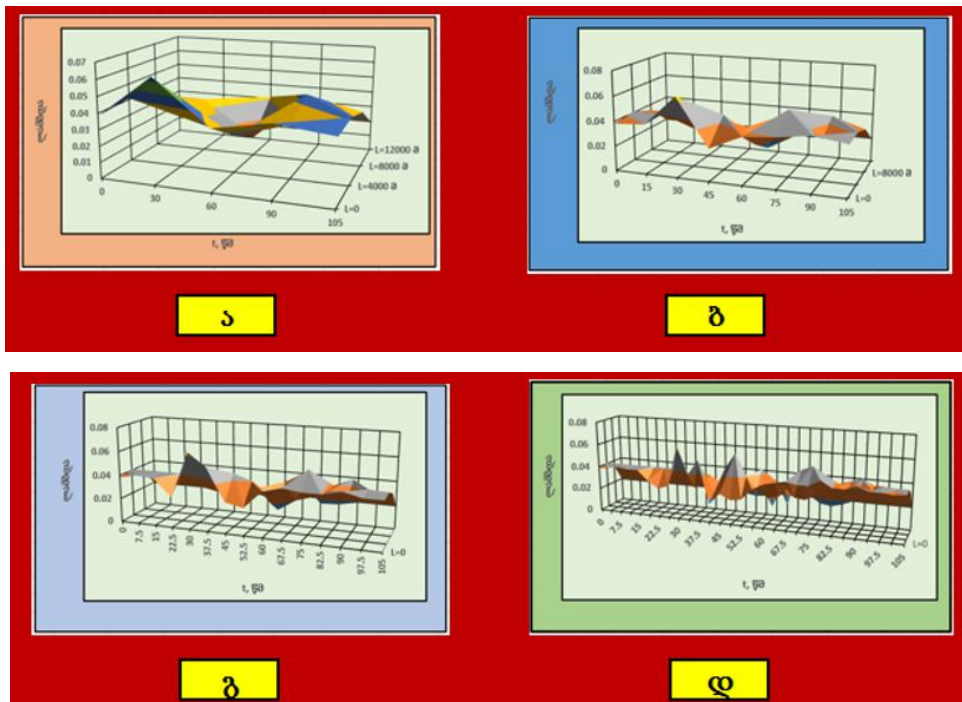
2.7.3. ფარცხანაყანევის სათავედან ქვიტირამდე მილსადენის არასტაციონარული პროცესის ნატურული ექსპერიმენტის შედეგები

ნაშრომში მოყვანილია გარდამავალი პროცესის წნევის მნიშვნელობები, როგორც დროში, ასევე მილსადენის გასწვრივ. მიღებული წნევის ნაზრდის ანათვალეები (საკვანძო წერტილებში) აღებულია შემდეგი ბიჯით: $\Delta t = 3,75$ წმ; $\Delta x = 4000$ მ. ამგვარად პირველადი ინფორმაცია პროცესის შესახებ მიღებულია და მოყვანილია ნახ. 41-ზე. ამავე ნახ. 41 (ა, ბ, გ და დ)-ზე ნაჩვენებია წნევის ნაზრდის გრაფიკები (ა და ბ, ორი ორიენტაციისათვის) და ტალღური ზედაპირი (გ და დ).



ნახ. 41. წნევის ნაზრდის გრაფიკები (ა და ბ) და ტალღური ზედაპირი ორი ორიენტაცია (გ და დ).

ნახ. 42-ზე ნაჩვენებია $\hat{\lambda}(L, t)$ არასტაციონარული პროცესის $\hat{\lambda}$ -ს ზედაპირების აგება.

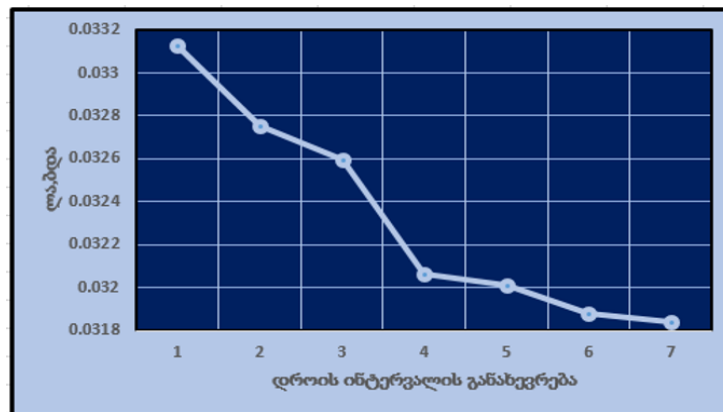


ნახ. 42. არასტაციონარული პროცესის $\hat{\lambda}$ -ს ზედაპირების აგება. ა. $\Delta t_1 = 60$ წმ; ბ. $\Delta t_2 = 30$ წმ; გ. $\Delta t_3 = 15$ წმ; დ. $\Delta t_4 = 7,5$ წმ

განვიხილოთ $\hat{\lambda}$ -ს მნიშვნელობები და განვსაზღვროთ სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის საშუალო მნიშვნელობა $\bar{\lambda}_i$. შემდეგ გამოვიკვლიოთ ინტეგრალურ სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის დინამიკა (ცხრილი 10 და ნახ. 43). ამგვარად მოხდა Δt_i -ს გაგრძელება პროცესი დროის ბიჯის განახევრებით.

ცხრილი 10. $\bar{\lambda}_i$ წინააღმდეგობის კოეფიციენტის მნიშვნელობები, სხვადასხვა Δt_i დროის ინტერვალი სხვადასხვა მნიშვნელობების

პროცედურის №	$\bar{\lambda}_i$ წინააღმდეგობის კოეფიციენტი	Δt_i დროის ინტერვალი, წმ
1	0,033127	60
2	0,032752	30
3	0,032596	15
4	0,032063	7,5
5	0,032011	3,75
6	0,031879	0,1875
7	0,031842	0,09375



ნახ. 43. ინტეგრალური სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის დინამიკა, დროის განახევრული ბიჯით

ცხადია, რომ გვაქვს მარტივი იტერაცია და პროცესი თანდათანობით ილევა.

2.7.4. ქვიტირის სატუმბოდან საქუსლიის რეზერვუარამდე მილსადენის აღწერა და არასტაციონარული პროცესის ნატურული ექსპერიმენტის შედეგები

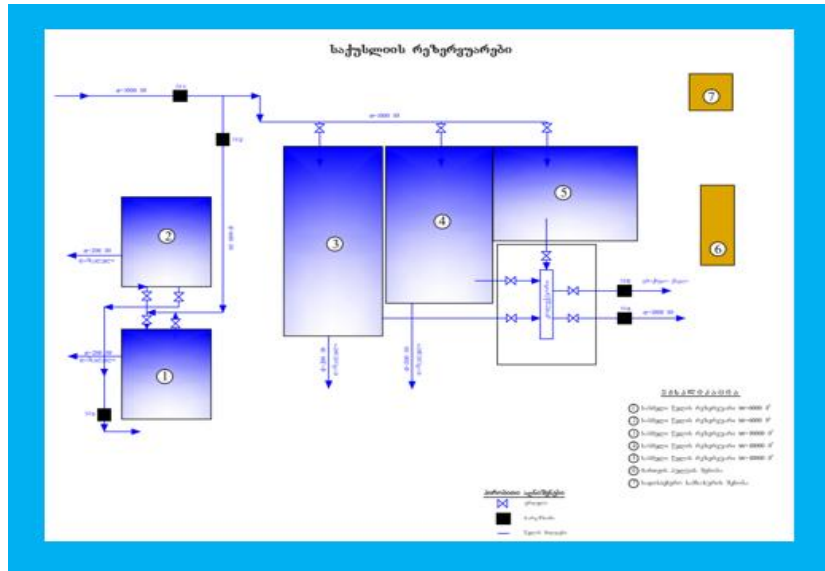
განვიხილოთ მილსადენი ქვიტირის სატუმბოდან საქუსლიის რეზერვუარამდე (ნახ. 44). მილსადენის ტექნიკური პარამეტრები მოყვანილია ცხრილ 11-ში.

ცხრილი 11. ქვიტირის სატუმბოდან საქუსლიის რეზერვუარამდე მილსადენის ტექნიკური პარამეტრები

ქვიტირის სატუმბოდან საქუსლიის რეზერვუარამდე			
	პარამეტრი	განზომილება	სიდიდე
1	მილსადენის სიგრძე	მ	5000
2	მილსადენის შიგა დიამეტრი	მმ	1020
3	მილსადენის კედლის სისქე	მმ	14
4	ხარჯი მილსადენში	მ ³ /სთ	6000
5	წნევა მილსადენის საწყის წერტილში	ატ	80
6	წნევა მილსადენის ბოლო წერტილში	ატ	0,4
7	წნევის ნაკადის საშუალო სიჩქარე	მ/წმ	2,1
8	დანაკარგი 1000 გრძ/მ	მ	4,68

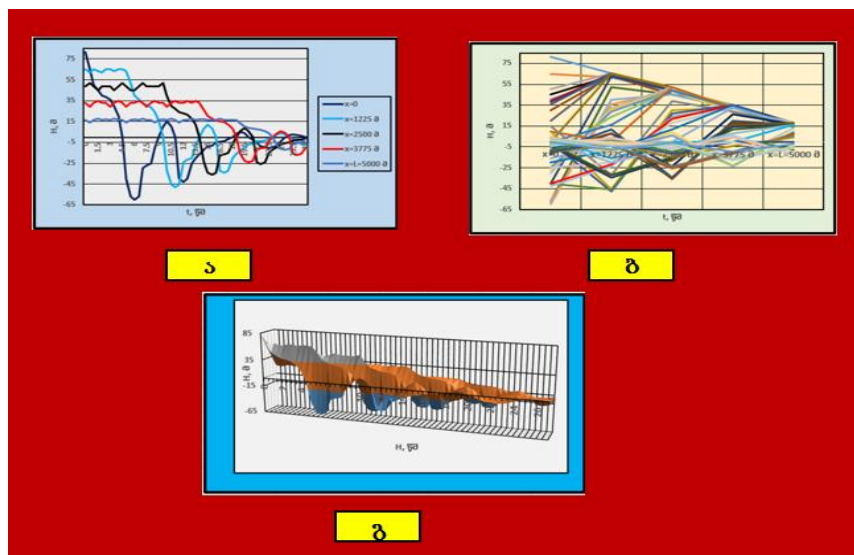
ამ შემთხვევაში გვექნება: $p_0 = 80$ ატ და $p^* = 0,4$ ატ ($H_1 = 815,49$; $H_2 = 4,08$ მ); წყალში ტალღის სიჩქარე $c = 1120$ მ/წმ და ფაზა $\tau = \frac{2L}{c} = 8,9285$ წმ.

მილსადენის დასაწყისში და ბოლოში ნიშნულების მნიშვნელობები შესაბამისად ტოლია: $\nabla_2 = 119,7$ მ და $\nabla_3 = 174$ მ. ნიშნულების სხვაობაა: $\nabla_3 - \nabla_2 = 55$ მ. დამყარებული რეჟიმისას, ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის კოეფიციენტი ტოლია $\lambda = 0,019876$.



ნახ. 44. საქუსლის რეზერვუარების სქემა

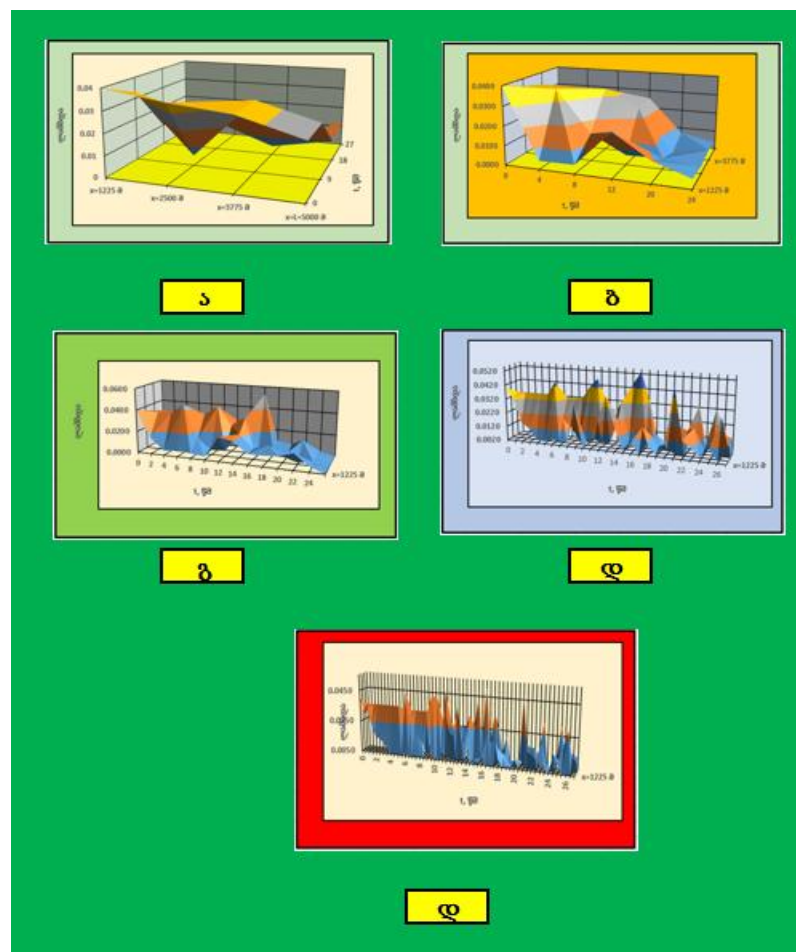
შედეგად, მოყვანილია გარდამავალი პროცესის წნევის მნიშვნელობები, როგორც დროში, ასევე მილსადენის გასწვრივ. მიღებული წნევის ნაზრდის ანათვალეები (საკვანძო წერტილებში) აღებულია შემდეგი ბიჯით: $\Delta t = 0,5$ წმ; $\Delta x = 1225$ მ. ამგვარად პირველადი ინფორმაცია პროცესის შესახებ მიღებულია და მოყვანილია ნახ. 45-ზე. ნახ. 45 (ა, ბ, და გ)-ზე ნაჩვენებია წნევის ნაზრდის გრაფიკები (ა და ბ, ორი ორიენტაციისათვის) და ტალღური ზედაპირი (დ).



ნახ. 45. ა,ბ. დაწნევის ნაზრდის გრაფიკები; გ. ტალღური ზედაპირი

ნახ. 46-ზე ნაჩვენებია $\hat{\lambda}(L, t)$ არასტაციონარული პროცესის $\hat{\lambda}$ -ს ზედაპირების აგება. ნახ. 46-ზე, ნაჩვენებია არასტაციონარული პროცესის $\hat{\lambda}$ -ს ზედაპირების აგება. ა. $\Delta t_1 = 9$ წმ; ბ. $\Delta t_2 = 4$ წმ; გ. $\Delta t_3 = 2$ წმ; დ. $\Delta t_4 = 1$ წმ; ე. $\Delta t_2 = 0,5$ წმ-ის შემთხვევაში.

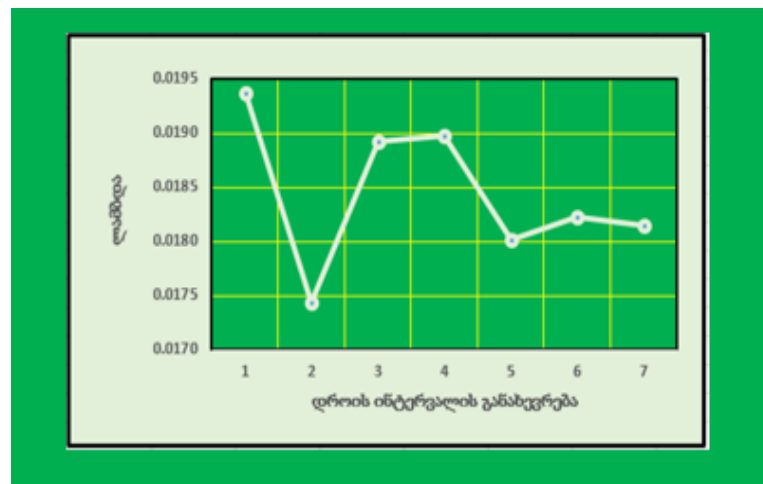
განვიხილოთ $\hat{\lambda}$ -ს მნიშვნელობები და განვსაზღვროთ სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის საშუალო მნიშვნელობები $\bar{\lambda}_i$. შემდეგ გამოვიკვლიოთ ინტეგრალურ სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის დინამიკა (ცხრილი 12 და ნახ. 47). ამგვარად მოხდა Δt_i -ს გაგრძელება პროცესი დროის ბიჯის განახევრებით.



ნახ. 46. არასტაციონარული პროცესის $\hat{\lambda}$ -ს ზედაპირების აგება. ა. $\Delta t_1 = 9$ წმ;
ბ. $\Delta t_2 = 4$ წმ; გ. $\Delta t_3 = 2$ წმ; დ. $\Delta t_4 = 1$ წმ; ე. $\Delta t_2 = 0,5$ წმ

ცხრილი 12. $\bar{\lambda}_i$ წინააღმდეგობის კოეფიციენტის მნიშვნელობები, სხვადასხვა Δt_i დროის ინტერვალისათვის (აღმავალი ხაზი)

პროცედურის #	$\bar{\lambda}_i$ წინააღმდეგობის კოეფიციენტი	Δt_i დროის ინტერვალი, წმ
1	0,019369	9
2	0,017436	4
3	0,018917	2
4	0,018972	1
5	0,011802	0,5
6	0,018230	0,25



ნახ. 47. ინტეგრალურ სიგრძეზე წინააღმდეგობის კოეფიციენტის დინამიკა, დროის განახევრული ბიჯით

ცხადია, რომ გვაქვს მარტივი იტერაცია და პროცესი თანდათანობით ილევა.

თავი 3. სატუმბი სადგურის ცენტრიდანული ტუმბოების რეგულირებიანი ამძრავის მუშაობის ენერგოდამზოგავი რეჟიმების თეორიული დასაბუთება

3.1. ცენტრიდანული ტუმბოების გადასატუმბი პროდუქტის დანახარჯის და სიმძლავრის, მაგისტრალური მილსადენის სისტემის ჰიდრომექანიკური ფაქტორების გამოვლენა

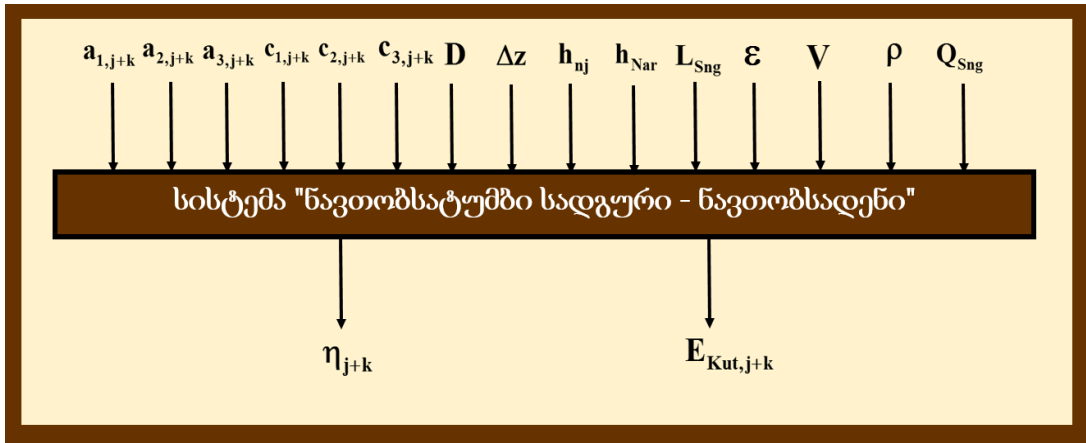
სატუმბი სადგური, როგორც ობიექტი, პროექტირებით, ექსპლუატაციით და მართვით ხასიათდება გარკვეული ფაქტორებით. ნახ. 48-ზე ნაჩვენებია გადასატუმბვის ენერჯის დანახარჯის ბლოკ-სქემა, რომელიც ასახავს სატუმბი სადგურის და მილსადენის სისტემის შესასვლელ და გამოსავალ პარამეტრებს.

ენერგეტიკულ დანახარჯზე მოქმედებს შემდეგი ფაქტორები:

- სადგურის ცენტრიდანული ტუმბოების ჰიდრომექანიკური მახასიათებლების რეგრესიული მოდელების კონსტრუქციული ფაქტორები: $\mathbf{a}_{0,j,k}$, $\mathbf{a}_{1,j,k}$, $\mathbf{a}_{2,j,k}$ - $\mathbf{H-Q}$ სადაწნეო მახასიათებლის კოეფიციენტები გარკვეული ბრუნვის სიხშირისთვის, $\mathbf{i-k}$ ცენტრიდანული ტუმბოს, \mathbf{j} -ური სადგურის, რომლების სიდიდე დამოკიდებულია ტუმბოს ტიპზე (\mathbf{i} - წარმოადგენს პარალელურად მიერთებული ცენტრიდანული ტუმბოების რაოდენობას, ხოლო \mathbf{k} - მიმდევრობით); $\mathbf{c}_{1,j,k}$, $\mathbf{c}_{2,j,k}$, $\mathbf{c}_{3,j,k}$ - კოეფიციენტები, რომლებიც ახასიათებენ მქკ-ის მახასიათებელს, $\mathbf{i-k}$ ცენტრიდანული ტუმბოს, \mathbf{j} -ური სადგურის ნომერი.

- ტექნოლოგიური ფაქტორები, რომლებიც განპირობებულია მილსადენის ჰიდრავლიკური მახასიათებლით, ხარჯით და პროდუქტის რეოლოგიური თვისებებით: \mathbf{h}_{nj} - შეტბორვა \mathbf{j} -ური სადგურის წინ; \mathbf{Q}_{Sng} - გარკვეული რეჟიმის საანგარიშო ხარჯი; \mathbf{L}_{Sng} - ნავთობსადენის საანგარიშო სიგრძე; Δz - მილსადენის დასაწყისის და ბოლო ნიშნულების სხვაობა; \mathbf{h}_{Nar}

- ნარჩენი დაწნევა მილსადენის ბოლოში; ρ - ნავთობის სიმკვრივე; v - პროდუქტის კინემატიკური სიბლანტე; ε - მილსადენის შიგა კედლების ექვივალენტური აბსოლუტური ხორკლიანობა.



ნახ. 48. სისტემის „სატუმბო სადგურის - მილსადენის“ ენერგოდანახარჯების ჰიდრომექანიკური ფაქტორების გავლენის ბლოკ-სქემა

ცნობილია, რომ მაგისტრალური მილსადენი იყოფა საექსპლუატაციო უბნებად, რომელთა შორის არის ერთმანეთისგან ჰიდრავლიკურად დაკავშირებული სატუმბო სადგური. ამიტომ მაგისტრალური მილსადენის მათემატიკური მოდელის ასაგებად აუცილებელია დაწნევების ბალანსის განტოლების ანალიზი [79-81]:

$$N_{Eqs} h_n + n H_{St} = 1,02 f Q^{2-m} L_{Sng} + \Delta z + N_{Eqs} h_{Nar}, \quad (40)$$

სადაც N_{Eqs} არის საექსპლუატაციო უბნების რაოდენობა; n - სადგურების რაოდენობა; H_{St} - ყველა მაგისტრალური ტუმბოებით მიერ განვითარებული დაწნევა; f - ჰიდრავლიკური ქანობი ერთეულოვან ხარჯზე ფორმულით:

$$f = \frac{\beta v^m}{D^{5-m}}, \quad (41)$$

β, m - კოეფიციენტები, რომლებიც დამოკიდებულია პროდუქტის რეჟიმზე გამოსასვლელი პარამეტრების გამოყენების რეგულირების ეფექტურობის მეთოდის შეფასებად, მიიღება მქ η_{jmi-k} და პროდუქტის გადასატუმბო კუთრი დანახარჯები - $E_{K_{uj, it-k}}$, $i-k$ მაგისტრალური

გადასატუმბი აგრეგატის, j -ური სადგურისათვის. მაგისტრალური მილსადენის სისტემის სარეჟიმო პარამეტრების შერჩევის ძირითად მიზნად წარმოადგენს პროდუქტის ერთეული მოცულობის ტრანსპორტის ენერგოდანახარჯების შემცირების მინიმიზირება [82].

3.2. მაგისტრალური სატუმბი აგრეგატის მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის ცვლილების მართვის დასაბუთებელი მეთოდი, მარგი ქმედობის კოეფიციენტის მაქსიმიზაციისას

სატუმბი სადგურის მუშაობის ოპტიმიზაციის პარამეტრად შევარჩიოთ მაგისტრალური სატუმბი აგრეგატის მქკ, რომელიც წარმოადგენს ტექნოლოგიური გადატუმბვის პროცესის ენერგეტიკული ოპტიმიზაციის კრიტერიუმს [83].

მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის ცვლილებისას, ცენტრიდანული ტუმბოს მახასიათებლის $H-Q$ განტოლება, მსგავსების თეორიის გათვალისწინებით განისაზღვრება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$H = a_0 \left(\frac{n(\omega)}{n_0(\omega_0)} \right)^2 + a_1 \frac{n(\omega)}{n_0(\omega_0)} Q + a_2 Q^2, \quad (42)$$

სადაც $n_0(\omega_0)$ და $n(\omega)$ შესაბამისად არის ცენტრიდანული ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის ნომინალური და მუშა სიხშირე.

თუ ვიხილავთ გადატუმბვის ჰიდრავლიკურ რეჟიმს, მაშინ ხარჯის დამოკიდებულების დაწნევის გარეშე, გვაქვს წაკვეთილი კვადრატული დამოკიდებულება:

$$H = a \left(\frac{n(\omega)}{n_0(\omega_0)} \right)^2 - bQ^2. \quad (43)$$

მაგისტრალური სატუმბი აგრეგატის მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირე ცვლილების მეთოდის გამოყენების შემთხვევაში, დაკავშირებულია სისტემა „სატუმბი სადგური-მილსადენის“ მქკ-ის ცვლილების რიგ საკითხთან.

კერძოდ, მნიშვნელოვანია როგორია მაგისტრალური სატუმბო აგრეგატის მქკ-ის ცვლილების ხასიათი და ხარისხი, ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის გაზრდა და შემცირება.

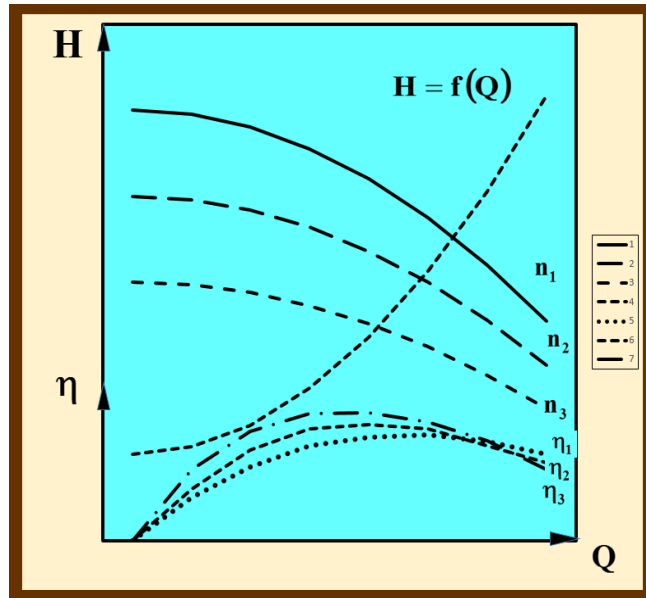
მაგისტრალური სატუმბო აგრეგატის მქკ ცალკ-ცალკე შეიცავს ამძრავს, ცენტრიდანულ ტუმბოს და შემაერთებელი მუფტის მქკ-ის. თუ ვიყენებთ სინქრონული ელექტროძრავის ამძრავს, მაშინ მქკ-ის დამოკიდებულება ბრუნვის სიხშირეზე და დატვირთვა ლილვზე, განისაზღვრება ასინქრონული ძრავის დიაგრამის შესაბამისად [84]. შემაერთებელი მუფტის მქკ-ის ცვლილება შეიძლება უგულვებელყოფთ, რადგანაც იგი ხორციელებს გადაცემის ბრუნვითი მომენტის ფუნქციის მნიშვნელობისათვის, მქკ ახლოსაა ერთთან. ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის ცვლილების მქკ-ის აბსოლუტური სიდიდე არ იცვლება, ხოლო მახასიათებელი $\eta - Q$ (ნახ. 49) წაინაცვლება [85], თუმცა შესაბამისად იცვლება სადაწნეო მახასიათებელი.

ამასთან დაკავშირებით, განვიხილოთ მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის, მქკ-ის დამოკიდებულება, გამომდინარე ტუმბოს მწარმოებლობის (ხარჯის) კონსტრუქციული განსაკუთრებლობის გათვალისწინებით.

მოცემული დამოკიდებულება განისაზღვრება ტუმბოს საპასპორტო მახასიათებლიდან (გრაფიკულად ან ანალიზურად), მისი შემდგომი მქკ-ის აპროქსიმაციის წირით, შემდეგი პოლინომით $\eta = f(Q, n_0/n)$ და მსგავსების თეორიის გათვალისწინებით:

$$\eta = c_1 Q \frac{n_0(\omega_0)}{n(\omega)} + c_2 \left(Q \frac{n_0(\omega_0)}{n(\omega)} \right)^2 + c_3 \left(Q \frac{n_0(\omega_0)}{n(\omega)} \right)^3. \quad (44)$$

მიღებული დამოკიდებულება ითვალისწინებს ცენტრიდანული ტუმბოს მწარმოებლობას, თანაც Q -ს სიდიდე სისტემისათვის „ცენტრიდანული ტუმბო-მილსადენი“ განისაზღვრება ცენტრიდანული ტუმბო და შეთავსებული სადაწნეო მილსადენის უბნის მახასიათებლის გადაკვეთით.



ნახ. 49. ცენტრიდანული ტუმბოს მახასიათებელი $\eta - Q$ -ს ცვლილება, მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის ცვლილებისას

არსებობს, მაგისტრალური სატუმბი აგრეგატის ცენტრიდანული ტუმბოს მქკ-ის ქვედა ზღვრის შემცირება, რომელიც განპირობებულია ელექტროენერგიის დაზოგვის აუცილებლობით იმ პირობით, რომ ცენტრიდანული ტუმბოს ამძრავად წარმოადგენს ელექტროძრავას. თანახმად [86]-ში მოყვანილია აღნიშნული მნიშვნელობები (ცხრილი 13).

ცხრილი 13. ელექტროენერგიის დაზოგვის რეკომენდაციები ცენტრიდანული ტუმბოების აგრეგატების მქკ-ის განსაზღვრისათვის

მაგისტრალური ტუმბოს ტიპი	სატუმბი აგრეგატის ნორმატიული მარგი ქმედობის კოეფიციენტის, არანაკლებ %	მაგისტრალური ტუმბოს ტიპი	სატუმბი აგრეგატის ნორმატიული მარგი ქმედობის კოეფიციენტის, არანაკლებ %
125-550	61,4	1800-240	77,3
180-500	64,2	2500-230	80,5
250-475	66,0	3600-230	81,7
360-460	73,7	5000-210	82,7
500-300	74,7	7000-210	83,8
720-280	76,5	10000-210	84,0
1250-260	74,1		

ცენტრიდანული ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის მაქსიმალური მქკ-ის მუდმივობისათვის, შემოთავაზებულია გარკვეული ექსპლუატაციის მქკ-ის მახასიათებლის მაქსიმიზაცია.

კონკრეტული ტიპის ცენტრიდანული ტუმბოს ხარჯისა და წნევის მნიშვნელობების, მაქსიმალური მქკ-ის განსაზღვრისას, გამოვიკვლიოთ დამოკიდებულება ცენტრიდანული ტუმბოს მქკ-ის მახასიათებელი ექსტრემუმზე:

$$\begin{cases} \frac{d\eta}{dQ} = f'(c_1Q + c_2Q^2 + c_3Q^3) = 0 \Rightarrow \eta \rightarrow \max; \\ c_1 + 2c_2Q_{\eta\max} + 3c_3Q_{\eta\max}^2 = 0. \end{cases} \quad (45)$$

ამიტომ მივიღებთ მწარმოებლობისა $Q_{\eta\max}$ და დაწნევის $H_{\eta\max}$ მნიშვნელობებს ცენტრიდანული ტუმბოს მაქსიმალური მქკ-ის $\eta_{\eta\max}$, მუშა თვლის ბრუნვის ნომინალური სიხშირისათვის:

$$\begin{cases} Q_{\eta\max} = \frac{-c_2 - \sqrt{c_2^2 - 3c_1c_3}}{3c_3}; \\ H_{\eta\max} = a_0 + a_1Q_{\eta\max} + a_2Q_{\eta\max}^2; \\ \eta_{\max} = c_1Q_{\eta\max} + c_2Q_{\eta\max}^2 + c_3Q_{\eta\max}^3. \end{cases} \quad (46)$$

გამოვიყენოთ ცენტრიდანული მანქანების მსგავსევის კანონები (1.1) და განვსაზღვროთ მქკ-ის მაქსიმალური წირები, გარკვეული ტუმბოსათვის:

$$h = \frac{H_{\eta\max}}{Q_{\eta\max}} Q^2. \quad (47)$$

გამოვიყენებთ ჰიდრაულიკური ხახუნის სხვადასხვა ზონების ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის კოეფიციენტის გაანგარიშების ფორმულები, ვითვალისწინებთ რა გეოდეზიურ ვარდნილებს და გარკვეულ კვეთებში დაწნევის მნიშვნელობებს, ვიანგარიშობთ მილსადენის უბნის დაწნევის დანაკარგს და ვღებულობთ მილსადენის მახასიათებელს. ამიტომ დაწნევა დამოკიდებულია ხარჯზე და შეიძლება წარმოვიდგენოთ ანალიზური ფორმით, მაგალითად მეორე რიგის პოლინომად:

$$H = d_0 + d_1Q + d_2Q^2, \quad (48)$$

სადაც $\mathbf{d}_0, \mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2$ არის მილსადენის საპროექტო გაანგარიშების ან ექსპლუატაციის პროცესში განსაზღვრული კოეფიციენტები.

(47) და (48) განტოლების ერთობლივი ამოხსნა გვაძლევს ცენტრიდანული ტუმბოს სარეჟიმო პარამეტრებს $(\mathbf{Q}_{\text{Sng}}, \mathbf{H}_{\text{Sng}})$, მუშაობის მაქსიმალური მქც-ით და მილსადენის მოცემული პარამეტრებით:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{Q}_{\text{Sng}} = \frac{-\mathbf{d}_1 \mathbf{Q}_{\eta \max}^2 - \sqrt{4\mathbf{d}_0 \mathbf{H}_{\eta \max} \mathbf{Q}_{\eta \max}^2 + \mathbf{d}_1^2 \mathbf{Q}_{\eta \max}^4 - 4\mathbf{d}_0 \mathbf{d}_2 \mathbf{Q}_{\eta \max}^4}}{2(-\mathbf{H}_{\eta \max} + \mathbf{d}_2 \mathbf{Q}_{\eta \max}^2)}; \\ \mathbf{H}_{\text{Sng}} = \mathbf{d}_0 + \frac{\mathbf{d}_0 \mathbf{d}_2 \mathbf{H}_{\eta \max} \mathbf{Q}_{\eta \max}^2}{(-\mathbf{H}_{\eta \max} + \mathbf{d}_2 \mathbf{Q}_{\eta \max}^2)^2} + \frac{\mathbf{d}_1^2 \mathbf{d}_2 \mathbf{Q}_{\eta \max}^4}{2(-\mathbf{H}_{\eta \max} + \mathbf{d}_2 \mathbf{Q}_{\eta \max}^2)^2} - \\ - \frac{\mathbf{d}_0 \mathbf{d}_2^2 \mathbf{Q}_{\eta \max}^4}{(-\mathbf{H}_{\eta \max} + \mathbf{d}_2 \mathbf{Q}_{\eta \max}^2)^2} - \frac{\mathbf{d}_1^2 \mathbf{Q}_{\eta \max}^2}{2(-\mathbf{H}_{\eta \max} + \mathbf{d}_2 \mathbf{Q}_{\eta \max}^2)} + \\ + \frac{\mathbf{d}_1 \mathbf{d}_2 \mathbf{Q}_{\eta \max}^2 \sqrt{4\mathbf{d}_0 \mathbf{H}_{\eta \max} \mathbf{Q}_{\eta \max}^2 + \mathbf{d}_1^2 \mathbf{Q}_{\eta \max}^4 - 4\mathbf{d}_0 \mathbf{d}_2 \mathbf{Q}_{\eta \max}^4}}{2(-\mathbf{H}_{\eta \max} + \mathbf{d}_2 \mathbf{Q}_{\eta \max}^2)^2} - \\ - \frac{\mathbf{d}_1 \sqrt{4\mathbf{d}_0 \mathbf{H}_{\eta \max} \mathbf{Q}_{\eta \max}^2 + \mathbf{d}_1^2 \mathbf{Q}_{\eta \max}^4 - 4\mathbf{d}_0 \mathbf{d}_2 \mathbf{Q}_{\eta \max}^4}}{2(-\mathbf{H}_{\eta \max} + \mathbf{d}_2 \mathbf{Q}_{\eta \max}^2)}. \end{array} \right. \quad (49)$$

მაგისტრალური მილსადენების ჰიდრავლიკური გაანგარიშების მათემატიკური აღწერა აგებულია დაწნევების ბალანსის განტოლებით (40), თუ ამ შემთხვევაში კოეფიციენტი \mathbf{d}_1 შეიძლება უგულვებელვყოთ. მაშინ გამასახლება (48), და შესაბამისად, $\mathbf{d}_0, \mathbf{d}_2$ კოეფიციენტების განსაზღვრის პროცედურა ძალზე მარტივდება:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{Q}_{\text{Sng}} = \mathbf{Q}_{\eta \max} \sqrt{\frac{\mathbf{d}_0}{\mathbf{H}_{\eta \max} - \mathbf{d}_2 \mathbf{Q}_{\eta \max}^2}}; \\ \mathbf{H}_{\text{Sng}} = \frac{\mathbf{d}_0 \mathbf{H}_{\eta \max}}{\mathbf{H}_{\eta \max} - \mathbf{d}_2 \mathbf{Q}_{\eta \max}^2}. \end{array} \right. \quad (50)$$

სადაც $\mathbf{d}_0 = \Delta z + \mathbf{h}_{\text{Nar}} - \mathbf{h}_n$ განისაზღვრება გეოდეზიური ვარდნილით, შეტბორვით სადგურის წინ და ნარჩენი დაწნევით უბნის ბოლოში; $\mathbf{d}_2 = 1,02f\mathbf{Q}^{-m}\mathbf{L}_{\text{Sng}}$ - განისაზღვრება ერთეულობვანი ხარჯის ჰიდრავლიკური ქანობით, ხარჯით კონკრეტული ჰიდრავლიკური რეჟიმის და მილსადენის უბნის საანგარიშო სიგრძით.

დამოკიდებულება (42)-დან გამოვსახოთ ბრუნვის სიხშირე:

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}_0 \frac{-\mathbf{a}_1 \mathbf{Q}_{\text{Sng}} + \sqrt{\mathbf{Q}_{\text{Sng}}^{22} (\mathbf{a}_1^2 - 4\mathbf{a}_0 \mathbf{a}_2) + 4\mathbf{a}_0 \mathbf{H}_{\text{Sng}}}}{2\mathbf{a}_0}. \quad (51)$$

შევატანოთ განტოლება (51)-ში სიდიდეები $(\mathbf{Q}_{\text{Sng}}, \mathbf{H}_{\text{Sng}})$ და ამოვხსნათ ცენტრიდანული ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირე, რომელიც მილსადენის მოცემული მახასიათებლებით და გადასატუმბი პროდუქტის თვისებით იმუშავებს მაქსიმალური მქც-ით.

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{n}_0 \sqrt{\mathbf{d}_0} \left(-\mathbf{a}_1 \mathbf{Q}_{\text{Sng}} + \sqrt{\mathbf{Q}_{\text{Sng}}^{22} (\mathbf{a}_1^2 - 4\mathbf{a}_0 \mathbf{a}_2) + 4\mathbf{a}_0 \mathbf{H}_{\text{Sng}}} \right)}{2\mathbf{a}_0 \sqrt{\mathbf{H}_{\eta \max} - \mathbf{d}_2 \mathbf{Q}_{\eta \max}^2}}. \quad (52)$$

თუ ვიყენებთ ცენტრიდანულ ტუმბოებს, მიზანშეწონილია გამოვიყენოთ მახასიათებელი $(\mathbf{H} - \mathbf{Q})$ (43). მნიშვნელოვანია რომ გასათვალისწინებელია მოცემული ხარჯის და აუცილებელი დაწნევის შენარჩუნება შემდეგ სათავო სადგურთან. ამ შემთხვევაში, ცენტრიდანული ტუმბოების ჯამური სადაწნეო მახასიათებელი წარმოადგენს სადგურის მახასიათებელს, ცენტრიდანული ტუმბოების მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის ცვლილებისას და გამოსახავს შემდეგ გამოსახულებას:

$$\mathbf{H} = \mathbf{A} \left(\frac{\mathbf{n}(\omega)}{\mathbf{n}(\omega_0)} \right)^2 - \mathbf{B} \mathbf{Q}^2, \quad (53)$$

სადაც \mathbf{A} და \mathbf{B} არის სადგურის მახასიათებლის კოეფიციენტები, რომლებიც წარმოადგენს მაგისტრალური სატუმბი აგრეგატის ცენტრიდანული ტუმბოების სადაწნეო მახასიათებლებს, სატუმბი სადგურის შემადგენლობაში.

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \sum_{i=1}^s \mathbf{a}_i; \\ \mathbf{B} = \sum_{i=1}^s \mathbf{b}_i. \end{cases}$$

ბრუნვის სიხშირე განისაზღვრება (53)-დან:

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}_0 \sqrt{\frac{\mathbf{H}_{\text{Sng}} + \mathbf{b} \mathbf{Q}_{\text{Sng}}^2}{\mathbf{A}}}. \quad (54)$$

შევატანოთ მუშა პარამეტრი (50) და (53)-დან, მივიღებთ:

$$n = n_0 \sqrt{\frac{d_0(H_{\eta\max} + BQ_{\eta\max}^2)}{A(H_{\eta\max} - d_2 Q_{\eta\max}^2)}} \quad (57)$$

მიღებული დამოკიდებულება უზრუნველყოფს სატუმბო სადგურის მუშაობას მაქსიმალური მქკ-ით, მილსადენის უბნის მახასიათებლით და გადასატუმბი ნავთობის თვისებებით. ბრუნვის სიხშირის მნიშვნელობა გამოსახულება (57)-დან, გვაძლევს მოცემულ პარამეტრად ისეთი მოწყობილობისათვის, რომელიც უზრუნველყოფს ცენტრიდანული ტუმბოების მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირეს, მაქსიმალური მქკ-ით. იგი შეიძლება განისაზღვროს როგორც პროექტირების სტადიაზე, ისევე ექსპლუატაციისას.

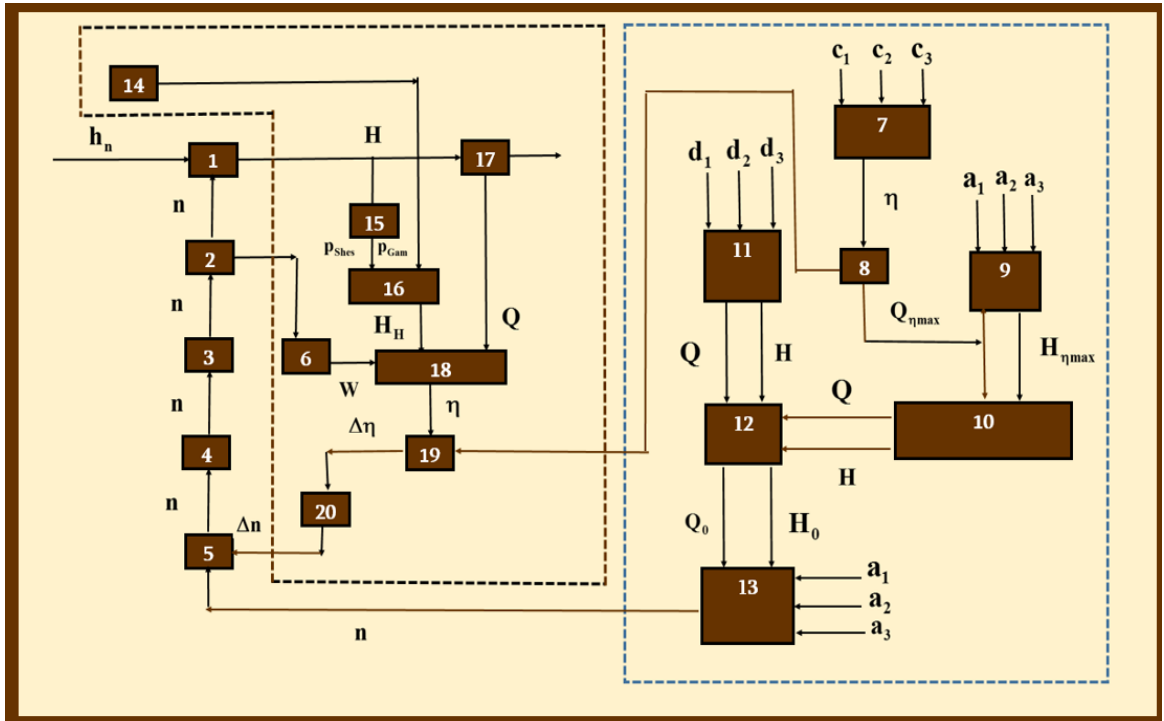
3.3. ცენტრიდანული ტუმბოს მარგი ქმედების კოეფიციენტის მაქსიმიზაცია

3.3.1. ცენტრიდანული სატუმბო აგრეგატის მართვის სისტემა, მარგი ქმედების კოეფიციენტის მაქსიმიზაციის გათვალისწინებით

მილსადენების სისტემით პროდუქტის გადატუმბვის პროცესის მართვას რეალიზაციასას, შემოთავაზებულია ცენტრიდანული სატუმბო აგრეგატის მართვის სისტემა, ცენტრიდანული ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის რეგულირების მეთოდი და ცენტრიდანული ტუმბოს მქკ-ის მაქსიმიზაციის გათვალისწინება. ცენტრიდანული ტუმბოს ამძრავად გამოიყენება სიხშირით-რეგულირებადი ელექტროძრავა. მუშაობის პრინციპი შემუშავებულია ცენტრიდანული ტუმბოს მაქსიმალური მქკ-ის წირის გათვალისწინებით. პრინციპიალური ბლოკ-სქემა ნაჩვენებია ნახ. 50-ზე.

რეგულირება ხორციელდება ცენტრიდანული ტუმბოს მქკ-ის ცვლილებების გათვალისწინებით. მუშაობის პრინციპი შემდეგია: ტუმბოს მქკ-ის მახასიათებლების კოეფიციენტები c_1, c_2, c_3 , მიეწოდება ოპერატორის

მიერ აპროქსიმაციის ბლოკზე (7) და ფორმირდება მახასიათებლის სიგნალი ფორმულა (11)-ის შესაბამისად, რომელიც მიეწოდება მაქსიმალურ მქკ-ის მნიშვნელობას გამომთვლელში (8)-ს, და აქ გამოითვლება მაქსიმალური მწარმოებლობა $Q_{\eta_{max}}$, განტოლებების სისტემა (8)-ის მიხედვით.



ნახ. 50. ცენტრიდანული სატუმბი აგრეგატის მართვის პრინციპიული ბლოკ-სქემა

გამომთვლელ (8)-ში ფორმირდება ტუმბოს მაქსიმალური მქკ-ის სიგნალი და მიეწოდება ტუმბოს მახასიათებლის შესაბამისი სადაწნეო მახასიათებლისთვის აპროქსიმაციის ბლოკზე (9), ხოლო შემდეგ ბლოკ (10)-ში (2.8) ფორმულით განისაზღვრება ტუმბოს მაქსიმალური მქკ-ის წირის განსაზღვრა. აპროქსიმაციის ბლოკი (8) განსაზღვრავს η_{max} -ს ფორმულით (11).

ტუმბოს მაქსიმალური მქკ-ის შედარების ელემენტით (9), ხდება ტუმბოს მქკ-ის მნიშვნელობების განსაზღვრა. (9)-ში, ტუმბოს სადაწნეო მახასიათებლის აპროქსიმაციის ბლოკში, შეყავთ სადაწნეო მახასიათებლის a_1, a_2, a_3 კოეფიციენტების მნიშვნელობები, სადაც ფორმირდება ტუმბოს

სადაწნეო მახასიათებლი და განისაზღვრება ტუმბოს მაქსიმალური მქკ-ის $H_{\eta_{max}}$. დაწნევის სიგნალი მიეწოდება ტუმბოს მაქსიმალური მქკ-ის წირს (10)-ში. აპროქსიმაციის ბლოკში (11)-ში შეყავთ მილსადენის მახასიათებლის კოეფიციენტების d_1, d_2, d_3 -ს მნიშვნელობები და ფორმირდება მილსადენის განტოლება (48).

η_{max} -ს წირის სიგნალი (10)-დან და აპროქსიმაციის ბლოკი (11)-დან, მილსადენის მახასიათებლის შესაბამისად მიეწოდება ამომხსნელი (12), სადაც ხდება მილსადენის და ტუმბოს და მქკ-ის მაქსიმალური წირის მახასიათებლების ამოხსნა. მიღებული მწარმოებლობა Q_0 და დაწნევა H_0 -ის შედეგად ფორმირდება სიგნალი მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის გამოთვლის ბლოკზე (13). აქ განისაზღვრება მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირე, რომელიც შეესაბამება ტუმბოს მქკ-ის შესაბამ მაქსიმალურ მნიშვნელობას (51). გამოთვლილი მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის ბლოკი (13)-ს საშუალებით ფორმირდება ტუმბოს სიხშირე და მიეწოდება შედარებელს (5). აქვე, ამ ბლოკში მიეწოდება სადაწნეო მახასიათებლის კოეფიციენტები a_1, a_2, a_3 .

ავტომატური კორექციის ბლოკი (14) მუშაობს შემდეგნაირად: გადამწოდებზე (14) და (15) მიეწოდება სიგნალები P_{Shes} და P_{Gam} ტუმბოს დაწნევის განსაზღვრის ბლოკს (16), სადაც მიიღება სიგნალი H_H და მიეწოდება ტუმბოს მუშა მქკ-ის განსაზღვრის ბლოკში (18). ხარჯის გამზომი მოწყობილობა (17) გვამღევს სიგნალს Q -ს, ტუმბოს მქკ-ის გასაზღვრისათვის (18). იგივე ბლოკზე მიეწოდება ელექტროძრავის მოხმარებული სიმძლავრის ვატმეტრის სიგნალი (6). სიგნალები გამომთვლელში (8), η_{max} -ს სახით და ტუმბოს მუშა მქკ-ის განსაზღვრის ბლოკი (18), მიეწოდება შემდარებელს (19)-ს მაქსიმალურ მქკ-ს, სადაც ფორმირდება სიგნალი $\Delta\eta$ და შემდეგ მიეწოდება სიგნალს გარდაქმნელს (20). ამავე ბლოკში ფორმირდება მუშა თვლის ბრუნვის კორექტირებული სიხშირე Δn , და მიეწოდება სიხშირეების შემდარებლის (5)-ს, სიხშირეების სიდიდეების შეასდარებლად.

სიხშირეების შედარების ელემენტი (5) ფორმირებს მუშა თვლის ბრუნვის მუშა სიხშირეს სიგნალს, რომელიც მიეწოდება სიხშირის ავტომატური რეგულირების გარდაქმნელს (4), სადაც ფორმირდება გარდაქმნის სიხშირის სიგნალი (3). აღნიშნული სიგნალი მიეწოდება ელექტროძრავას, რომელიც მექანიკურად მიერთებულია ტუმბოსთან (1).

შემოთავაზებული ბლოკ-სქემის რეალიზაციის მთავარი პრობლემა მდგომარეობს იმაში, რომ კორექტირება მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირე დამოკიდებულება ტუმბოს მქკ-ის ცვლილებაზე $\Delta n = f(\Delta \eta)$, $\eta \rightarrow \eta_{\max}$. ასეთი კორექტირება აუცილებელია ტუმბოს მაქსიმალური მქკ-ის მნიშვნელობის დონისათვის. ამიტომ, კონკრეტული ექსპლუატაციისას, აუცილებელია აღნიშნული ურთიერთკავშირის დადგენა.

პირველ მიახლოებაში, შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ $\Delta n = f(\Delta \eta)$ დამოკიდებულება ტოლია:

$$\Delta n = k \Delta \eta, \quad (58)$$

სადაც k არის პროპორციულობის კოეფიციენტი, რომელიც განისაზღვრება კონკრეტული ექსპლუატაციის პირობების შესაბამისად.

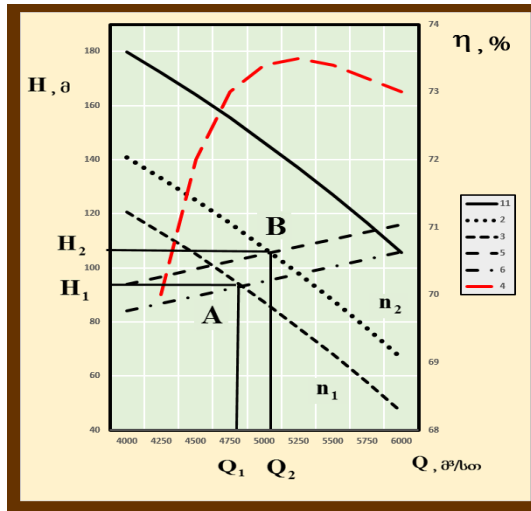
მაგალითისათვის, განვიხილოთ სატუმბო აგრეგატის მუშაობის საწყისი პირობების მქონე რეჟიმი. კერძოდ ხდება რეგულირება სადაწნეო მახასიათებლის და ბრუნვის სიხშირის გადაკვეთის ჰიდრავლიკურ უბნის მახასიათებელთან, აგრეგატის მაქსიმალური მქკ-ის (წერტილი A, ნახ. 52). შემდგომში ხდება გადასატუმბო პროდუქტის კინემატიკური სიბლანტის ზრდა 20-დან 40 მმ²/წმ-მდე და შესაბამისი ფაქტორები (ცხრილი 14).

მოდელი საშუალებას გვაძლევს იტერაციულად განვსაზღვროთ პროპორციულობის კოეფიციენტი დამოკიდებულებაში $\Delta n = f(\Delta \eta)$, რომელიც ტოლია $k = 518$.

ცხრილი 14. შესაბამისი ფაქტორების მოცემული სიდიდეების მნიშვნელობები და გაანგარიშების შედეგები

პარამეტრები	სიდიდე	
ხარჯი $Q_{\eta_{max}}$, ტუმბოს მაქსიმალური მარგი ქმედების კოეფიციენტისა და ნომინალური სიხშირისას მ ³ /წმ (მ ³ /სთ)	1,84 (6652)	
დაწნევა $H_{\eta_{max}}$, ტუმბოს მაქსიმალური მარგი ქმედებისას კოეფიციენტისას, მ	212	
ტუმბოს მაქსიმალური მარგი ქმედებისას კოეფიციენტი η_{max} , %	88,14	
ჰიდრავლიკური მახასიათებლის და ტუმბოს მაქსიმალური მარგი ქმედებისას კოეფიციენტის წირის გადაკვეთის ხარჯის წერტილი Q_0 , მ ³ /წმ (მ ³ /სთ)	1,56 (5616)	
ჰიდრავლიკური მახასიათებლის და ტუმბოს მაქსიმალური მარგი ქმედებისას კოეფიციენტის წირის გადაკვეთის დაწნევის წერტილი H_0 , მ	156,4	
გადასატუმბი პროდუქტის სიმკვრივე ρ , კგ/მ ³	850	
რეჟიმის ნომერი	1	2
ფაქტიური ხარჯი Q , მ ³ /წმ (მ ³ /სთ)	1,56 (5616)	1,63 (5875)
ტუმბოს განვითარებული დაწნევა P_{Dif} , მპა	1,236	1,259
ცენტრიდანული ტუმბოს სრული სიმძლავრე N , კვტ	2898	2860
გადასატუმბი პროდუქტის კინემატიკური სილანტე $v \cdot 10^{-6}$ მ ² /წმ	29	40
ტუმბოს მარგი ქმედების კოეფიციენტისა და ოპტიმალურ შორის აბსოლუტური გადახრა $\Delta\eta$, %	14,71	
ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის ფაქტიური სიხშირე n , ბრ/წთ	2578	2654
ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის რეგულირებული სიხშირე ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის ფაქტიური სიხშირე Δn , ბრ/წთ	76	

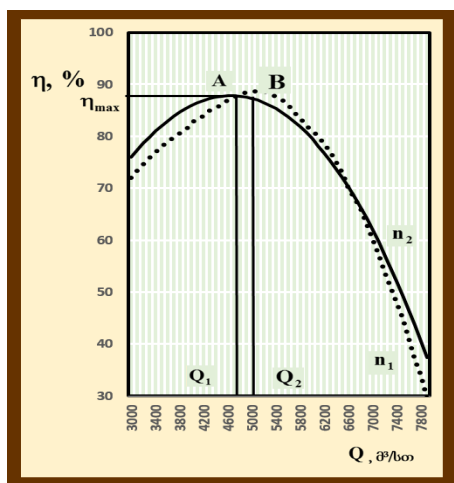
მოდელირების პროცესის შედეგად გადასატუმბი პროდუქტის სიბლანტის ცვლილებისას სისტემაში „ტუმბო-მილსადენი“ მიიღება ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის კორექტირებული სიდიდე, რომელიც დამოკიდებულია ტუმბოს ფაქტიური მქკ-ის ცვლილებაზე. ტუმბოს მუშა თვლის სიხშირის კორექტირებული სიდიდე გვამღევს $\Delta n = 76$ ბრ/წთ, რაც შედარებით ოპტიმალური რეჟიმისათვის იქნება 2,95%. ნახ. 51 და 52-ზე წარმოდგენილია ტუმბოს შესაბამისად სადაწნეო მილსადენის და მქკ-ის ერთობლივი მახასიათებლები. ერთობლივი მახასიათებლების თანახმად, წერტილებში **A** და **B**-ში მიიღება მუშაობის რეჟიმს ტუმბოს მაქსიმალური მქკ ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირეებს $n_1 = 2578$ ბრ/წთ და $n_2 = 2654$ ბრ/წთ.



ნახ. 51. სატუმბი აგრეგატის და მილსადენის უბნის ერთობლივი მახასიათებლები:
 1. მილსადენის უბნის ჰიდრავლიკური მახასიათებელი; 2. ტუმბოს მქკ-ის წირი;
 3. სადაწნეო საწყისი მახასიათებელი HM 7000-210, როდესაც $n = 3000$ ბრ/წთ;
 4. HM 7000-210 ტუმბოს სადაწნეო მახასიათებელი, როდესაც $n = 2578$ ბრ/წთ;
 5. HM 7000-210 ტუმბოს სადაწნეო მახასიათებელი, როდესაც $n = 2654$ ბრ/წთ;
 6. მილსადენის უბნის ჰიდრავლიკური მახასიათებლის პროდუქტის სიბლანტის ცვლილებისას

3.3.2. ცენტრიდანული სატუმბი აგრეგატის მართვის სისტემა, მილსადენის მახასიათებლის სიმრუდის ცვლილებით

ტუმბოს მქკ-ის და სადაწნეო მახასიათებლების კოეფიციენტების ავტომატური განსაზღვრა საპასპორტო მნიშვნელობებით, ხდება რეგულირება მილსადენის მახასიათებლის სიმრუდის ცვლილებით. სისტემა მუშაობს შემდეგნაირად (ნახ. 53). ბლოკ (12)-ში ხდება ტუმბოს სარეჟიმო პარამეტრების ფორმირება და მიეწოდება ოპერატორის მიერ ტუმბოს მქკ-ის მახასიათებლის სიგნალები c_1, c_2, c_3 , სადაწნეო მახასიათებლის დავალების ბლოკი (10)--დან კოეფიციენტები a_1, a_2, a_3 , სადაც ფორმირდება ხარჯის $Q_{\eta \max}$ და დაწნევის $H_{\eta \max}$ -ს სიგნალები, ტუმბოს მაქსიმალური მქკ-ის სისტემის (2.7)-ის ფორმულებით.



ნახ. 52. ცენტრიდანული ტუმბოს მქკ-ის მახასიათებლები: 1. $n = 2578$ ბრ/წთ; 2. $n = 2654$ ბრ/წთ;

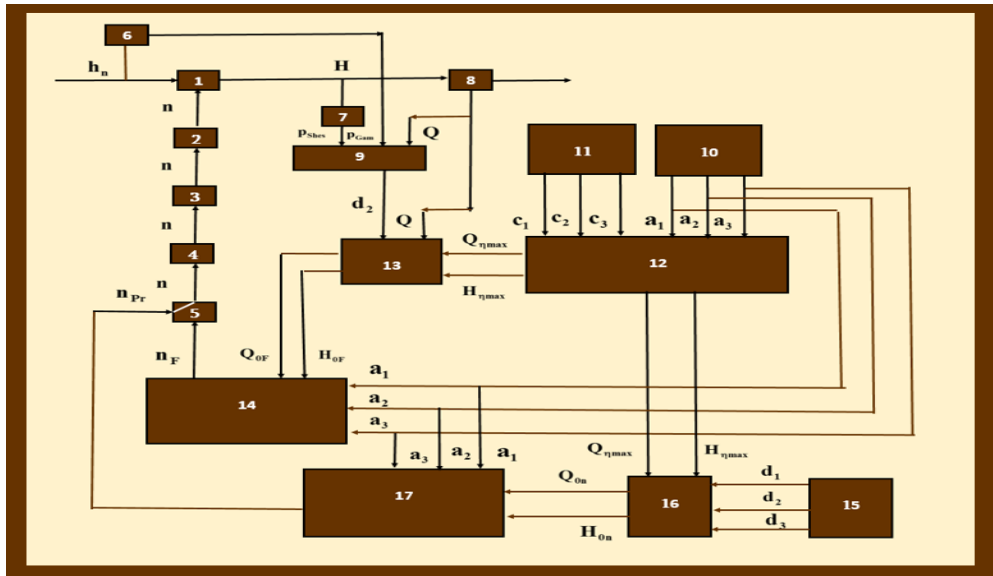
ტუმბოს ხარჯი $Q_{\eta_{\max}}$, დაწნევა $H_{\eta_{\max}}$ და მაქსიმალური მქკ-ის სიგნალები მიეწოდება სარეჟიმო ფაქტიური პარამეტრების განმსაზღვრელში (16) და მიიღება მილსადენის საპროექტო სარეჟიმო პარამეტრები. ტუმბოს შესასვლელის და გამოსასვლელის გადამწოდები (6) და (7) და სითხის ხარჯის აღრიცხვის მოწყობილობა გვაძლევს სიგნალს ტუმბოს შესასვლელის p_{shes} და გამოსასვლელის p_{gam} წნევებს, აგრეთვე Q ხარჯს, გამომთვლელი (9)-ის d_2 კოეფიციენტის განსაზღვრისათვის, რაც ასახავს მილსადენის მახასიათებლის ძირითად გამოსახულების (2.9)-ს ფორმას.

ბლოკი (9)-დან სიგნალი მიეწოდება ტუმბოს და მილსადენის ფაქტიურ სარეჟიმო პარამეტრს (13) ბლოკში d_2 -ს, რომლიდანაც მიეწოდება სითხის ხარჯის Q -ს აღრიცხვის მოწყობილობაზე (8). ტუმბოს და მილსადენის ფაქტიური სარეჟიმო პარამეტრების გამომთვლელში (13) ფორმირდება ტუმბოს ხარჯის Q_{0F} და დაწნევის H_{0F} ფაქტიური მნიშვნელობები:

$$Q_{0F} = Q_{\eta_{\max}} \sqrt{\frac{H_{0F}}{H_{\eta_{\max}}}}; \quad (59)$$

$$H_{0F} = d_0 + d_1 Q_{0F} + d_2 Q_{0F}^2, \quad (60)$$

სადაც $Q_{\eta_{max}}$ და $H_{\eta_{max}}$ შესაბამისად არის ხარჯი Q_{0F} (მ³/წმ) და დაწნევა H_{0F} (მ), ტუმბოს მაქსიმალურ მქკ-ის მნიშვნელობისას.



ნახ. 53. ცენტრიდანული სატუმბო აგრეგატის მართვის სისტემის ბლოკ-სქემა

ტუმბოს მუშაობის ფაქტიური რეჟიმის ხარჯისა $Q_{\eta_{max}}$ და $H_{\eta_{max}}$ დაწნევის სიგნალები მიეწოდება მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის გამომთვლელს n_{Faqt} (14), რომელიც უზრუნველყოფს ტუმბოს მუშაობას, მაქსიმალური მქკ-ით, სადაც აგრეთვე მიეწოდება სადაწნეო მახასიათებლის კოეფიციენტები a_1, a_2, a_3 , ბლოკიდან (10)-ში. მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის გამომთვლელი (14) აფორმირებს n_{Faqt} -ს შესასვლელ სიგნალს გადამრთველს (5)-ში. გამომთვლელ (16)-ზე ტუმბოს და მილსადენის სარეჟიმო პარამეტრების და მილსადენის მახასიათებლის კოეფიციენტების d_1, d_2, d_3 სიგნალები, მიეწოდება (15) ბლოკიდან მილსადენის საპროექტო მახასიათებლიდან. გამომთვლელი (15)-დან, ფორმირდება ტუმბოს საპროექტო სარეჟიმო პარამეტრები, ხარჯი Q_{0n} და დაწნევა H_{0n} , ფორმულებით (2.19) და (2.20). ტუმბოს Q_{0n} ხარჯის და H_{0n} დაწნევის სიგნალები მიეწოდება გამომთვლელის (17) ბლოკს, სადაც განისაზღვრება მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირე, მუშაობის საპროექტო სარეჟიმო

მაქსიმალური მქკ-ით. გარდა ამისა, ბლოკი (17) მიეწოდება სადაწნეო მახასიათებლის კოეფიციენტებს a_1, a_2, a_3 (დავალეების ბლოკი (10) ასახავს ტუმბოს სადაწნეო მახასიათებლის ფორმას).

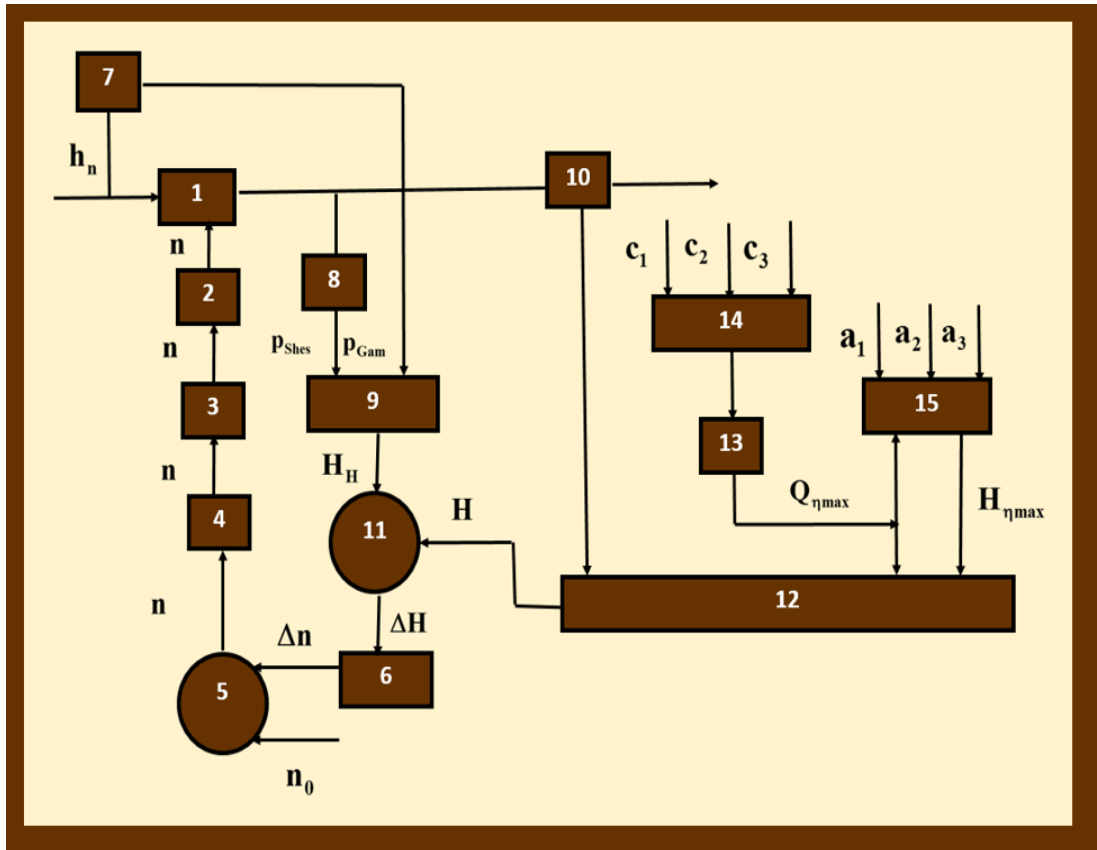
ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის საპროექტო მუშაობის რეჟიმის სიგნალი $n_{s a}$, მიეწოდება გადამრთველ (5) ბლოკში, სადაც შედარდება ტუმბოს n_{sap} , მუშა თვლის ბრუნვის ფაქტიურ სიხშირის n_{Faqt} - თან.

გადამრთველი (5) ბლოკში, ფორმირდება მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის შესასვლელი სიგნალი, მიეწოდება სისტემის სიხშირის ავტომატური რეგულირების გარდაქმნელში (4), სადაც ფორმირდება გარდაქმნილი სიხშირე (3). მიღებული სიგნალი მიეწოდება ელექტროძრავას (2), რომელიც მექანიკურად შეერთებულია ტუმბოსთან (1).

3.3.3. ცენტრიდანული სატუმბი აგრეგატის ოპტიმალური მართვის სისტემა, მილსადენში დაწნევის ცვლილებისას

შევიმუშავოთ ტუმბოს ოპტიმალური მართვის სისტემა, რომელიც ითავლისწინებს მუშაობის რეჟიმის რეგულირებას, მილსადენში დაწნევის ცვლილებისას.

ბლოკ-სქემა შემდეგია (ნახ. 54): აპროქსიმაციის ბლოკზე (14) მიეწოდება ტუმბოს მქკ-ის მახასიათებლების c_1, c_2, c_3 კოეფიციენტები, სადაც ფორმირდება ტუმბოს მქკ-ის მახასიათებლების სიგნალები საპასპორტო ბრუნვის სიხშირით, ფორმულით (11).



ნახ. 54. ცენტრიდანული სატუმბო აგრეგატის ოპტიმალური მართვის სისტემა

ტუმბოს მქც-ის მახასიათებლების სიგნალები მიეწოდება გამომთვლელზე (13), სადაც გამოითვლება ტუმბოს ხარჯი, მაქსიმალური მქც-ის $Q_{\eta\max}$ -ს მნიშვნელობა, სისტემა (2.7)-ის თანახმად. შემდეგ, ფორმირებული სიგნალი მიეწოდება ტუმბოს სადაწნეო მახასიათებელზე აპროქსიმაციის ბლოკზე (15) და ტუმბოს მაქსიმალური მქც-ის განსაზღვრული მახასიათებლის ბლოკზე (12). ტუმბოს სადაწნეო მახასიათებლის სადაწნეო მახასიათებელზე (15) მიეწოდება სადაწნეო მახასიათებლის კოეფიციენტების a_1, a_2, a_3 აპროქსიმაციის ბლოკზე, სადაც ფორმირდება ტუმბოს მახასიათებელი, ფორმულით (42), საპასპორტო ბრუნვის სიხშირისათვის.

შემდეგ გამოითვლება ტუმბოს დაწნევის სიგნალი მაქსიმალური მქც $H_{\eta\max}$, მიეწოდება რა ტუმბოს მაქსიმალური მქც-ის განსაზღვრული წირის დაწნევაზე (12), სადაც გამოითვლება ტუმბოს ხარჯის Q სიგნალი,

აღრიცხვის ხარჯის მოწყობილობით (10). წნევის გადამწოდი ტუმბოს შესასვლელზე (7) და გამოსასვლელზე (8), გვამლევს შესაბამისი წნევის სიგნალების \mathbf{p}_{Shes} და \mathbf{p}_{Gam} , დაწნევის განსაზღვრის (9) ბლოკში.

სიგნალი \mathbf{H}_H მიეწოდება ტუმბოს დაწნევის შედარების ელემენტზე (11), რომელიც კორექტირდება ტუმბოს დაწნევის მნიშვნელობა და ფორმირდება უთანხმოების სიგნალი $\Delta\mathbf{H}$, რომელიც მიეწოდება ავტომატური რეგულატორის ბლოკს (6). ავტომატური რეგულატორის ბლოკი (6) ფორმირებს ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირეს $\Delta\mathbf{n}$ -ს ფორმულით:

$$\Delta\mathbf{n} = \mathbf{k} \left(\mathbf{H}_H - \frac{\mathbf{H}_{\eta\max}}{\mathbf{Q}_{\eta\max}^2} \right), \quad (61)$$

სადაც \mathbf{k} არის ავტომატური რეგულატორის გაძლიერების კოეფიციენტი.

ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირეს კორექტორებული სიგნალი $\Delta\mathbf{n}$, მიეწოდება ამჯამებელ (5)-ზე მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირეს, სადაც აიჯამება მოცემულ სიგნალთან. ამჯამებელ (5)-ზე სიხშირე ფორმირდება ბრუნვის სიხშირის სიგნალს \mathbf{n} -ს და მიეწოდება ავტომატური რეგულატორის სისტემას (4). ავტომატური რეგულატორის სისტემა (4) ფორმირებს ბრუნვის სიხშირის ცვლილების \mathbf{n} -ს და მიეწოდება ელექტროძრავის როტორის ბრუნვის სიხშირის მნიშვნელობას (2) და მექანიკურად დაკავშირებულია ტუმბოსთან (1).

ტუმბოს მოწყობილობების განსხვავებული სპეციფიკური და ძირითადი მახასიათებლების გამოვლენის მართვის ალგორითმის რეალიზაციისათვის, მქკ-ის მაქსიმუმიზაციისას, მოვიყვანოთ შედარებითი ანალიზი (ცხრილი 15).

მოწყობილობების მოყვანილი პარამეტრების შერჩევისას, გამოიყენება გარკვეული ტექნიკური და ტექნოლოგიური პირობები.

ცხრილი 15. პროდუქტის გადატუმბვის ცენტრიდანული ტუმბოს მოწყობილობების კრებსითი მახასიათებლები

პარამეტრი	ცენტრიდანული სატუმბი აგრეგატის მართვის სისტემა	ცენტრიდანული სატუმბი აგრეგატის ავტომატური მართვის სისტემა	ცენტრიდანული სატუმბი აგრეგატის ოპტიმალური მართვის სისტემა
ცენტრიდანული ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის რეგულირების განსაკუთრებული რეგულირება	ცენტრიდანული ტუმბოს მარგი ქმედების კოეფიციენტის ცვლილების რეგულირება	უბნის სადაწნეო ჰიდრავლიკური მახასიათებლის რეგულირება	სისტემის „ტუმბომილსადენის“ დაწნევის ცვლილების რეგულირება
მუდმივი პარამეტრების შეყვანა	ოპერატორი ხელით შეყავს კოეფიციენტები $a_0, a_1, a_2, d_0, d_1, d_2, c_1, c_2, c_3$	კოეფიციენტების $a_0, a_1, a_2, d_0, d_1, d_2, c_1, c_2, c_3$ ავტომატური განსაზღვრა საპასპორტო კატალოგის და საპროექტო მნიშვნელობები	ოპერატორი ხელით შეყავს კოეფიციენტები $a_0, a_1, a_2, c_1, c_2, c_3$ და სი-ხშირე n_{Moc}
რეგულირების პრინციპი	ბრუნვის სიხშირის კორექტირებული მნიშვნელობა განსხვავებას მაქსიმალური და ფაქტური მარგი ქმედების კოეფიციენტი	ბრუნვის სიხშირის კორექტირებული მნიშვნელობა d_2 კოეფიციენტი, მილსადენის უბნის ფაქტიური სადაწნეო მახასიათებლი	ბრუნვის სიხშირის კორექტირებული მნიშვნელობა დამოკიდებული განსხვავებას შორის საანგარიშო და ფაქტიური დაწნევისას
გარე კავშირი ცენტრიდანული ტუმბოს და ჰიდრავლიკურ სისტემას შორის	ცენტრიდანული ტუმბოს ფაქტიური მარგი ქმედების კოეფიციენტის, ოპტიმალური ბრუნვის სიხშირის გათვალისწინება	ბრუნვის სიხშირის საპროექტო მნიშვნელობა ფორმირდება მილსადენის უბნის სადაწნეო მახასიათებლით, ბრუნვის სიხშირის მნიშვნელობის განგარიშება ხდება უკუკავშირი სადაწნეო უბანთან კოეფიციენტით d_2	ბრუნვის სიხშირის ოპტიმალურ გაანგარიშებაში გათვალისწინებულია ჰიდრავლიკური სისტემის დაწნევის გავლენა

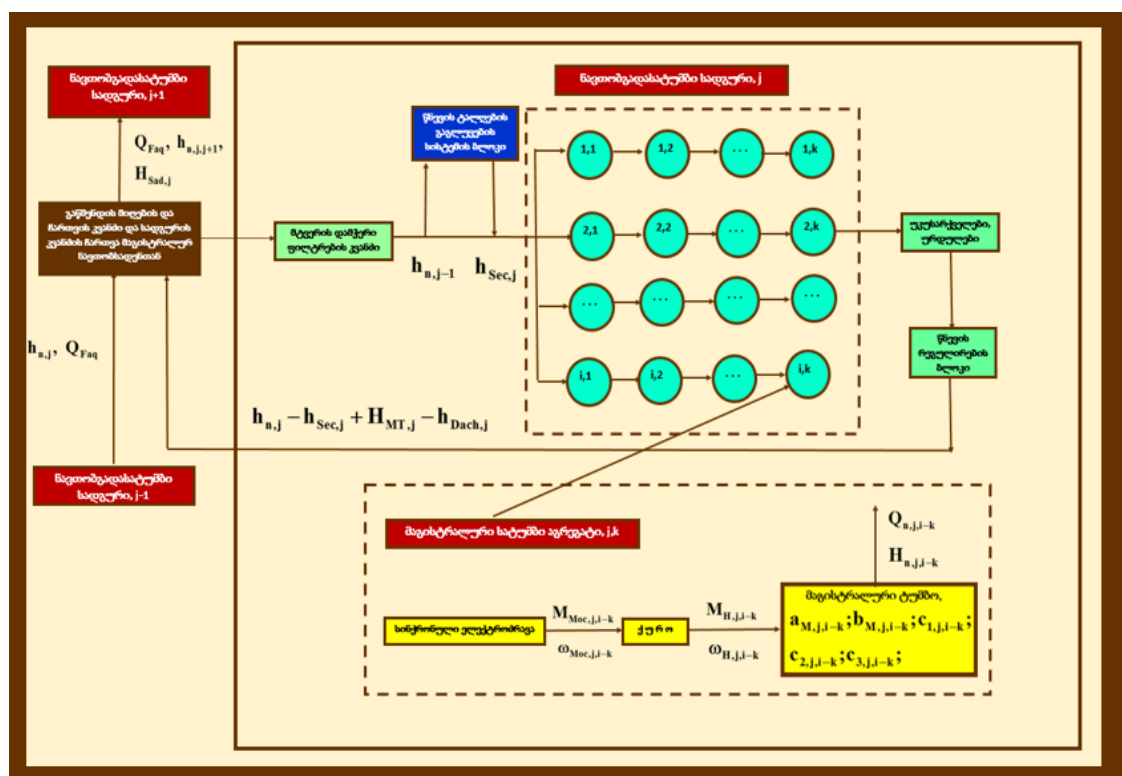
3.4. მაგისტრალური მილსადენის სისტემაში სატუმბი სადგურის მუშაობის რეჟიმის მათემატიკური მოდელის აგება, ბრუნვის სიხშირის რეგულირების მეთოდის გათვალისწინებით

მაგისტრალური მილსადენის სისტემაში სატუმბი სადგურის მუშაობის რეჟიმის მათემატიკური მოდელის ასაგებად, უნდა გამოვყოთ ისეთი ელემენტები და პროცესები, რომლებსაც გააჩნიათ სისტემის გავლენა. სატუმბი სადგურის შემავალ ობიექტებს გააჩნიათ მნიშვნელოვანი დანიშნულება, კერძოდ - სადგურის პირველი რიგის ე.წ. პირველ ჯგუფის ობიექტები, რომლებსაც გააჩნიათ ძირითადი (ტექნოლოგიური) დანიშნულება. ამ ჯგუფში გამოყოფილია ძირითადი და შემტბორავი სადგურები, ტექნოლოგიური მილსადენების ქსელი, დამჭერი ფილტრები, ურდულების და წნევის რეგულირების კვანძები. გარდა ამისა სატუმბ სადგურში განლაგებულია სატუმბი აგრეგატები, რომლებიც შედის ტუმბო, ამძრავი და შემაერთებელი ქურო. მოდელის მახასიათებლების ელემენტების განსაზღვრისას ხდება გათვალისწინება, მხოლოდ მაგისტრალური სატუმბი აგრეგატების ჰიდრომექანიკური პარამეტრებისათვის [87].

მაგისტრალური მილსადენის ახალი, ან ძველი სისტემების მოდერნიზაციისა, სავარადოა ხდებოდეს მაგისტრალური სატუმბი აგრეგატის დადგმა სიხშირითი რეგულირების ამძრავით. ამისთვის აუცილებელია ასეთი მაგისტრალური სატუმბი აგრეგატის ჰიდრომექანიკური მოდელის შემუშავება, არასტაციონარული და სტაციონარული მუშაობის რეჟიმებისას, რაც ითვალისწინებს ტუმბოების მუშა თვლების ბრუნვის სიხშირის რეგულირებას. სატუმბი სადგურის მუშაობა საექსპლუატაციო უბანზე ხასიათდება საკვანძო ჰიდრომექანიკური პარამეტრებით, კერძოდ: ტუმბოების მაგისტრალური სატუმბი აგრეგატის **Q** ხარჯი (მწარმოებლობა), დაწნევა **H**, სიმძლავრე **N**, მუშა თვლების ბრუნვის სიხშირე **n** და ტუმბოს მომენტი ლილვზე **M**, აგრეთვე

პროდუქტის მოძრაობის რეჟიმი და წნევის ტალღის შექმნა მაგისტრალური აგრეგატის გაშვებისა და გაჩერება ჩამკეტი-რეგულირებული არმატურით.

ნახ. 55-ზე წარმოდგენილია j -ური სატუმბი საშუალებდო სადგურის განზოგადებული სქემა, მილსადენის სისტემაში და ძირითადი ჰიდრომექანიკური პარამეტრების ჩვენებით. დაწნევის დანაკარგი მიღების, გამწმენდის და დიაგნოსტიკის შესასვლელ მილყელში, პირველი მაგისტრალურ სატუმბ აგრეგატში განზოგადებული მახასიათებლით $h_{Ses,j}$, რომელშიც შედის დანაკარგები აღნიშნულ უბანზე, ადგილობრივი წინააღმდეგები და დანაკარგები ფილტრში. იგი გამომსვლელი მილყელიდან აგრეგატამდე შედის $h_{Dac,j}$, რომელშიც შედის ზევით აღნიშნული დანაკარგები და დანაკარგი წნევის რეგულატორის ბლოკში. აღნიშნული ჯამური ჰიდრავლიკური დანაკარგები ითვალისწინებს მაგისტრალური მილსადენის დაწნევების ბალანსს.



ნახ. 55. j -ური განზოგადებული სატუმბი სადგური, $i - k$ მაგისტრალური სატუმბი აგრეგატებით

აღნიშნული მოდელის აგება უმჯობესია ჩატარდეს i -ური მაგისტრალური სატუმბი აგრეგატისათვის, j -ური სატუმბი საშუალო სადგურისათვის. ვთქვათ ერთ-ერთი მაგისტრალური სატუმბი აგრეგატი შეიცავს სინქრონულ ელექტროძრავას და ცენტრიდანულ ტუმბოს. სისტემის „სატუმბი საშუალო სადგური-მილსადენის“ სისტემის მუშაობის მათემატიკური მოდელი შედგება ფუნქციონალური დამოკიდებულების და განტოლებების მთელი რიგი.

1. სიხშირის გარდაქმნის განტოლება [88]. სინქრონული ძრავის გაშვება შეიძლება ხორციელდეს შემდეგი ხერხებით: ამაჩქარებელი ძრავის საშუალებით; სიხშირითი გაშვება, როდესაც ხდება კვება წყაროდან მდოვრედ რეგულირებული სიხშირით; ასინქრონული გაშვება [89].

2. სინქრონული ძრავას დინამიკური მახასიათლის განტოლება ასინქრონული გაშვებისას, რომელიც ითვალისწინებს ელექტრომექანიკურ პროცესებს გრაგნილებში [90].

3. ტუმბოს მუშა თვლის როტორის ბრუნვის განტოლება [91,92].

4. ცენტრიდანული ტუმბოს სადაწნეო მახასიათებლის განტოლება, მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირეს ცვლილების გათვალისწინებით $\mathbf{H} = \mathbf{f}(\mathbf{Q}, \omega_{\mathbf{H}})$ (5). აუცილებელია გადატუმბის ცენტრიდანული ტუმბოს ექსპლუატაციისას უნდა ვიცოდეთ, რომ რეალური მახასიათებელი დამოკიდებულია მილსადენში პროდუქტის მოძრაობის რეჟიმზე.

5. ცენტრიდანული ტუმბოს მქკ-ის მახასიათებლის განტოლება, მუშა თვლის როტორის ბრუნვის გათვალისწინებით $\eta = \mathbf{f}(\mathbf{Q}, \omega_{\mathbf{H}})$.

6. ცენტრიდანული ტუმბოს სიმძლავრის მახასიათებელი $N_{sr} = \mathbf{f}(\mathbf{Q}, \omega_{\mathbf{H}})$, კონსრუქციული პარამეტრების გათვალისწინებით განისაზღვრება:

$$N_{sr} = \mu g \frac{a \left(\frac{\omega_{\mathbf{H}}}{\omega_{\mathbf{H}0}} \right)^2 - b Q^2}{\left(c_1 + c_2 Q \frac{\omega_{\mathbf{H}0}}{\omega_{\mathbf{H}}} + c_3 \left(Q \frac{\omega_{\mathbf{H}0}}{\omega_{\mathbf{H}}} \right)^2 \right)}$$

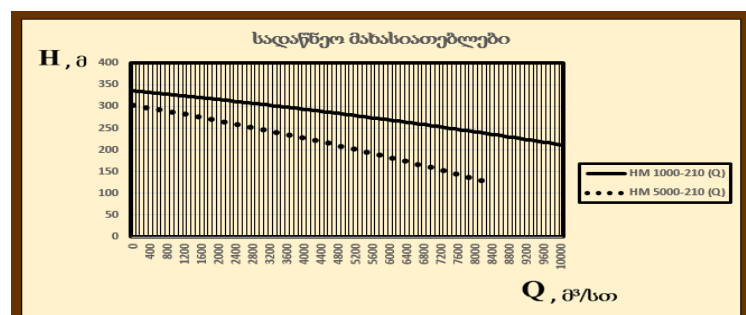
ავაგოთ ცენტრიდანული ტუმბოს მექანიკური მახასიათებლის ანალიზური გამოსახულება, რისთვისაც ცხრილ 16-ში მოყვანილია საწყისი მონაცემები (ნახ. 56,57,58).

7. მილსადენის უბნისათვის, სადაც მუშაობს სატუმბი სადგური, უნდა შევიყვანოთ დაწნევის ბალანსის განტოლება (40).

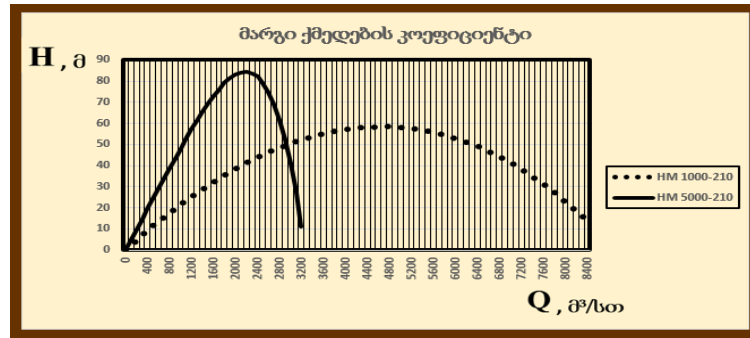
8. შექმნილი წნევის ტალღებთან დაკავშირებული არასტაციონარული პროცესების გათვალისწინება, უნდა მოხდეს მოძრაობის და უწყვეტობის განტოლებებით (15).

ცხრილი 16. ცენტრიდანულ ტუმბოს მექანიკური მახასიათებლების მოცემული მნიშვნელობების აგება

პარამეტრი	მნიშვნელობა	
	HM 1000-210	HM 5000-210
მაგისტრალური ტუმბო	HM 1000-210	HM 5000-210
მწარმოებლობა, მ ³ /სთ	10000	5000
დაწნევა, მ	210	210
მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირე, ბრ/წთ	3000	3000
a_0 , მ	336,14	302,86
a_1 , სთ/მ ²	-0,00943	-0,01664
a_2 , სთ ² /მ ⁵	$-2,977 \cdot 10^{-7}$	$-5,674 \cdot 10^{-7}$
c_1 , სთ/მ ⁵	0,02366	0,04845
c_2 , სთ ² /მ ⁶	$-2,106 \cdot 10^{-6}$	$-8,731 \cdot 10^{-6}$
c_3 , სთ ³ /მ ⁹	$-6,15 \cdot 10^{-11}$	$4,91 \cdot 10^{-10}$



ნახ. 56. სადაწნეო მახასიათებლის გრაფიკები ორი ტუმბოსათვის



ნახ. 57. მქკ-ის მახასიათებლის გრაფიკები ორი ტუმბოსათვის

ამგვარად, მიღებულია სრული ალგორითმი, რომლის საშუალებით შესაძლოა მაგისტრალური მილსადენის სისტემაში სატუმბო სადგურის მუშაობის რეჟიმის მათემატიკური მოდელის აგება, ბრუნვის სიხშირის რეგულირების მეთოდის გათვალისწინებით.

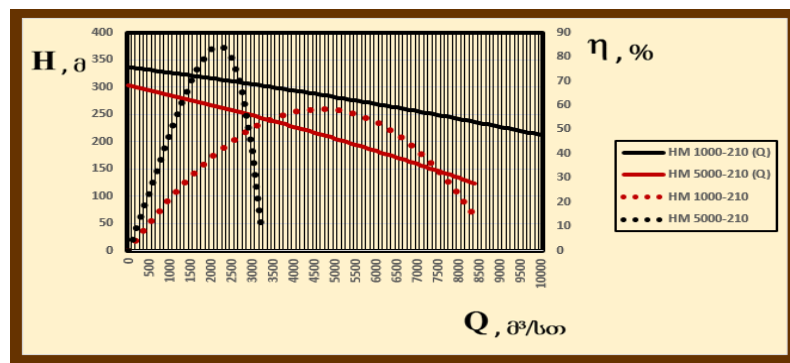
3.5. მაგისტრალური მილსადენის მუშაობის რეჟიმების რეგულირების მეთოდების გამოყენების ეფექტურობის ანალიზი

მაგისტრალური მილსადენის სისტემის მუშაობის რეჟიმების რეგულირების მეთოდები უნდა ეფუძნებოდეს დანახარჯების ანალიზზე, რომლის უმნიშვნელოვანესი ელემენტია ექსპლუატაციის ენერგოდანახარჯების პრინციპი. ამასთან დაკავშირებით, განვსაზღვროთ თვითეული მეთოდების კუთრი ენერგოდანახარჯების ერთეული მოცულობის ან მასის გადატუმბვის საკვანძო ფაქტორების ფუნქციონალური დამოკიდებულები.

კუთრი ენერგოდანახარჯების ფუნქცია ზოგადი სახით საფეხურებიანი რეგულირების დროს წარმოადგენს მრავალ ფუნქციონირების ფუნქციას $E_{Kut} = f[E_{Kut,i}(\mu, H_{M,jk}, Q, H_n, \eta_{Agr}, \eta_{Tum,Agr}), T_i, Q_i]$, სადაც T_i, Q_i და $E_{Kut,i}$ არის მუშაობის დრო, ხარჯი და i -ური სატუმბო სადგურის კუთრი ენერგოდანახარჯები, რომელიც ტოლია:

$$E_{Kut} = \frac{E_{Kut,1} T_1 Q_1 + E_{Kut,2} T_2 Q_2}{T_{Geg} Q_{Geg}} = \frac{E_{Kut,1} Q_1 (Q_2 - Q_{Geg}) + E_{Kut,2} Q_2 (Q_{Geg} - Q_1)}{Q_{Geg} (Q_2 - Q_1)}$$

სადაც T_2, Q_2 და $E_{Kut,2}$ არის მუშაობის დრო, ხარჯი და კუთრი ენერგოდანახარჯები. T_1, Q_1 და $E_{Kut,1}$ - მუშაობის დრო, ხარჯი და კუთრი ენერგოდანახარჯები ტუმბოების ნაწილის გამორთვამდე, ან მუშა თვლების დიდი დიამეტრებისას; T_{Geg} და Q_{Geg} - მილსადენის მუშაობის გეგმიური დრო და გეგმიური ხარჯი ერთ წელიწადში.

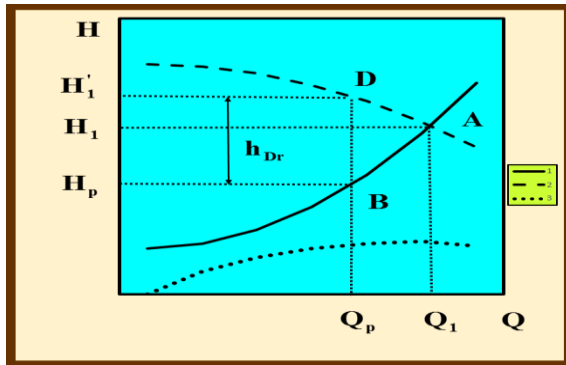


ნახ. 58. სადაწნო მახასიათებლის და მქკ-ის შეთავსებული მახასიათებლის გრაფიკები ორი ტუმბოსათვის

დროსელირების მეთოდი ეფუძნება სატუმბო სადგურის მაგისტრალური სატუმბო აგრეგატის განვითარებული დაწნევის ნაწილის შემცირება, სადგურის რეგულირების კვანძებში დადგმული წნევის რეგულატორების საშუალებით. ნახ. 59-ზე ნაჩვენებია დაწნევის ნაწილის დროსელირების ხორციელდება, როდესაც მუშა წერტილი მდგომარეობიდან A -დან, წაინაცვლება D წერტილში.

მეთოდის ეფექტურობა დროსელირებისას განისაზღვრება მქკ, რომელიც წარმოადგენს სასარგებლო გამოყენებული სიმძლავრის $\rho g H_p Q_p$ შეფარდებას, დახარჯულთან - $\rho g H'_p Q_p$. თუ შევკვეცავთ $\rho g Q_p$ -ს მივიღებთ

$$\eta_{Dr} = \frac{H_p}{H'_1} = \frac{H_p}{H_p + h_{Dr}} \quad (63)$$



ნახ. 59. სატუმბი სადგურის და მილსადენის ერთობლივი მახასიათებლები დროსელირების საშუალებით: 1. მილსადენის მახასიათებელი; 2. სადგურის დაწნევის ჯამური მახასიათებელი შეტბორვის გათვალისწინებით; 3. მაგისტრალური ტუმბოების მქც-ის $\eta - Q$ მახასიათებელი

დროსელირების კუთრი ენერგოდანახარჯების ეფექტურობა წარმოადგენს $E_{\text{Kut}} = f(\rho, H_{M,jk}, Q, H_n, \eta_{\text{Agr}}, \eta_{\text{Tum,Agr}}, \eta_{\text{Dr}})$. ამ მეთოდის თანახმად, დროსელირების დაწნევის დანახარჯი ეფუძნება დაწნევის ბალანსის განტოლებაზე, j -ური სატუმბი სადგურისთვის:

$$h_{\text{Dr}} = h_{n,j} + H_{\text{Sad},j} - 1,02Q_p^{2-m}L_p - \Delta z - h_{\text{Nar}}. \quad (64)$$

ამ შემთხვევაში, დროსელირების მქც ტოლია:

$$h_{\text{Dr}} = \frac{H_p}{H_1} = \frac{1,02fQ_p^{2-m}L_p + \Delta z + h_{\text{Nar}}}{h_{n,j} + H_{\text{Sad},j}}. \quad (65)$$

სატუმბი აგრეგატის ჯამური მქც განისაზღვრება:

$$\eta = \eta_H \eta_E \eta_{\text{Mec}} \eta_{\text{Dr}}. \quad (66)$$

სადაც $\eta_H, \eta_E, \eta_{\text{Mec}}$ არის მაგისტრალური ტუმბოს, ელექტროგადაცემის და ელექტროძრავის შესაბამისი მქც-ები.

მაგისტრალური სატუმბი ერთი აგრეგატის სიმძლავრე ტოლია:

$$N = \frac{\rho g (H_1' - h_n)}{m_H \eta}. \quad (67)$$

სადაც m_n არის სატუმბი სადგურში მომუშავე სატუმბი აგრეგატების რაოდენობა.

კუთრი ენერგოდანახარჯები (67)-ის თანახმად გვაქვს:

$$E_{\text{Kut}} = \frac{g(H_1' - h_n)}{m_H \eta}. \quad (68)$$

დროსელირება მილსადენის უბნის მახასიათებლის გათვალისწინებით, გვაქვს ცენტრიდანული ტუმბოს კონსტრუქციული პარამეტრების კუთრი ენერგოდანახარჯების საანგარიშო მნიშვნელობა:

$$E_{\text{Kut}} = \frac{g(A - BQ_p^{2-m})}{m_H(c_1 Q_p + c_2 Q_p^2 + c_3 Q_p^3)}. \quad (69)$$

განვიხილოთ შემწოვ ხაზში სითხის ნაწილის გადატანის მეთოდი, კერძოდ, (H_p, Q_p) მეთოდით ბაიპასირების მოცემული რეჟიმის უზრუნველყოფის პროცედურა (ნახ. 60). გადასატუმბი პროდუქტის ნაწილის გადატანა ხორციელდება ურდულის გახსნით ბაიპასის ხაზით, რომელიც აერთიანებს სადაწნეო ხაზს და შემწოვს. ამის გამო, ხდება წინააღმდეგობის შემცირება და მუშა წერტილი გადადის A -დან C -ში. ამ შემთხვევაში, პროდუქტი შედის მაგისტრალურ მილსადენში ხარჯით Q_p , ხოლო მაგისტრალურ ტუმბოს შესასვლელზე - $Q_2 = Q_B + Q_p$

იმისათვის, რომ განვსაზღვროთ ხარჯი Q_B , ამიტომ აუცილებელია მოვდოთ დაწნევა მაგისტრალური ტუმბოს შესასვლელზე, სადაწნეო მახასიათებლის განტოლების შესაბამისად და სატუმბო სადგურის წინ შეტბორვით:

$$H_p = h_n + A - B(Q_p + Q_B)^2. \quad (70)$$

ვიპოვოთ ეს განტოლება Q_B -ს მიმართ, მივიღებთ:

$$Q_B = \frac{\sqrt{A + h_n - H_p}}{B} - Q_p. \quad (71)$$

დაწნევის ვარდნილი სატუმბო სადგურის წინ, მიიღება შემდეგი გამოსახულებით:

ბაიპასირების მქვ განისაზღვრება სასარგებლოდ გამოყენებული სიმძლავრის $\rho g H_p Q_p$ შეფარდებით, დანახარჯთან $\rho g H_p Q_2$.

$$\eta_B = \frac{Q_p}{Q_2} = \frac{Q_p}{Q_p + Q_B}. \quad (73)$$

ბაიპასირების კუთრი ენერგოდანახარჯების ფუნქციის ფაქტორებით გათვალისწინებით, გვექნება $E_{Kut} = f(\rho, H_{M,jk}, Q, H_n, \eta_{MTA}, \eta_{Tum, Agr}, \eta_B)$.

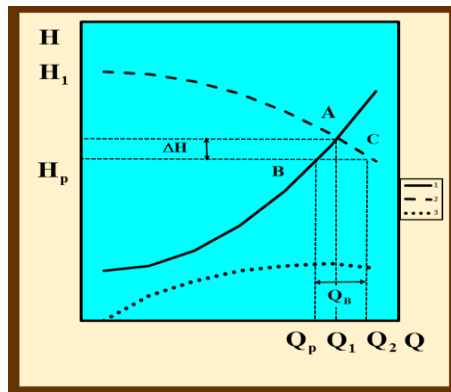
$$\Delta H = H_1 - H_p. \quad (72)$$

დაწნევის ბალანსის განტოლება შემდეგია:

$$h_{ni} + A - B(Q_p + Q_B)^{2-m} = 1,02fQ_p^{2-m}L_p + \Delta z + h_{Nar}.$$

გამოვსახოთ სატუმბი აგრეგატის ხარჯი:

$$Q_2 = Q_p + Q_B = 2^{-m} \sqrt{\frac{h_{ni} + A - 1,02fQ_p^{2-m}L_p - \Delta z - h_{Nar}}{B}}. \quad (74)$$



ნახ. 60. სატუმბი სადგურის და მილსადენის ერთობლივი მახასიათებლები დროსელირების საშუალებით: 1. მილსადენის მახასიათებელი; 2. სადგურის დაწნევის ჯამური მახასიათებელი შეტბორვის გათვალისწინებით; 3. მაგისტრალური ტუმბოების მქც-ის $\eta - Q$ მახასიათებელი

ბაიპასირების მქც ტოლია:

$$\eta = \eta_H \eta_E \eta_{Mec} \eta_B. \quad (75)$$

ტუმბოს მქც დამოკიდებულია მილსადენის პარამეტრებზე:

$$\begin{aligned} \eta = & c_1 2^{-m} \sqrt{\frac{h_{ni} + A - 1,02fQ_p^{2-m}L_p - \Delta z - h_{Nar}}{B}} + \\ & + c_2 \left(2^{-m} \sqrt{\frac{h_{ni} + A - 1,02fQ_p^{2-m}L_p - \Delta z - h_{Nar}}{B}} \right)^2 + \\ & + c_3 \left(2^{-m} \sqrt{\frac{h_{ni} + A - 1,02fQ_p^{2-m}L_p - \Delta z - h_{Nar}}{B}} \right)^3 \end{aligned} \quad (76)$$

მაგისტრალური სატუმბი ერთი აგრეგატის სიმძლავრე, მათი ერთტიპიური პირობებისას, განისაზღვრება:

$$N = \frac{g(H_p - h_n)Q_2}{m_H \eta}, \quad (77)$$

სადაც m_H არის სატუმბ სადგურზე მომუშავე სატუმბი აგრეგატების რაოდენობა.

შევიტანოთ ამ განტოლებაში, გამოსახულებიდან (77), მივიღებთ კუთრ ენერგოდანახარჯებს:

$$E_{Kut} = \frac{g(H_p - h_n)Q_2}{m_H \eta Q_p}. \quad (78)$$

გადატანილი ხარჯი Q_B შეიძლება უზრუნველყოთ ბაიპასირებით ტუმბოების ნაწილით, ან მთელი სადგურისათვის. მაგისტრალური ტუმბოს მქც-ის შემცირება არაცხადად ქმნის ხარჯს Q_B , რადგანაც სიდიდე η_H წერტილში C , შეიძლება იყოს მეტი ვიდრე A -ში.

მილსადენის უბნის მახასიათებლის გათვალისწინებით, ტუმბოს კონსტრუქციული პარამეტრებით კუთრი ენერგოდანახარჯით, ერთი სატუმბი აგრეგატისათვის ბაიპასირებისას, მივიღებთ საანგარიშო მწარმოებულობას:

$$E_{Kut} = \frac{g(1,02fQ_p^{2-m}L_p + \Delta z + h_{Nar} - h_{ni})^{2-m} \sqrt{\frac{h_{ni} + A - 1,02fQ_p^{2-m}L_p - \Delta z - h_{Nar}}{B}}}{m_H \eta_H \eta_E \eta_{meq} Q_p^{2-m} \sqrt{B}}. \quad (79)$$

(76)-ის გათვალისწინებით, (79)-ის გამარტივებისას, მივიღებთ:

$$E_{Kut} = \frac{g(1,02fQ_p^{2-m}L_p + \Delta z + h_{Nar} - h_{ni})}{m_H \eta_H \eta_E \eta_{meq} Q_p} \times \left(c_1 + c_2 \sqrt{\frac{h_{ni} + A - 1,02fQ_p^{2-m}L_p - \Delta z - h_{Nar}}{B}} + \left(+ c_3 \left(\sqrt{\frac{h_{ni} + A - 1,02fQ_p^{2-m}L_p - \Delta z - h_{Nar}}{B}} \right)^2 \right) \right)^{-1}. \quad (80)$$

მუშა თვლების ბრუნვის სიხშირის ცვლილების მეთოდი:

ამ მეთოდით, კუთრი ენერგოდანახარჯის ფუნქცია შემდეგია:
 $E_{Kut} = f(\rho, \mathbf{H}_{M,jk}(\omega_H), Q(\omega_H), \mathbf{H}_n, \eta_{MTA}(\omega_H), \eta_{Tum, Agr})$.

ცენტრიდანული ტუმბოს განსაკუთრებული განსაკუთრებლობის გათვალისწინებით, შევიტანოთ გამოსახულება (53), სატუმბი სადგურის ერთი სატუმბი აგრეგატის, ერთიპიური ტუმბოებით მიმდევრობით მიერთებული, მივიღებთ:

$$E_{Kut} = \frac{g \left(A \left(\frac{\omega_H}{\omega_{H0}} \right)^2 - B Q_p^2 \right)}{m_n \left(c_1 Q_p \frac{\omega_{n0}}{\omega_n} + c_2 \left(Q_p \frac{\omega_{n0}}{\omega_n} \right)^2 + c_3 \left(Q_p \frac{\omega_{n0}}{\omega_n} \right)^3 \right)}. \quad (81)$$

ამგვარად, შემუშავებულია მაგისტრალური სატუმბი აგრეგატის მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის ცვლილების მართვის მეთოდი, რომელიც უზრუნველყოფს სატუმბი სადგურის მაქსიმალურ მქკ-ის პროდუქტის გადასატუმბი მწარმოებლობის ცვლილებისას. მიღებული მართვის მეთოდი საშუალებას გვაძლევს რეალიზდეს სისტემის „ტუმბო-მილსადენის“ მუშაობის რეჟიმი, ტუმბოს მაქსიმალურ მქკ-ისპირობებში. შემოთავაზებულია მქკ-ის მაქსიმიზაციის პროცესის სამი ვარიანტი: ბრუნვის სიხშირის კორექტირება, მქკ-ისდა ჰიდრავლიკური მახასიათებლის ცვლილებით. მიღებულია სიმძლავრის ანალიზური დამოკიდებულება, კონსტრუქციული და საექსპლუატაციო პარამეტრებით, რომელიც აღწერს მექანიკურ მახასიათებელს, საკმაოდ დიდი სიზუსტით, რაც გამოიყენება გარდამავალი პროცესების საანგარიშო კუთრი დანახარჯებს, აგრეთვე გაშვების, გაჩერების და მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის ცვლილებით.

თავი 4. მაგისტრალური მილსადენის ენერგოდაზოგვის ლონისძიებები, ტურბომექანიზმების რეგულირებისას მახასიათებლებით

4.1. მაგისტრალური მილსადენით პროდუქტის ტრანსპორტირების ენერგოდაზოგვის ზოგადი ალგორითმი

სატუმბი სადგურების ეფექტური მუშაობის უზრუნველსაყოფად, საჭიროა მაგისტრალური ტუმბოების ექსპლუატაცია მოხდეს მხოლოდ მუშა ზონაში, ხოლო სხვა შესაძლო რეგულირების მეთოდების გამოყენება უნდა მოხდეს ეკონომიკური, კონკრეტულ ექსპლუატაციის პირობებისათვის.

სატუმბი სადგური, როგორც ობიექტი, შეიცავს ცენტრიდანულ მაგისტრალურ ტუმბოებს და ხასიათდება ტუმბოების $Q-H$ მახასიათებლების ფორმით განმსაზღვრელი ფაქტორებით A_0, A_1, A_2 (აქ Q - მწარმოებლობა, H - დაწნევა) და η -მქვ-ის მახასიათებლის ფორმის განმსაზღვრელი c_0, c_1, c_2 -კოეფიციენტით [93,94].

სატუმბი სადგურის მუშაობის ოპტიმალური მართვის ალგორითმის პარამეტრათ შეირჩევა მაგისტრალური სატუმბი დანადგარის მქვ, რომელიც განაპირობებს სადგურის მქვ-ს.

სატუმბი სადგურის მუშაობის რეჟიმების ანალიზური გაანგარიშებისას, მილსადენის ნებისმიერი ჰიდრაულიკური ხახუნის ზონებში $Q-H$ დამოკიდებულებით, შეიძლება მივიღოთ მეორე რიგის პოლინომი

$$H = b_0 + b_1 Q + b_2 Q^2, \quad (82)$$

სადაც b_0, b_1, b_2 - მუდმივი კოეფიციენტებია.

სატუმბი სადგურის ტუმბოების საპასპორტო $Q-H$ მახასიათებელს აპროქსიმაცია ხდება მეორე რიგის პოლინომით

$$H = A_0 + A_1 Q + A_2 Q^2,$$

სადაც არის ტუმბოების ტიპის, რაოდენობის და ჩართვის სქემის მუდმივი A_0, A_1, A_2 კოეფიციენტებით.

თუ მიერთებული ტუმბოები ერთტიპიანებია, მაშინ მიმდევრობითი მიერთების ჯამური მახასიათებელი, განსაზღვრება შემდეგი ფორმულებით:

$$\left\{ \begin{aligned} A_0 &= \sum_{i=1}^s a_{0i}; & A_1 &= \sum_{i=1}^s a_{1i} & A_2 &= \sum_{i=1}^s a_{2i}; \end{aligned} \right. \quad (83)$$

ტუმბოს როტორის ბრუნვის სიხშირის ცვლილებისას, მაგისტრალური ტუმბოების სატუმბი სადგურის $Q-H$ მახასიათებლის განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$H_{Pasp} = A_0 \left(\frac{n}{n_{Pasp}} \right)^2 + A_1 \frac{n}{n_{Pasp}} Q_{Pasp} + A_2 Q_{Pasp}^2. \quad (84)$$

მაგისტრალური ტუმბოს მქვ, შეიძლება განისაზღვროს გარაფიკულად, ან ანალიზურად და შემდგომი აპროქსიმაციის შემდეგ, გვეყენება მქვ-ის პოლინომი:

$$\eta = c_0 + c_1 Q + c_2 Q^2 + c_3 Q^3, \quad (85)$$

სადაც c_0, c_1, c_2, c_3 - მუდმივი კოეფიციენტები.

მაგისტრალური ტუმბოს მწარმოებლობა და დაწნევა, მაქსიმალური მქვ-ის, შეიძლება განისაზღვროს (3) განტოლებიდან და მოვახდინოთ გამოკვლევა ექსტრემუმზე.

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\eta}{dQ} &= 0 \Rightarrow \eta \rightarrow \max; \\ \frac{d\eta}{dQ} &= f' \left(\hat{n}_0 + c_1 Q = c_2 Q^2 + \hat{n}_3 Q^3 \right); \\ c_1 + 2c_2 Q_{\max} + 3c_3 Q_{\max}^2 &= 0; \\ Q_{\eta \max} &= \frac{-c_2 - \sqrt{c_2^2 - c_2^2 - 3c_1 c_3}}{3c_3}; \\ H_{\eta \max} &= A_0 + A_1 Q_{\eta \max} + A_2 Q_{\eta \max}^2. \end{aligned} \right.$$

(86)

თუ გამოვიყენებთ ტურბომანქანების მსგავსების კანონებს, შეიძლება ავაგოთ შერჩეული ტუმბოს მქვ-ის მაქსიმალური მნიშვნელობების წირი:

$$H = \frac{H_{\eta_{\max}}}{Q_{\eta_{\max}}^2} Q^2. \quad (87)$$

ერთობლივი ამოხსნა (82) და (87)-ის ამოხსნა გვაძლევს სატუმბო დანადგარის მუშაობის მაქსიმალური მქკ-ის სარეჟიმო პარამეტრების დადგენას.

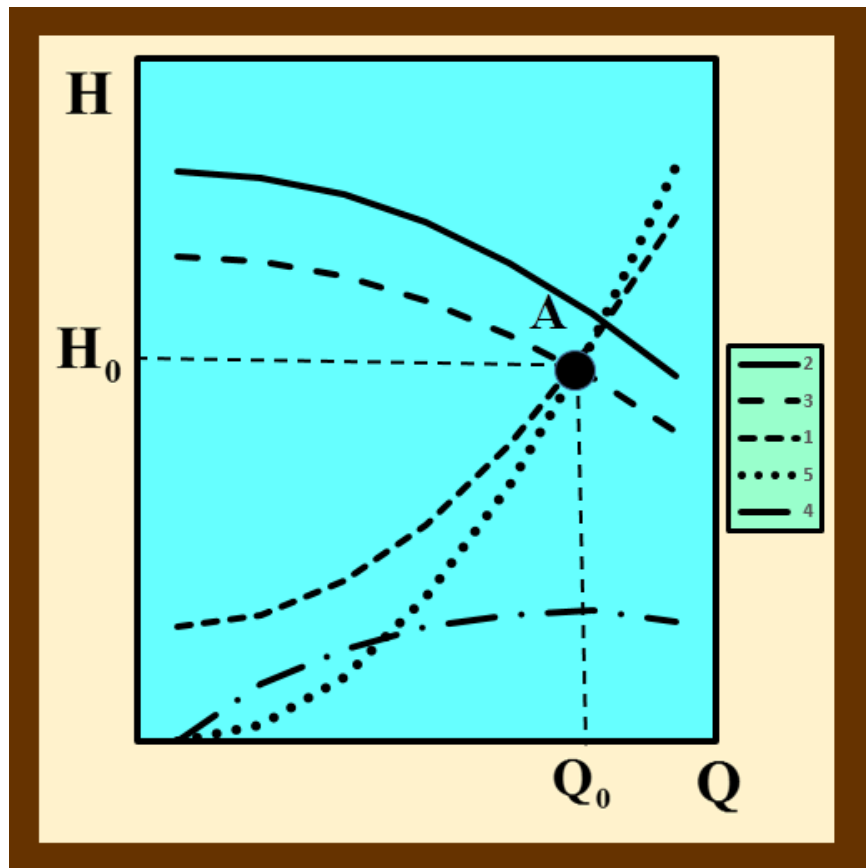
ექსპლუატაციის პროცესში, სატუმბო სადგურის მწარმოებულობა იცვლება, და შესაბამისად იცვლება კოეფიციენტები, ხოლო გრაფიკი მილსადენის მახასიათებელზე (ნახ. 61), გადავა ახალ მდგომარეობაში და მუშაობის ოპტიმალური რეჟიმი წანაიცვლება ახალ წერტილში. b_0, b_1, b_2 კოეფიციენტის მნიშვნელობები შეიძლება განვსაზღვროთ ექსპლუატაციის პროცესში და მიღებული შეცვლილი Q და H -ის მნიშვნელობების დამუშავება რეგრესიული ანალიზით. სატუმბო სადგური მაქსიმალური მქკ-ის მუშაობის უზრუნველყოფა, ამ შემთხვევაში ბრუნვის ფარდობითი სიხშირის დამოკიდებულება ((2)-ის შესაბამისად) მოიცემა შემდეგნაირად:

$$n_{\text{Pasp}} = \frac{-Q_0 A_1 + \sqrt{Q_0^2 (A_1^2 - 4A_0 A_1) + 4A_0 H_0}}{2A_0}. \quad (87)$$

სისტემის „მილსადენი-სატუმბოს სადგურის“ დაპროექტების და ექსპლუატაციის პროცესის ოპტიმალური მართვის ალგორითმი, შემდეგია (ნახ. 62):

- 1) განისაზღვრება სატუმბოს სადგურის მაქსიმალური n_{qk} -ის, საპასპორტო მახასიათებლის ან გამოცდის მონაცემების მიხედვით;
- 2) აიგება მაქსიმალური ტუმბოების მუშა რეჟიმების მქკ-ის წირი;
- 3) აიგება მილსადენის მახასიათებელი;
- 4) დგინდება მაქსიმალური მქკ-ის სატუმბო სადგურის მუშა რეჟიმი;
- 5) განისაზღვრება ტუმბოს ამ რეჟიმისათვის განისაზღვრება ლილვის ბრუნვის სიხშირე, ე.ი. ფორმირდება ავტომატური სისტემის ბრუნვის სიხშირის ცვლილების დავალება;

6) მუშაობის პროცესში, გაიზომება სატუმბოს სადგურის დაწნევა და მწარმოებლობა, ხდება მილსადენის მახასიათელის და ბრუნვის სიხშირის კორექტირების თვალთვალი.



ნახ. 61. მილსადენის და სატუმბო სადგურის ერთობლივი მახასიათებლები: 1. მილსადენის მახასიათებელი; 2. სადგურის მაგისტრალური ტუმბოების საპასპარტო მახასიათებელი; 3. სადგურის მაგისტრალური ტუმბოების მახასიათებელი, მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირეს ცვლილებისას; 4. სადგურის მაგისტრალური ტუმბოების $\eta - Q$ მახასიათებელი; 5. მაქსიმალური მქკ-ის წირი; Q_0 და H_0 - დაწნევა და მწარმოებლობა მაქსიმალური მქკ-ისას

ამგვარად, შემუშავებულია სატუმბო სადგურის მაქსიმალური მქკ-ის მქონე ალგორითმი, რომელიც უზრუნველყოფს გადასატუმბო პროდუქტის მწარმოებლობას; მოცემული ალგორითმი შეიძლება რეალიზდეს ისეთ სატუმბო სადგურზე, რომელსაც გაანია მართვადი ამძრავი; შემუშავებული მართვის ალგორითმის გამოყენება არა მხოლოდ ამცირებს ენერგოდანახარჯებს, არამედ აუმჯობესებს ტუმბოების ჩართვისა და

გამორთვის დინამიკურ მახასიათებლებს; შემუშავებული მართვის სისტემა ეხმარება სატუმბო სადგურის წნევის ტალღების გაგლუვების მუშაობის ეფექტურობას.

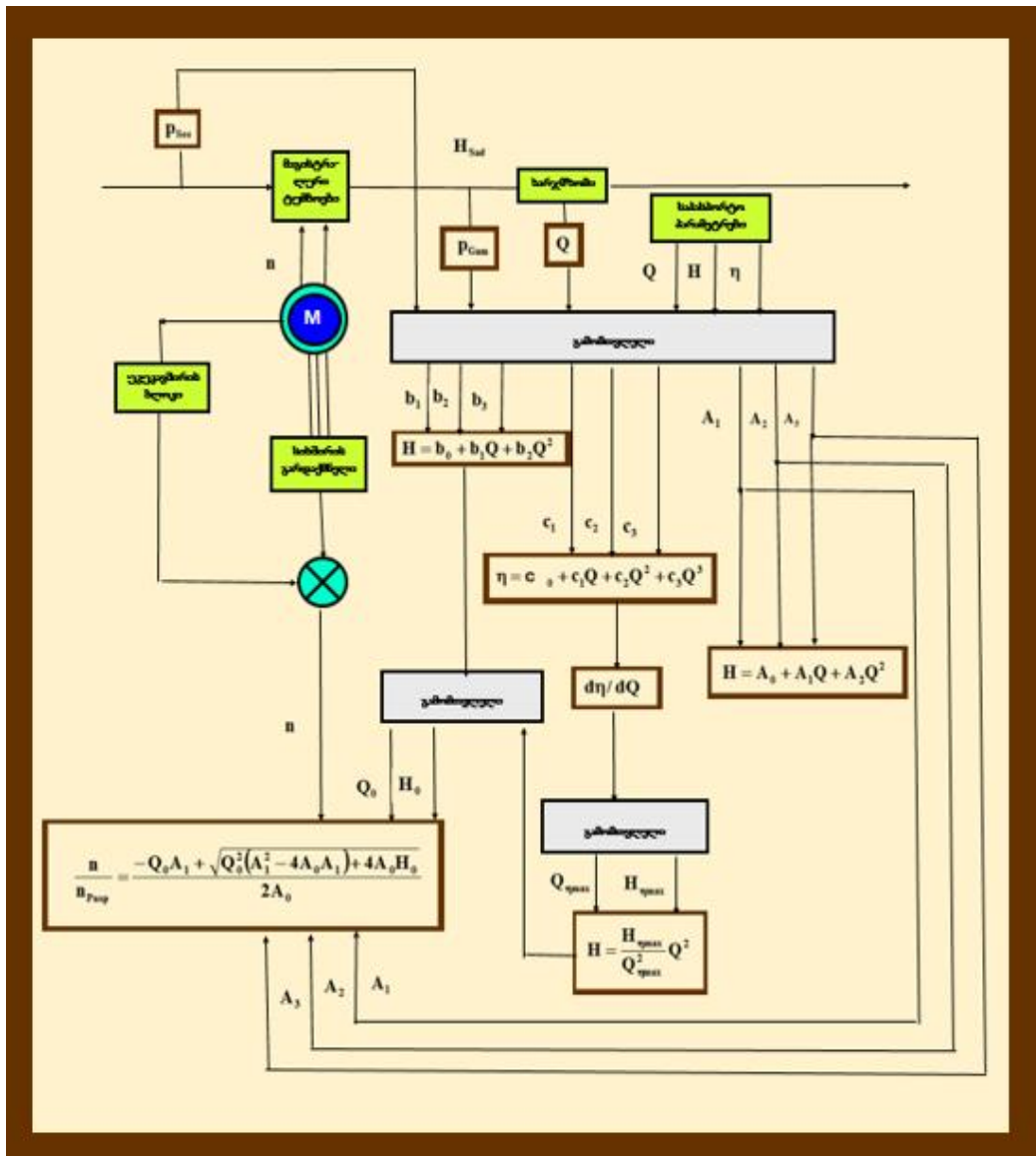
4.2. მაგისტრალური მილსადენის ენერგოდაზოგვის ღონისძიებები

მაგისტრალური მილსადენების მუშაობის რეჟიმები ხასიათდება ნავთობის (ან ნავთობ პროდუქტის) ტექნოლოგიური უბნების არასრული დატვირთვის მოხმარების რხევებით. ეს იწვევს ენერგოდაზოგვის ღონისძიებებს, გადასატუმბო სადგურების რაციონალურ რეგულირებას და რეჟიმების ოპტიმიზაციას.

მაგისტრალური მილსადენების ნავთობის ტრანსპორტირების ენერგოდაზოგვის ამოცანების ამოხსნისას, აუცილებელია სისტემის ძირითადი ობიექტების ურთიერთგავლენის ურთიერთქმედება. მაგისტრალური მილსადენების ძირითადი სტრუქტურული კვანძები წარმოადგენს ტექნოლოგიურ უბნებს, რომლებშიც შედის სატუმბო (ან საკომპრესორო) სადგურებში, მათ შორის სახაზო უბნებით.

ნავთობის ტრანსპორტის მომხმარებლებს მიეწოდება პროდუქტის გადასატუმბო დანადგარების საშუალებით. ამგვარად, ენერგორესურსების დანახარჯების შემცირების ამოცანის ამოხსნა, წარმოადგენს გადასატუმბო დანადგარების მუშაობის ეფექტურობას. გადასატუმბო დანადგარების მუშაობის ეფექტურობა, განსაზღვრავს მათი ტექნიკურ მდგომარეობას, ორგანიზაციით და სისტემის კომპრესირება გადასატუმბო სადგურებში და შესაბამისი პირობები. ეს პირობები, პირველ რიგში, განისაზღვრება მაგისტრალური მილსადენების სახაზო უბნების ეფექტურობით, გაწმენდის და გაცივების სისტემები და ტექნოლოგიური რეჟიმები უბნების მუშაობა რეჟიმების რეგულირებით.

მაგისტრალური მილსადენების მოხმარებული ელექტროენერგიის ძირითადი ნაწილი იხარჯება მილსადენებში ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის დაძლევაზე.



ნახ. 62. სატუმბო სადგურის ექსპლუატაციის რეჟიმების ოპტიმიზაციის სისტემის მუშაობის ფუნქციონალური სქემა. M - ელექტროძრავა

ეს მეტად მნიშვნელოვანი პრობლემაა და ერთერთი მნიშვნელოვანია სხვადასხვა მისართებისათვის (მისართი არის პრეპარატი, რომელიც ემატება საწვავში და შეუხეთვის მასალებში, მათი საექსპლუატაციო თვისებების გაუმჯობესობის მიზნით), რის გამოც ხდება გადასატუმბო

პროდუქტის მეთოდების ზემოქმედების საშუალებით. მისართების თანამედროვე გამოყენებისას, შესაძლოა ტრანსპორტირების 30%-მდე და გადასატუმბი აგრეგატების ამძრავების 40%-მდე ელექტროენერჯის შემცირება.

მაგისტრალური მილსადენების მოხმარებული ელექტროენერჯის ძირითადი ნაწილი იხარჯება მილსადენებში ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის დაძლევაზე. ეს მეტად მნიშვნელოვანი პრობლემაა და ერთერთი მნიშვნელოვანია სხვადასხვა მისართებისათვის (მისართი არის პრეპარატი, რომელიც ემატება საწვავში და შეზეთვის მასალებში, მათი საექსპლუატაციო თვისებების გაუმჯობესების მიზნით), რის გამოც ხდება გადასატუმბი პროდუქტის მეთოდების ზემოქმედების საშუალებით. მისართების თანამედროვე გამოყენებისას, შესაძლოა ტრანსპორტირების 30%-მდე და გადასატუმბი აგრეგატების ამძრავების 40%-მდე ელექტროენერჯის შემცირება.

გარდა ამისა, საჭიროა მილსადენის რეგულარული გაწმენდა სპეციალური გამწმენდი მოწყობილობებით. ენერგოდაზოგვა, ასევე მნიშვნელოვანია მილსადენში გადატუმბვის ოპტიმიზაცია და გაანგარიშება, რასაც ახორციელებს სადისპეჩერო სამსახური. და ბოლოს, სატუმბი მოწყობილობის მუშაობის ეკონომიკურობას განსაზღვრავს ექსპლუატაციის პერიოდში არსებული მქკ.

განვიხილოთ მაგისტრალური მილსადენების სისტემის ენერგოდაზოგვის და მოდერნიზაციის საკითხები. კერძოდ, მილსადენების ტრანსპორტში კანონზომიერია ნავთობის მოპოვება, და შესაბამისად იზრდება პროდუქტის მოცულობები. აუცილებელია ცნობილია, გადატუმბვის პროდუქტის ელექტროენერჯის კუთრი ხარჯი, ათასი კვტსთ/მლნ.ტ.კმ-ში მიიღება შემდეგი ფორმულით:

$$\mathfrak{F} = \xi G ,$$

სადაც G არის ტვირთბრუნვა, ხოლო ξ - მუდმივა, მოცემული მილსადენისათვის.

ამგვარად, პროდუქტის ტვირთბრუნვის კუთრი ელექტროენერჯის ხარჯი, პრინციპში, არ უნდა შემცირდეს და ტვირთბრუნვა იზრდება პროპორციულად 1,75 ხარისხის შესაბამისად.

თუ დავწერავთ ენერგოდამზოგავ ღონისძიებებს, მაშინ მაგისტრალური მილსადენებით პროდუქტის ტვირთბრუნვა უნდა გაიზარდოს. ამიტომ, მაგალითად ОАО „Транснефть“-ის მიხედვით ენერგოდამზოგვის პროგრამის მიხედვით, 2015 წლისათვის მიღებულია 314 მლნ.კვტ-სთ, ხოლო შემდეგი წლისათვის დაგეგმილია 368 მლნ.კვტ-სთ.

განვიხილოთ სხვადასხვა ნახშირწყალბადების ტრანსპორტი, ერთსა და იგივე კუთრი ენერჯის ხარჯი რაოდენობით, მაგრამ სხვადასხვა მანძილზე. მაგალითად ნახშირწყალბადების 1000 ტონა 100 კმ-ზე. ჩავატაროთ ანალიზი ნავთობის, ნავთობპროდუქტების, გათხევადებული გაზისა და ბუნებრივი გაზისათვის. მაშინ ენერჯის კუთრი ხარჯი, ერთსა და იგივე ნახშირწყალბადებისათვის დახარჯული სიმძლავრე გვექნება, ერთეულებში კვტ-სთ/მლნ.მ³, ან კვტ-სთ/მლნ.ტ (ცხრილი 17).

ცხრილი 17. სხვადასხვა მდგომარეობაში ნახშირწყალბადების ტრანსპორტის კუთრი ენერჯის დანახარჯი

ნახშირწყალბადები	სიმკვრივე, კგ/მ ³	ენერჯის კუთრი დანახარჯი, %
ნავთობი	900	3,9
გაზის კონდენსატი, გათხევადებული გაზი	500	7,0
ბუნებრივი გაზი	0,72	100

განგარიშები გვიჩვენებს, რომ კუთრი ენერჯის ხარჯი შესაბამისად მცირდება 26-ჯერ და 14,3-ჯერ, შესაბამისად ნავთობის და გაზის კონდენსატის (კუთრი ენერჯის ხარჯი), იგივე რაოდენობისა ბუნებრივი გაზისათვის.

განგარიშება გვამლევს სხვა უპირატესობების რიგს. ასე მაგალითად, მრავალჯერად მცირდება კუმშვადობასთან დაკავშირებულს ლითონხარჯები. ასევე უმჯობესდება ეკოლოგია.

ახალი ტექნიკისა და ტექნოლოგიის დანიშნულება იყოფა სამ ძირითად ნაწილად: დანერგვა, რომელიც ცვლის (აუმჯობესებს) ტექნოლოგიურ პროცესებს (მაგალითად ტრანსპორტი, გადამამუშავება, შენახვა და ა.შ.); ცვლის (ამცირებს) შრომით, მატერიალურს და ბუნებრივ რესურსებს; ცვლის ტექნოლოგიური პროცესების და რესურსების დანახარჯებს.

ახალი ტექნიკის და ტექნოლოგიის ეკონომიკური ეფექტურობის გაანგარიშების გამოყენება, ცვლის ახალი ტექნოლოგიური პროცესების ისეთ დანერგვას, რომლებიც ეფუძნება ამ პროცესების მათემატიკური მოდელებით.

არსებობს ენერგოდანახარჯების (ძირითადად მაგისტრალური დანადგარების ამძრავის ელექტროენერგია) შემცირების რამდენიმე გზა, რომლებს შორის მთავარია:

1. მილსადენის ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის შემცირება, პერიოდული გაწმენდის და/ან ტურბულენტური მიმართების წინააღმდეგობის შეყვანით;
2. გადატუმბვის რეჟიმების ოპტიმიზაცია სატუმბი დანადგარების მწარმოებლობის რეგულირებით, თანამედროვე მეთოდებით;
3. ექსპლუატირებული მოწყობილობის და გამანაწილებელის ქსელების ელექტროენერგიის დანაკარგების შემცირება;
4. ელექტრომომარაგების გადასვლა თანამედროვე ენერგოდაზოგვის ტექნოლოგიებით.

მაგალითად, ნავთობ და ნავთობპროდუქტების გადატუმბვის პროცესის დინამიკის მდგომარეობის ცვლილებისას, შესაძლოა ჩავატაროთ გადატუმბვის ენერგოდანახარჯების ზრდის პროგნოზი, რაც თავის მხრივ გვაძლევს გაწმენდის ტექნოლოგიური ღონისძიების გონივრულ ვადებს.

გადატუმბვის სიჩქარის გაზრდა წარმოადგენს სატრანსპორტო საცობებისა და დანალექების ყველაზე მარტივ და იაფ ბრძოლას. ეს დაკავშირებულია ორ ძირითად ფაქტორთან - არსებული მილსადენების

ცვლათ დასაშვები წნევის შემცირებისას, და როგორც შედეგად, შემოსაზღვრულობა სატუმბო სადგურის რეზერვუარებში არსებული ნავთობპროდუქტების მოცულობით. მექანიკური მინარევების მრავალწლიანი დანალექები და მილის კედლების კოროზიის პროდუქტები ქმნის მჭიდრო კონგლომერატს, დაკავშირებულ პროდუქტთან და შიგა ზედაპირთან. ბრძოლის ერთადერთ საშუალებას წარმოადგენს მილსადენის შიგა ზედაპირის გაწმენდა, სპეციალური საშუალებებით.

მეორე, არა ნაკლებ მნიშვნელოვანი მიმართულებაა მაგისტრალური მილსადენის სატუმბო მოწყობილობის მუშაობის რეჟიმების ოპტიმიზაცია და შესაბამისად მუშაობის ენერგოტევადობის შემცირება (მოხმარება სატუმბოებში წარმოადგენს ელექტრული ენერჯის 85%-მდე).

ენერგოდაზოგვის მნიშვნელოვანი რეზერვი ჩადებულია „ტუმბო-მილსადენის“ დინამიკური სისტემის მუშაობის რეჟიმის ოპტიმიზაციაში.

ქსელის მახასიათებლის რეგულირების ცვლილებით შეიძლება განხორციელდეს შემდეგი მეთოდებით: ნაკადის დროსელირება სადაწნო ხაზში; ლუპინგირება; ნაკადის ნაწილის გადაგდება სადაწნო კოლექტერიდან - შემწოვში (ბაიპასირება); საშუალო სატუმბო სადგურის გამორთვა; მაგისტრალური მილსადენის სახაზო ნაწილის გაწმენდა.

ამგვარად, შეიძლება დავასკვნად, რომ ყველაზე მნიშვნელოვანი ფაქტორი, პირდაპირ ან ირიბად, წარმოადგენს მილსადენში ნაკადის ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის კოეფიციენტის მნიშვნელობას. უკვე ნაჩვენებია იყო ოთხი მეთოდი, რომლებიც უშუალოდ დაკავშირებული და დამოკიდებულია ამ კოეფიციენტის ცვლილებასთან. ამოტომ, ხშირად, ექსპლუატაციაში მყოფო მაგისტრალური მილსადენი არ წარმოადგენს იდეალიზაციის სისტემას. რეალობაში, მაგისტრალურ მილსადენზე მოქმედებს მრავალ შემაშფოთელი ზემოქმედება. აგრეთვე უკვე აღინიშნა, რომ მილსადენის შიგა ზედაპირის მდგომარეობა შორსაა საწყისი მდგომარეობიდან. ასევე, პრაქტიკულად არ არსებობს მეთოდიკა, რომლის საშუალებით გამოიყენება არასტაციონარული ნაკადის წინააღმდეგობის

კოეფიციენტი (აღვნიშნავთ, რომ მაგისტრალური მილსადენში არსებული ნაკადი - პრაქტიკულად, მეტად თუ ნაკლებად - არადაუმყარებელია). ამიტომ არსებული კლასიკური, ან თანამედროვე ფორმულები და მეთოდები, ხშირად პრაქტიკაში არ მუშაობს. ჩვენი აზრით, აუცილებელია ექსპლუატაციაში მყოფი მილსადენის დიაგნოსტიკა (იგულისხმება არა მხოლოდ დიაგნოსტიკის მოწყობილობები, არამედ რიცხვითი ანალიზიც), ფაქტური მდგომარეობის მიხედვით. ამ დროს, საინჟინრო სიზუსტის მქონე შედეგების მისაღებად, საჭიროა ახალი მეთოდის შექმნა, რაც წარმოადგენს სადისერტაციო ერთერთ მიზანს.

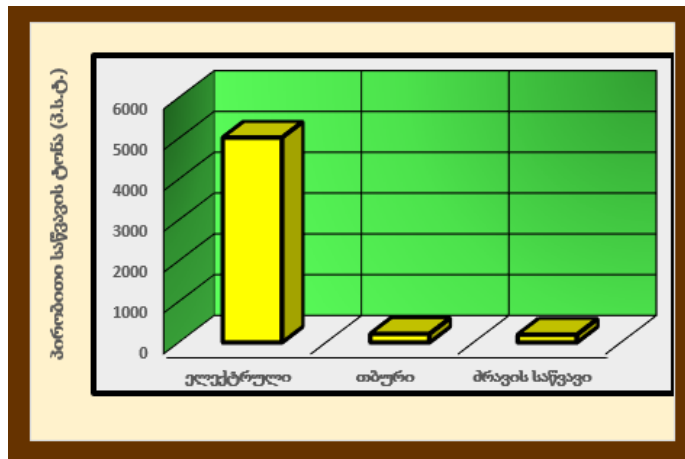
მაგისტრალური მილსადენის საიმედოობის პირობების შენარჩუნებისათვის, აუცილებელია მილსადენის ჰიდრავლიკური წინააღმდეგის ცვლილების დროებითი დინამიკის შესაძლებლობის გავლენა, დანალექების წარმოქმნის, ჩამკეტი არმატურის და ამრინების გადართვა პროფილაქტური სამუშაოების ჩატარებისას.

ერთერთი კონკრეტული მაგისტრალური ნავთობპროდუქტსადენის აუდიტის შედეგად, დადგინდა, რომ ძირითად ენერგორესურსად (როგორც ენერგეტიკული ასევე ფინანსურისათვის), განმსაზღვრელად წარმოადგენს ელექტროენერგიას (ნახ. 63). ამიტომ, ძირითადი რესურსის ენერგოდაზოგვა, მდგომარეობს ელექტრული ენერგიის ხარჯის ღონისძიების შექმნა და რეალიზაცია.

კვლევების მიხედვით, ელექტროენერგიის მოხმარება საშუალოდ ნაწილდება შემდეგნაირად: ძირითადი და შემტბორავი ტუმბოები - 85%, დამხმარე მოწყობილობა - 11%, ქიმიური დაცვა და სხვა - 2%, დანარჩენი - 2%.

ამგვარად, მაგისტრალური ნავთობპროდუქტსადენის სისტემის ენერგოდაზოგვის აქტუალურ პრობლემას წარმოადგენს ტექნოლოგიური ტუმბოების ამძრავის ელექტრული ენერგიის მოხმარების შემცირება.

გადატუმბვის ენერგოდანახარჯების მნიშვნელოვან შემდგენელს წარმოადგენს მილსადენის ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის დაძლევა. განვიხილოთ მათი შემცირების გზები.



ნახ. 63. ენერგეტიკული დანახარჯების სტრუქტურა (საშუალოდ სახაზო საწარმო-სადისპეჩერო სადგურისათვის)

მაგალითად, „Транснефтепродукт“-ის დარგობრივ სტანდარტში ნაჩვენებია, რომ მაგისტრალური ნავთობპროდუქტსადენის გამწმენდი ღონისძიებების ჩატარებისას, კუთრი ენერგოდანახარჯები უნდა იყოს არა უმეტეს 2%-ის გაზრდისას, მაგრამ არ არის ნაჩვენები თუ როგორ განისაზღვრება ეს სიდიდე. ამ დროს ეს მეტად მნიშვნელოვანია, რადგანაც პრაქტიკულად ყველა მილსადენებს გააჩნია სითხის მოძრაობა გარდამავალ რეჟიმში, რაც ნიშნავს, რომ მილის შიგა ზედაპირის მდგომარეობა და სიმკვრივე - დაახლოებით ერთი რიგისაა. თუ პროცესი შედარებით მდოვრეა, მაშინ სიბლანტე მუდმივად იცვლება გადატუმბვის პროდუქტის მარკის ან ტემპერატურის ცვლილებისას.

მაგალითად, ГОСТ-ების მიხედვით, დიზელის საწვავისას, რეგლამენტირდება დასაშვები სიბლანტე $11-0,2-40$ -თვის, ГОСТ 305-82-ის მიხედვით სიბლანტე 20°C -თვის უნდა იყოს ზღვრებში $3 \cdot 10^{-6} \div 6 \cdot 10^{-6}$ მ²/წმ. გადასატუმბი პროდუქტის ტემპერატურა ასევე იცვლება 5-დან 25°C -მდე.

ამასთან დაკავშირებით, საწვავის ერთსა და იგივე მარკისათვის, სიბლანტე შეიძლება ვარიირებდეს $2,7 \cdot 10^{-6} \div 8,8 \cdot 10^{-6}$ მ²/წმ-მდე, ე.ი. სამჯერ მეტი.

ამგვარად, გადაქაჩვის კუთრი ენერგოდანახარჯების განსღვრისათვის, აუცილებელია პროდუქტის ფაქტიური სიბლანტის გავლენა.

საბოლოოდ, სიბლანტის და მილსადენის ეფექტური ხორკლიანობის გათვალისწინებისას, მიღებულია ელექტროამძრავის გადაქაჩვის სიმძლავრის შემდეგი დამოკიდებულება:

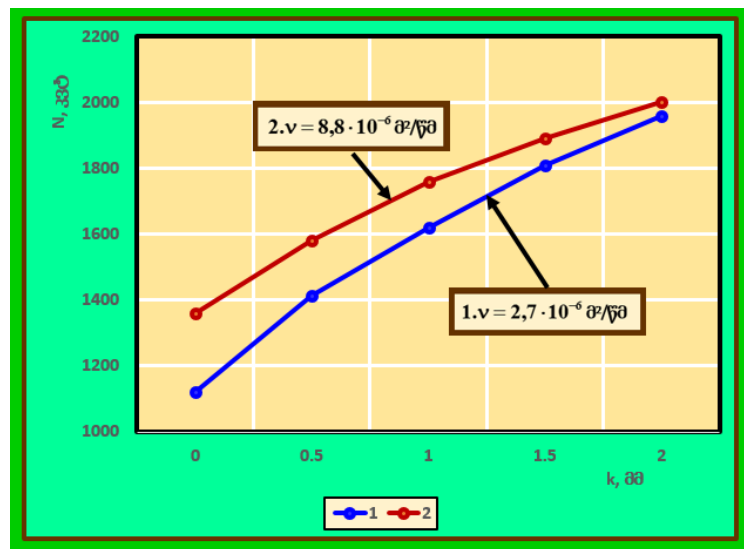
$$N = \rho g Q \left[0,11 \left(\frac{k}{D} + \frac{68\pi v D}{4Q} \right)^{0,25} \frac{L}{Q} \left(\frac{4Q}{\pi D^2} \right) \frac{1}{2g} \right] + \rho g Q (z_2 - z_1). \quad (88)$$

სადაც N არის გადაქაჩვის სიმძლავრე, ვტ; Q - მაგისტრალური ნავთობპროდუქტსადენის მოცულობითი მწარმოებლობა, მ³/წმ; D და L - შესაბამისად მილსადენის შიგა დიამეტრი და სიგრძე, მ; $z_2 - z_1$ სიმაღლეების ვარდნილი უბნის ბოლოებში, მ; v - პროდუქტის სიბლანტის კინემატიკური კოეფიციენტი, მ²/წმ; k - მილსადენის შიგა ზედაპირის ეფექტური ხორკლიანობა, მ.

მთელი რიგი მაგისტრალური ნავთობპროდუქტსადენების გამოკვლევამ მოგვცა ემპირიული k კოეფიციენტის სიდიდე („სუფთა“ მილსადენისათვის) და მისი მილსადენის ექსპლუატაციის პროცესის ცვლილებისას, ხდება მილსშიგა დანალექების მოცულობების ზრდის კონტროლირება. დამოკიდებულების (88)-ის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ გადატუმბვის კუთრი ენერგოდანახარჯების განსაზღვრისას, უნდა მოხდეს პროდუქტის ფაქტიური სიბლანტის გათვალისწინება, წინააღმდეგ შემთხვევაში სიმძლავრის ცდომილებამ შეიძლება მიაღწიოს 20%-მდე (ნახ. 64).

ტურბომექანიზმების ძირითად ამძრავად ირჩევენ ასინქრონულ ელექტროამძრავს. სისტემების მართვის ფუნქციონირებადი სქემები, ქმნიან ზემოქმედის მარტვ ფაქტორად - მილსადენის მწარმოებლობას. ამ სქემების სისტემებისათვის, ხდება ამ პროდუქტის მწარმოებლობის მართვა. ეს

შესაძლო იყოს დროსელირების მეთოდი, როდესაც იცვლება მაგისტრალის ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობა, ან რეგულირდება არმატურით. აგრეთვე ხდება უკუმმაგისტრალის გამოყენება ბაიპასით. თუმცა მწარმოებლობის მართვის პერსპექტიულ ხერხად წარმოადგენს ტურბომექანიზმის ბრუნვის სიხშირის ცვლილება. ეს ფუნქცია მოქმედებს ელექტროამპრაჟზე. მას გააჩნია ასინქრონული ძრავა, და იკვებება სიხშირის გარდაქმნელიდან.



ნახ. 64. მაგისტრალური ნავთობპროდუქტსადენის გადატუმბვის სიმძლავრის დამოკიდებულება დიზელის საწვავის JI-0,2-40 -თვის: $1.v = 2,7 \cdot 10^{-6}$; $2.v = 8,8 \cdot 10^{-6}$

მილსადენის ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობა დამოკიდებულია მრავალ ფაქტორზე - პროდუქტის სიბლანტე და ნაკადის რეჟიმი, მილის შიგა ზედაპირის და უცხო მექანიკურ დანალექების მდგომარეობა და ა.შ. პირობად შეიძლება გვაქვს ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის დროში უცვლელი შემადგენლები (დამოკიდებულია მილსადენის გეომეტრიულ პარამეტრებზე და პროდუქტის ფიზიკო-ქიმიური თვისებისათვის) და დროში ცვლადი შემადგენელი რომელიც, იწვევს კედლების ხორკლიანობის ზრდას (კოროზია და დანალექები). რაოდენობრივად, ჰიდროწინააღმდეგობის ცვლადი ნაწილი შესაძლებელია დროში ცვლადის ეფექტური დიამეტრის $D_{\text{eff}}(t)$ შეტანით.

ამგვარად, შიგა დანალექების და ეფექტური დიამეტრის დადგენისას უნდა ჩატარდეს მაგისტრალური მილსადენების ამოცანის ცვლილების ანალიზი. ეს პროცესი ბუნებრივად თან სდევს ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის ციკაბო ზრდას, რაც იწვევს ჰიდრავლიკური მახასიათებლის მუშა წერტილის წანაცვლებას.

განვიხილოთ შემდეგი ამოცანა: მილსადენის ჰიდრავლიკური მახასიათებელი აღიწერება შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$\Delta p = \beta Q^2 + \rho g \Delta z . \quad (89)$$

სადაც Δp არის სახაზო უბნის ბოლოებში წნევის ვარდნილი, პა;

Q - პროდუქტის ხარჯი, მ³/წმ; β - უბნის ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობა, პაწმ²/მ⁶; Δz - უბნის დასაწყისში და ბოლოში გეოდეზიური სიმაღლეების სხვაობა, მ.

სიმარტივისათვის ვიღებთ განზომილებიან β სიდიდეს, განსხვავებისთ უგანზომილებო წინააღმდეგობის კოეფიციენტი λ -ს, რომლებიც დაკავშირებულია ერთმანეთთან;

$$\beta = \lambda \frac{8L\rho}{\pi^2 D} , \quad (90)$$

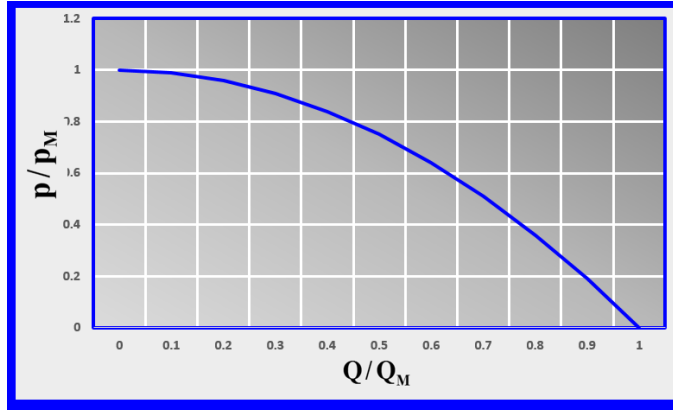
სადაც L, D შესაბამისად არის უბნის სიგრძე და დიამეტრი, მ; ρ - პროდუქტის სიმკვრივე, კგ/მ³.

ამგვარად სიდიდე β სრულად განსაზღვრავს ენერჯის დანაკარგს მოცემულ უბანს, რომელიც ითვალისწინებს მილსადენის შიგა ზედაპირს და გეომეტრიულ პარამეტრებს.

ანალიზური ამონახსნის სიმარტივისათვის და გაანგარიშებების სიზუსტის გაზრდის მიზნით ჩავთვალოთ, რომ ცენტრიდანული ტუმბოს მახასიათებელი აღიწერება შემდეგი გამოსახულებით:

$$p = p_M \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_M} \right)^2 \right] , \quad (91)$$

სადაც p_M, Q_M - წარმოადგენს $(Q - p)$ მახასიათებლის გადაკვეთის წერტილს კოორდინატების ღერძებთან (ნახ. 65).



ნახ. 65. ტუმბოს კლასიკური მახასიათებელი

ტუმბოს ნომინალური რეჟიმი განისაზღვრება ტუმბოს სიმძლავრის მაქსიმუმის პირობიდან, ე.ი.

$$N = pQ = p_M \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_M} \right)^2 \right] Q \rightarrow \max . \quad (92)$$

ამიტომ, აუცილებელია დაწნევისა და ხარჯის სიდიდეების საპასპორტო მახასიათებლებზე გადასვლა. აქედან:

$$\frac{dN}{dQ} = \frac{d}{dQ} \left\{ p_M \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_M} \right)^2 \right] Q \right\} = 0 . \quad (93)$$

$$\frac{d}{dQ} \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_M} \right)^2 \right] Q = 0 . \quad (94)$$

$$\frac{d}{dQ} \left(Q - \frac{Q^3}{Q_M^2} \right) = 0 . \quad (95)$$

$$1 - \frac{3Q^2}{Q_M^2} = 0 . \quad (96)$$

$$Q = \frac{Q_M}{\sqrt{3}} . \quad (97)$$

$$p = p_M \left[1 - \frac{Q_M^2}{3Q_M^2} \right] = \frac{2}{3} p_M . \quad (98)$$

$$N = \frac{2}{3\sqrt{3}} p_M Q_M = 0,19245 p_M Q_M = 0,19245 N_M . \quad (99)$$

სადაც $N_M = p_M Q_M$

ოპტიმიზაციის ამოცანა იყოფა ორ ეტაპად. პირველ ეტაპზე განისაზღვრება წნევის ვარდნილი სატუმბო სადგურზე, რაც აუცილებელია მაგისტრალური ნავთობპროდუქტსადენის მაქსიმალური მწარმოებლობა, რეზერვუარების საწყისი p_0 და ბოლო p_K დაწნევით. ამ დროს ვთვლით, რომ სატუმბო სადგური წარმოადგენს „ერთ აგრეგატს“, რომლის მახასიათებელი აღიწერება შემდეგი დამოკიდებულებით;

$$\frac{p}{p_M} = \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_M} \right)^2 \right].$$

(100)

მეორე ეტაპზე, მოცემული წნევების მიხედვით უნდა ჩატარდეს ტუმბოების ჩართვის სქემებისა და დაწნევა-ხარჯის (დროსელირება ან მუშა ბორბლების ბრუნვის სიხშირის რეგულირებით) საშუალებით მახასიათებლებით სადგურზე.

$$\begin{cases} p_K - p_0 = \beta Q^2; \\ p = p_M \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_M} \right)^2 \right]. \end{cases} \quad (101)$$

სადაც გვაქვს შემოსაზღვრულობები $p_K < p_{Das}$, $p_0 > p_{Cav}$. აქ p_{Das} - მაქსიმალური დასაშვები წნევის, p_{Cav} - კავიტაციური მარაგი.

ამგვარად, საბოლოოდ ხდება სადგურში დადგმული ტუმბოების ჩამრთავი და რეგულირებული სქემების ოპტიმიზაცია, ტუმბოებზე ამძრავზე ენერგოდანახარჯების მინიმალური კრიტერიუმის შესაბამისად.

ფუნქციის $Q = f(p_M, Q_M) \rightarrow \max$ მოძებნა ხდება სხვადასხვა მეთოდების საშუალებით. შედეგად მიიღება მაგისტრალური ნავთობპროდუქტსადენის მაქსიმალური მწარმოებლობა, ყველა შემოსაზღვრულობით და ტრასის გასწვრივ წნევის უზრუნველყოფა.

გადავიდეთ გაანგარიშების მეორე ეტაპზე. ენერგოდანახარჯების ამოცანის ოპტიმიზაცია გვაძლევს ტუმბოების ისეთ კომბინაციას, რომ ერთობლივი მახასიათებლების მუშა წერტილი, იყოს მაქსიმალურად ახლოს, (პირველ ეტაპზე გაანგარიშებულთან). როგორც წესი, სატუმბო

სადგურზე დადგმულია ერთტიპიური ძირითადი და შემტბორავი ტუმბოები, და ამიტომ გადათვლის ვარიანტების ამოცანა არ ქმნის რთულ სიმძნელებს. თუმცა გვექნება მცირე ალბათობა, რომ მუშა წერტილი დაემთხვევა გაანგარიშებულთან. ამიტომ ხდება დროსელირების რეგულირება, ან ნაკადის ცირკულაციით ტუმბოს ბაიპასის მიხედვით. ამ დროს სატუმბო აგრეგატის მახასიათებელი, კოეფიციენტის საშუალებით, შეიცვლება შემდეგნაირად:

$$\frac{P}{P_M} = \alpha \left[1 - \left(\frac{Q}{\gamma Q_M} \right)^2 \right]. \quad (102)$$

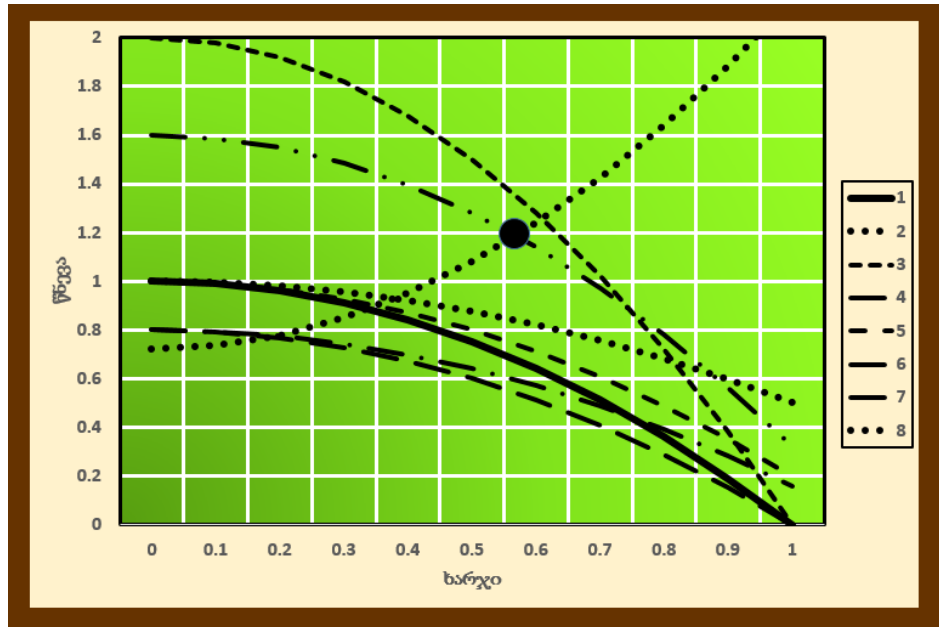
სადაც α და γ კოეფიციენტები, რომლებიც შესაბამება დროსელირების და ცირკულაციის პროცესებს, $0 < \alpha, \gamma < 1$. როდესაც $\alpha = 1$ და $\gamma = 1$, მაშინ გვაქვს შემთხვევა რეგულირების გარეშე. ასეთ შემთხვევაში, ტუმბოს მქკ, რეგულირების გარეშე, მცირდება.

$$\eta_{Tum} = \eta \alpha \gamma, \quad (103)$$

სადაც η არის ტუმბოს მქკ მუშა ნომინალურ რეჟიმში.

ნახ. 66-ზე ნაჩვენებია HM 500-300 მახასიათებლები, ჩართვის და რეგულირების სხვადასხვა ვარიანტები. როგორც ჩანს გრაფიკებიდან, მოცემული, გაანგარიშებული მუშა წერტილი იმყოფება ოდნავ ქვევით, ვიდრე ორი მიმდევრობით ჩართული ტუმბოს მახასიათებელი. ამიტომ საჭიროა რეგულირების ერთერთი მეთოდის გამოყენება.

როდესაც დროსელირებისას $\alpha = 0,877$, მუშა წერტილი თანხვდება საანგარიშო მნიშვნელობას, თუმცა ტუმბოს მქკ მცირდება 12,7%-ით, ხოლო ენერგოდანახარჯები გაიზარდება ამავე სიდიდით. ამიტომ რეგულირება ოპტიმალური მეთოდით წარმოადგენს ტუმბოს ამპრავის ბრუნვის სიხშირით. განხილულ მაგალითში ბრუნვის სიხშირე უნდა გაიზარდოს 5,86%-ით, რაც მოგვცემს შემდეგ სიმძლავრის ეკონომიას $(1,0586)^2 = 1,186$, ანუ 18,6%-ით.



ნახ. 66. ფარდობითი წნევა და ხარჯი ტუმბოს და ქსელის მახასიათებლები: 1. ტუმბო HM 500-300-ს მახასიათებელი $\frac{p}{p_M} = \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_M}\right)^2\right]$; 2. ტუმბოების პარალელური მიერთება $\frac{p}{p_M} = \left[1 - \left(\frac{Q}{2Q_M}\right)^2\right]$; 3. ტუმბოების მიმდევრობითი მიერთება $\frac{p}{p_M} = 2 \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_M}\right)^2\right]$; 4. ტუმბოს ნაკადის დროსელირება $\frac{p}{p_M} = \alpha \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_M}\right)^2\right]$, $\alpha = 0,8$; 5. ნაკადის ცირკულაცია შესასვლელზე $\frac{p}{p_M} = \left[1 - \left(\frac{Q}{\gamma Q_M}\right)^2\right]$, $\gamma = 0,8$; 6. ტუმბოების მიმდევრობითი კორექტირება $\frac{p}{p_M} = \alpha \left[1 - \left(\frac{Q}{\gamma Q_M}\right)^2\right]$, $\alpha = 0,8$, $\gamma = 0,8$; 7. ტუმბოების მიმდევრობითი კორექტირება; 8. ქსელის მახასიათებელი წინააღმდეგობით $388,8 \text{ მპა}\cdot\text{წმ}^2/\text{მ}^6$

სატუმბო მოწყობილობის და მილსადენის ხარჯით-წნევითი მახასიათებლების შეესაბამების ამოცანა, რომელიც ქმნის ნავთობპროდუქტების ტრანსპორტის ტექნოლოგიური პროცესების ენერგოტევადობის შემცირებისას საკითხების კვლევას, მეტად აქტუალურია. მაგისტრალური ნავთობპროდუქტსადენების მოწყობილობის მახასიათებლების შერჩევა ხორციელდება ისეთი ვარაუდით, რომ მოწყობილობის და გადასატუმბი პარამეტრები მუდმივია. რეალურ შემთხვევებში, რომლებიც ადგილი აქვს ტექნოლოგიური პროცესების

მახასიათებლების მნიშვნელოვან გადახრებებს საპროექტო (ნომინალური) მნიშვნელობებიდან გარკვეული მიზეზით, წარმოადგენს:

1. მილსადენებში დანალექების და კედლის ხორკლიანების, კოროზიული არასტაციონარული და პროცესებში ჰიდრავლიკური მახასიათებლების ცვლილება;

2. ტრანსპორტირების პროდუქტის თვისებების განსხვავება (სიბლანტე, სიმკვრივე);

3. მილსადენის დასრულებული რესურსის შედეგად სიმტკიცის პირობების შესაბამისად, მაგისტრალურ ნავთობპროდუქტსადენებში მუშა წნევის შემცირების აუცილებლობა;

გარდა ამისა, პერიოდულად ხდება მაგისტრალური ნავთობპროდუქტსადენების მწარმოებლობის და წნევის მნიშვნელოვანი ცვლილება, რაც გათვალისწინებულია ტექნიკური მოხმარების ღონისძიებებით (წყლის ნაერთების გაწმენდა, მექანიკური გამწმენდების და დიაგნოსტიკური მოწყობილობების გატარება, მილსადენის კაპიტალური რემონტის შესრულება იზოლაციის ჩანაცვლებით და ა.შ.).

აქედან გამომდინარე გამოდის, რომ მილსადენის სისტემის მუშა დინამიკური დიაპაზონი უნდა იყოს საკმარისად ფართო. ამავე დროს, სატუმბო სადგურების მოწყობილობა უშვებს, ტუმბოების საფეხურიან გადართვას, ხოლო უფრო ზუსტი რეგულირება პარამეტრებით ნაკადის დროსელირებით, ან ნაკადის ნაწილის გადაგდება ტუმბოს შესასვლელში ბაიპასის ხაზით. ორივე მეთოდი წარმოადგენს ენერგეტიკულად არასარგებელს, რადგანაც ხდება მუშა წერტილის წანაცვლების გასვლა მაქსიმალური მქკ-ის სისტემაში „ძრავა-ტუმბო-მილსადენი“ ზონიდან.

ამგვარად, ენერგოდაზოგვის ამოცანა განიხილება შემდეგნაირად: გათვალისწინებულია, რომ მაგისტრალური ნავთობპროდუქტსადენები გამოიყენება სხვადასხვა გადაქაჩვის პროდუქტისათვის, კომერციული გადაქაჩვა მკაცრად განსაზღვრულ მოცულობებისათვის, საჭიროა ტექნოლოგიური გონივრული დრო (Q_0) და მუშა წნევა არ უნდა იყოს

არაუმეტეს დასაშვები წნევისა მილსადენის სიმტკიცის შესაბამისად და სატუმბო მოწყობილობას ცნობილი ხარჯით-სადაწნეო მახასიათებლების საჭიროება. საჭიროა, პროდუქტის ტრანსპორტირების მილსადენის ოპტიმალური პარამეტრები, ენერჯის მინიმალური დანახარჯისათვის. რადგანაც პარამეტრები ურთიერთდაკავშირებულია, ამიტომ ოპტიმიზაცია უნდა ჩატარდეს ერთერთი პარამეტრის მიმართ, მაგალითად მილსადენის მოცულობითი მწარმოებლობა G

ამ პირობებში, ენერგოდანახარჯები Nt კვტ-სთ, სადაც N არის ტუმბოს ამძრავზე დანახარჯი, t გადაქაჩვაზე დახარჯული დრო. ცხადია, რომ $t = Q_0 / G$, ხოლო ამძრავის სიმძლავრის დამოკიდებულება მწარმოებლობაზე $N = N(G)$, გვაძლევს მიზნის ფუნქციას სახეს:

$$F(G) = \frac{N(G)Q_0}{G} \rightarrow \min, \quad (104)$$

შემდეგი შემოსაზღვრებით

$$\begin{cases} N < N_0; \\ H < H_{sim}; \\ G < G_0 \end{cases} \quad (105)$$

აქ N_0 და G_0 არის შესაბამისად აგრეგატის და ტუმბოს მწარმოებლობის სიმძლავრეების ნომინალური სიდიდეები, H და H_{sim} - მიმდინარე ტუმბოს დაწნევა და მაქსიმალური დაწნევა მილსადენის სიმტკიცის პირობის შესაბამისად.

დამოკიდებულება (104)-დან ჩანს, რომ ოპტიმიზაციის შედეგი დამოკიდებულია $N(G)$ ფუნქციონალურ დამოკიდებულებაზე. რადგანაც $N(G) = \text{const}(G)$, და შესაბამისად $N(G)$, პროპორციულია G -ს, ამიტომ გვექნება ტუმბოს მაქსიმალური მწარმოებლობის ოპტიმიზაცია. მაგრამ, თუ უკვე გვაქვს კვადრატული დამოკიდებულების შემდეგი სახე $N(G) = A + BG + CG^2$, მაშინ გვექნება ოპტიმალური ხარჯი, რომელიც განისაზღვრება პირობიდან.

$$F(G) = \frac{A}{G} + BG \rightarrow \min .$$

(106)

კერძოდ, თუ $A \rightarrow 0$, ე.ი. როდესაც არ გვაქვს ხარჯი და მოხმარებული სიმძლავრე, მაშინ რეკომენდებულია მინიმალური მწარმოებლობა, რომელიც განისაზღვრება მხოლოდ საწარმოო აუცილებლობით. მაგრამ ამ შემთხვევაში ჩნდება ახალი ფაქტორები, რომლებიც არ ითვალისწინებს მარტივი მოდელებით, მაგალითად პროდუქტის სიჩქარის გაზრდა, რაც იწვევს მილსადენის ჰიდრავლიკური წინააღმდეგობის გაზრდას და, როგორც შედეგად ზრდის ტექნოლოგიურ ენერგოდანახარჯს.

მოყვანილი მოსაზრებები გვიჩვენებს, რომ ოპტიმიზაციის ჩატარებისათვის აუცილებელია $N(G)$ დამოკიდებულების განსაზღვრა საანგარიშო გზით მილსადენის და სატუმბი აგრეგატის ხარჯით-სადაწნეო მახასიათებლებით, ან ახალი გაზომვები ენერგოკვლევის ჩარჩოში.

ნაშრომში ნაჩვენებია, რომ მოცემული ამოცანა უნდა ამოიხსნას თვითეული კონკრეტული მაგისტრალური ნავთობპროდუქტსადენებისათვის.

მაგისტრალური ნავთობპროდუქტსადენების ენერგოეფექტურობის რადიკალური გზის გაზრდა წარმოადგენს მართვას ხარჯით-სადაწნეო მახასიათებლებით. მსგავსი რეგულირება საშუალებას გვაძლევს ფუნქციონალური $N(G)$ დამოკიდებულების, და შესაბამისად, არა მწარმოებლობის ოპტიმიზაციას, არამედ მახასიათებლის მუშა წერტილის წანაცვლებას მილსადენის სრული მილსადენის სისტემის მქც-ის მაქსიმალური არეს მნიშვნელობისათვის.

ნაშრომში განიხილება მწარმოებლობის მდოვრე რეგულირება. კერძოდ სიხშირით-მარეგულირებული ამძრავისათვის მიღებულია ვადის კომპენსირების შეფასება, დამოკიდებულებით სატუმბი სადგურის მუშაობის რეჟიმისათვის.

$$T = \frac{C_{SSR}}{8700cN} \frac{G_{Fact}^3}{G_{Fact}^3 - G_{Nom}^3}, \text{წელი} \quad (107)$$

სადაც G_{Nom} არის ტუმბოს საპასპორტო მწარმოებულობა, მ³/სთ; G_{Fact} - მაგისტრალური ნავთობპროდუქტსადენების ფაქტიური საშუალოწლიური მწარმოებულობა, მ³/სთ; N - ცალკეული ტუმბოს ამძრავის სიმძლავრე, კვტ; c - ელექტროენერჯის მიმდინარე ტარიფი, ლარი/კვტსთ; C_{SSR} - კაპიტალური დანახარჯების მოცულობა სიხშირით-მარეგულირებულის ამძრავის დადგენა, ლარი.

დანერგვა, მთელი რიგი მაგისტრალური ნავთობ და ნავთობპროდუქტსადენების გაანგარიშება ამ ფორმულით, დაახლოებით გვაძლევს 1,8-დან 2,5 წელიწამდე.

**თავი 5. ცენტრიდანული ტუმბოების და სატუმბი სადგურების
მაქსიმალური მქკ-ის დადგენის საინჟინრო მეთოდის
შემუშავება და უზრუნველყოფა**

5.1. მეთოდების რეგულირება და შესასვლელი პარამეტრების განსაზღვრა

მაგისტრალური ნავთობსადენის ცენტრიდანული ტუმბოების სატუმბი სადგურების მუშაობის რეჟიმის რეგულირება, მარგი ქმედების კოეფიციენტის მაქსიმიზაციით, საჭიროა ვიცოდეთ გაანგარიშების საწყისი მონაცემები (ცხრილი 18).

ცხრილი 18. სატუმბი სადგურის სარეჟიმო საწყისი პარამეტრების მნიშვნელობები

№	დასახელება	აღნიშვნა	ერთეულის განზომილება
1	სატუმბი აგრეგატის ცენტრიდანული პარამეტრები	ტუმბოს	კონსტრუქციული
1.1	სადაწნეო მახასიათებლის კოეფიციენტები	a	მ
		b	სთ ² /მ ⁵
1.2	მარგი ქმედების მახასიათებლის კოეფიციენტები	c₁	%სთ/მ ³
		c₂	%სთ ² /მ ⁶
		c₃	%სთ ³ /მ ⁹
1.3	ტუმბოს მწარმოებლობა მაქსიმალური მარგი ქმედების კოეფიციენტები	Q_{ηmax}	მ ³ /სთ
1.4	ტუმბოს მგანვიტარებული დაწნევა, მაქსიმალური მარგი ქმედების კოეფიციენტები	H_{ηmax}	მ
2	ჰიდრავლიკური მახასიათებლის ტექნოლოგიური პარამეტრები და ნავთობის რეოლოგიური თვისებები		
2.1	ნავთობის ხარჯი ნავთობსადენში	Q	მ ³ /სთ
2.2	შეტბორვა სადგურის წინ	h_{Nar}	მ
2.3	ნავთობსადენის საანგარიშო სიგრძე	L_{Saan}	მ
2.4	ნავთობსადენის უბნის საწხისი და ბოლო ნიშნულების სხვაობა	Δz	მ
2.5	ნავთობსადენის უბნის ბოლო დაწნევა	h_{Nar}	მ
2.6	ნავტობის კინემატიკური სიბლანტე	v	მ ² /წმ
2.7	მილსადენის შიგა კედლის აბსოლუტური ექვავილენტური ხორკლიანობა	ε	მ

ზემოაღნიშნული მონაცემებია: ცენტრიდანული ტუმბოების სატუმბო აგრეგატების კონსრუქციული პარამეტრები, ტექნოლოგიური (ნავთობსადენის ჰიდრავლიკური მახასიათებლები) პარამეტრები, ხარჯი და ნავთობის რეოლოგიური თვისებებით

5.2. ნავთობსადენების და ცენტრიდანული ტუმბოების ტიპების მახასიათებლების დადგენა

ნავთობსადენის სადაწნეო უბნის ჰიდრავლიკური მახასიათებელი აიგება დაწნევების ბალანსის განტოლების (40) ფუძველზე:

$$\mathbf{H}_{\text{Xax}} = \mathbf{d}_0 \mathbf{Q}^2 + \mathbf{d}_1, \quad (108)$$

სადაც $\mathbf{d}_0 = \Delta \mathbf{z} + \mathbf{h}_{\text{Nar}} - \mathbf{h}_n$ - განისაზღვრება გეოდეზიური ვარდნილის, შეტბორვით სადგურის წინ და უბნის ბოლოში; $\mathbf{d}_2 = 1,02 \mathbf{f} \mathbf{Q}^{-m} \mathbf{L}_p$ - განისაზღვრება ჰიდრავლიკური ქანობით ერთეულოვანი ხარჯით, რომელიც განისაზღვრება ხარჯით კონკრეტული ჰიდრავლიკური რეჟიმით და მილსადენის საანგარიშო სიგრძით.

ჰიდრავლიკური ქანობით ერთეულოვანი ხარჯით განისაზღვრება ფორმულა (41)-ით:

$$\mathbf{f} = \frac{\beta \mathbf{v}^m}{\mathbf{D}^{5-m}}. \quad (109)$$

ნავთობსადენის უბნის დაპროექტებისას, აუცილებელი მწარმოებლობისა და დაწნევის მნიშვნელობების დასადგენად, ხდება სატუმბო მოწყობილობის შერჩევა და სქემის ჩართვა ჰიდრავლიკურ სისტემისათვის.

სატუმბო აგრეგატის ცენტრიდანული ტუმბოებისათვის, განისაზღვრება საპასპორტო დაწნევის (9) და მარგი ქმედების კოეფიციენტების მ (11) პოლინომიური მახასიათებლებით:

$$\mathbf{H} = \mathbf{a} - \mathbf{b} \mathbf{Q}^2, \quad (110)$$

$$\eta_{\text{H}} = \mathbf{c}_1 \mathbf{Q} + \mathbf{c}_2 \mathbf{Q}^2 + \mathbf{c}_3 \mathbf{Q}^3. \quad (111)$$

გამოვიყენოთ ეს მახასიათებლები და განისაზღვრება მწარმოებლობა და დაწნევა მაქსიმალური მქც-ებისათვის.

$$\begin{cases} Q_{\eta \max} = \frac{-c_2 - \sqrt{c_2^2 - 3c_1c_3}}{3c_3}; \\ H_{\eta \max} = a - bQ_{\eta \max}^2; \\ \eta_{\max} = c_1Q_{\max} + c_2Q_{\max}^2 + c_3Q_{\max}^3. \end{cases} \quad (112)$$

5.3. მაქსიმალური მარგი ქმედების კოეფიციენტის მქონე ცენტრიდანული ტუმბოების ნავთობსადენის სარეჟიმო პარამეტრების დადგენა

ცენტრიდანული მანქანების მსგავსების კანონების თანახმად, შესაძლოა აიგოს ცენტრიდანული ტუმბოების მუშა რეჟიმების მაქსიმალური მქც-ის წირი:

$$H = \frac{H_{\eta \max}}{Q_{\eta \max}^2} Q^2. \quad (113)$$

გამომდინარე გამოსახულებიდან განისაზღვრება სატუმბო სადგურის მუშა რეჟიმის ცენტრიდანული ტუმბოს აგრეგატის მაქსიმალური მქც:

$$\begin{cases} Q_p = Q_{\eta \max} \sqrt{\frac{d_0}{H_{\eta \max} - d_2 Q_{\eta \max}^2}}; \\ H_p = \frac{d_0 H_{\eta \max}}{H_{\eta \max} - d_2 Q_{\eta \max}^2}. \end{cases} \quad (114)$$

სატუმბო სადგურის ცენტრიდანული ტუმბოს მუშა თვლების ბრუნვის სიხშირე განისაზღვრება ფორმულა (54)-ით:

$$n = n_0 \sqrt{\frac{H_p + BQ_p^2}{A}}. \quad (115)$$

სარეჟიმო პარამეტრების გათვალისწინებით (114), ტუმბოს ლილვზე ბრუნვის სიხშირე ტოლია:

$$n = n_0 \sqrt{\frac{d_0 (H_{\eta \max} + BQ_{\eta \max}^2)}{A (H_{\eta \max} - d_2 Q_{\eta \max}^2)}}. \quad (4116)$$

ბრუნვის სიხშირის მნიშვნელობით (116), ფორმირდება ბრუნვის სიხშირის ცვლილების მართვის სისტემის სიგნალი. პროდუქტის გადასატუმბად, აუცილებელია გვექონდეს სადგურის მწარმოებლობა და დაწნევა, მილსადენის მახასიათებლის ცვლილება და ახალი ბრუნვის სიხშირეს კორექცია..

მეთოდი მისაღებია ცენტრიდანული ტუმბოს მარგი ქმედების კოეფიციენტის აშკარა მაქსიმუმის შემთხვევაში, ან ხარჯის დიდი დიაპაზონის ცვლილებისას. ამასთან დაკავშირებული, შემოთავაზებული ალგორითმი ვრცელდება ყველა ცენტრიდანული ტუმბოების ტიპებზე, რომლებსაც გააჩნიათ სიხშირით-მარეგულირებელი ამძრავად.

5.4. მაგისტრალური ნავთობსადენის სატუმბი სადგურის მუშაობის რეჟიმის რაციონალური შერჩევა, კუთრი ენერგოდანახარჯების საფუძველზე

მაგისტრალური ნავთობსადენის მუშაობის რეჟიმის რეგულირების მეთოდის შერჩევას და ექსპლუატაციისას დახარჯული ენერგიის სიდიდის რეალიზაციისას, შემუშავებულია აღნიშნული ალგორითმი, მაგისტრალური ნავთობსადენის დაპროექტობის სტადიაზე.

თვითეული რეგულირების მეთოდის განხილვისას კონკრეტული პირობების ექსპლუატაციისას, აუცილებელია დავადგინოთ თუ როგორ გაანგარიშდება პროდუქტის ერთი მოცულობის გადატუმბვის კუთრი ენერგოდანახარჯები. ე.ი. არსებობს რეგულირების მეთოდების ენერგოდანახარჯების შესაბამისი განმსაზღვრელი ფაქტორები (ნახ. 67).

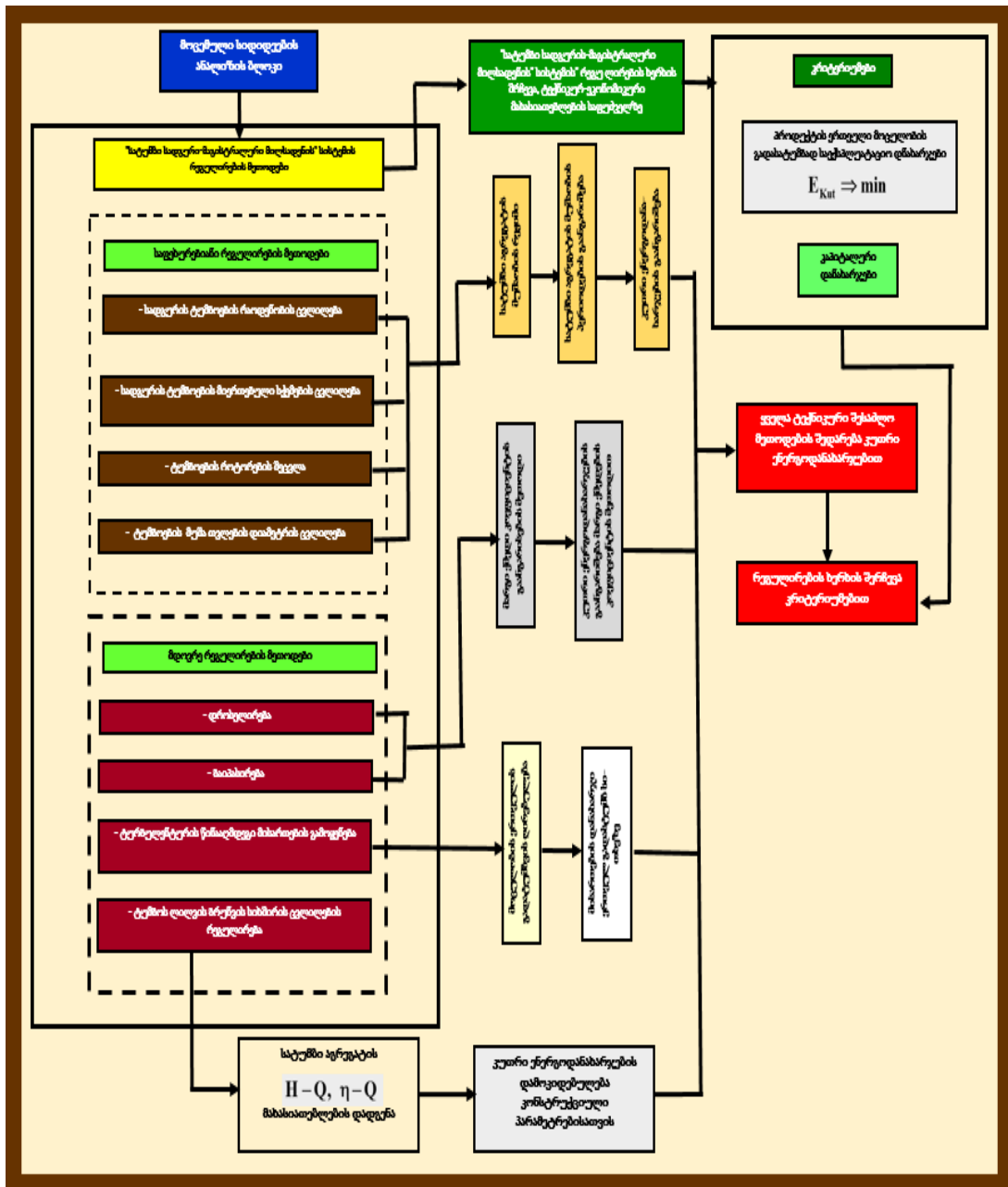
ენერგოდანახარჯები პროდუქტის გადატუმბვაზე განისაზღვრება:

- საფეხურებიანი რეგულირების მეთოდები:

$$E_{\text{Kut}} = \frac{E_{\text{Kut1}} T_1 Q_1 + E_{\text{Kut2}} T_2 Q_2}{T_{\text{Sr}} Q_{\text{Sr}}} = \frac{E_{\text{Kut1}} Q_1 (Q_2 - Q_{\text{Sr}}) + E_{\text{Kut2}} Q_2 (Q_{\text{Sr}} - Q_1)}{Q_{\text{Sr}} (Q_2 - Q_1)}. \quad (117)$$

- დროსელირების მეთოდი:

$$E_{Kut} = \frac{g(A - BQ_p^{2-m})}{m(c_1Q_p + c_2Q_p^2 + c_3Q_p^3)\eta_E\eta_{mec}} \quad (118)$$



ნახ. 67. „სატუმბო-სადგური-მილსადენის“ სისტემის რეგულირების მეთოდის შერჩევის სქემა, ტექნიკურ-ეკონომიკური ფაქტორების საფუძველზე

- ბაიპასირების მეთოდი:

$$E_{\text{Kut}} = \frac{g(1,02fQ_p^{2-m}L_p + \Delta z + h_{\text{Nar}} - h_{\text{ni}})}{m_H \eta_E \eta_{\text{Meq}} Q_p} \times \left[c_1 + c_2 \sqrt{\frac{h_{\text{ni}} + A - \Delta z - h_{\text{Nar}} - 1,02fQ_p^{2-m}L_p}{B}} + c_3 \left(\sqrt{\frac{h_{\text{ni}} + A - \Delta z - h_{\text{Nar}} - 1,02fQ_p^{2-m}L_p}{B}} \right)^2 \right]^{-1} \quad (119)$$

- ტურბულენტური საწინააღმდეგო მისართების გამოყენების მეთოდი:

$$E_{\text{Kut}} = \frac{g(1,02 \cdot 8\lambda_n / \pi^2 g D^5) Q_p^{2-m} L_p + \Delta z + h_{\text{Nar}} - h_{\text{ni}}}{m_n \eta} \quad (120)$$

- მუშა თვლების ბრუნვის სიხშირის ცვლილების მეთოდი:

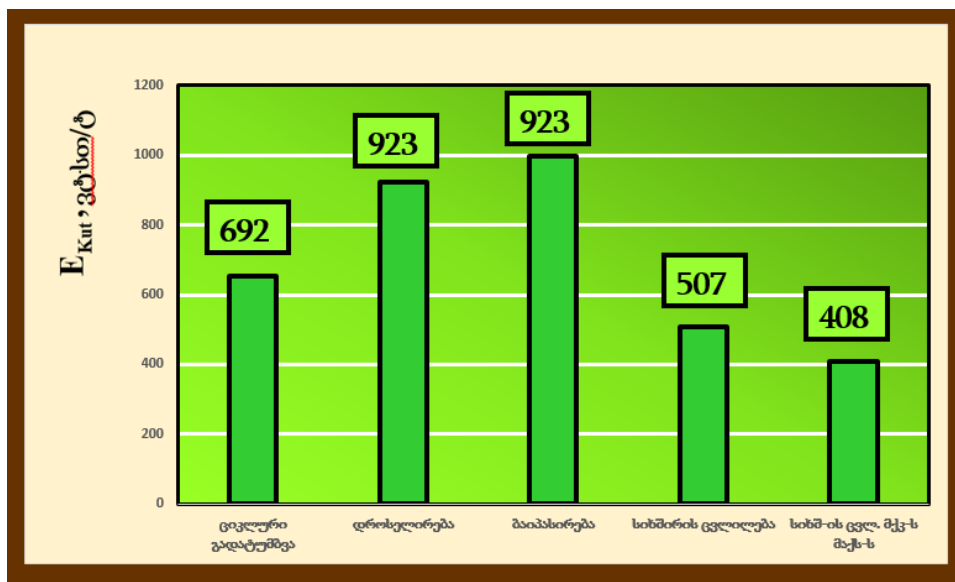
$$E_{\text{Kut}} = \frac{g \left[A \left(\frac{\omega_n}{\omega_{n0}} \right)^2 - B Q_p^2 \right]}{m_H \left[c_1 Q_p \frac{\omega_n}{\omega_{n0}} + c_2 \left(Q_p \frac{\omega_n}{\omega_{n0}} \right) + c_3 \left(Q_p \frac{\omega_n}{\omega_{n0}} \right)^3 \right]} \quad (121)$$

აგრეთვე, თვითეული მეთოდისათვის, საჭიროა გაანგარიშდეს მოწყობილობის შექმნისა და მონტაჟის კაპიტალური დანახარჯები.

საბოლოოდ, ტექნიკურ-ეკონომიკური კრიტერიუმების გაანგარიშების შემდეგ, თვითეული სისტემის „სატუმბო სადგური-მილსადენის“ რეგულირების ვარიანტისათვის, საჭიროა შედარდეს და შეირჩეს ყველაზე ნაკლებად ძვირადღირებული ვარიანტი.

მაგალითისათვის, განვიხილოთ კონკრეტული სატუმბო სადგური, აღჭურვილი სამი ტიპური, მიმდევრობით მიერთებული ცენტრიდანული ტუმბოთი (HM 7000-210). მიღებულია, რომ მილსადენის მწარმოებლობა არის 45 მლნ.ტ/წელი, პროდუქტის სიმკვრივე - 875 კგ/მ³, პროდუქტის კინემატიკური სიბლანტე - 36 მმ²/წმ, უბნის სიგრძე სატუმბო სადგურის შემდეგ - 120 კმ, მილსადენის შიგა დიამეტრი - 1 მ, უბნის საწყისი და ბოლო ნიშნულების სხვაობა -100 მ, შეტბორვა სადგურის წინ - 40 მ.

გადატუმბული პროდუქტის ერთი ტონას კუთრი დანახარჯები, გადანგარიშებული ერთი სატუმბი აგრეგატისათვის, რეგულირების სხვადასხვა მეთოდებით და ფორმულებით (117)-(121) (მოყვანილია ნახ. 68-ზე).



ნახ. 68. სატუმბი სადგურის სატუმბი აგრეგატის კუთრი ენერგოდანახარჯები, რეგულირების სხვადასხვა მეთოდების შემთხვევაში

ამგვარად, მაგისტრალური სატუმბი აგრეგატის მართვის მეთოდის შესაბამისად, შემუშავებულია სატუმბი სადგურის სატუმბი მოწყობილობის სარეჟიმო პარამეტრების საინჟინრო გაანგარიშების მეთოდი, რომელიც საშუალებას გვაძლევს ცენტრიდანული ტუმბოების მაქსიმალური მარგი ქმედების კოეფიციენტის მუშაობის სარეჟიმო პარამეტრების დადგენას. შემუშავებულია მაგისტრალური მილსადენის სატუმბი სადგურის მუშაობის რაციონალური რეჟიმის ალგორითმის შერჩევა, რომლის საშუალებით გათალისწინებულია სისტემის ექსპლუატაციის ენერგოდანახარჯების გავლენის დონის ფაქტორები და შედარდეს კუთრი ენერგოდანახარჯების სიდიდეები რეგულირების თვითთული მეთოდისათვის. მოყვანილია რეგულირების სხვადასხვა მეთოდების ერთ ტონაზე პროდუქტის კუთრი ენერგოდანახარჯების გაანგარიშების

მაგალითი, რომელიც გვიჩვენებს სატუმბო სადგურის სატუმბო აგრეგატის მუშა თვლების ბრუნვის სიხშირის ცვლილების რეგულირების ეფექტურობის მეთოდს, მარგი ქმედების კოეფიციენტის მაქსიმალური სიდიდით და ეფექტი გვიჩვენებს $\approx 20\%$ -ს.

დასკვნები

1. სატუმბი სადგურების მოწყობილობის სარეჟიმო პარამეტრების თეორიისა და პრაქტიკის თანამედროვე მდგომარეობის ანალიზის საფუძველზე, გამოვლენილია ცენტრიდანული ტუმბოების მარგი ქმედების კოეფიციენტის მაქსიმიზაციის და მილსადენის მუშაობის რეგულირების მეთოდები, რომელიც ამ საკითხების შესამუშევლად - არა საკმარისია.

2. განსხვავებით არსებული მეთოდებისაგან, ჩატარებულია მაგისტრალური მილსადენების არასტაციონარული მოძრაობის რაოდენობრივი მახასიათებლების კვლევა, რომლის დროსაც დადგინდა წინააღმდეგობის კოეფიციენტის შეფასება და დინამიკური პროცესის აღწერა ახალი ანალიზურ-რიცხვითი მეთოდით. მეთოდი ეფუძნება პროცესის რეალიზაციების გამოყენებას კუბური სპლაინ-ფუნქციების და შექმნილი გაანგარიშების ანალიზური ალგორითმის საშუალებით. იტერაცია სწრაფია და პროცესი თანდათანობით ილევს. ჩვენს მიერ განხორციელებული მეთოდოლოგია დაზუსტებულია, მარტივია და ექვემდებარება რიცხვითი ალგორითმის თვლას კომპიუტერზე და შესაძლოა მიღებული შედეგების გარდამავალი პროცესის მართვა. მიღებული მოდელი შეიძლება გამოყენებულ იქნას როგორც მეთოდოლოგიური საფუძველი, მაგისტრალური მილსადენის მართვის, ღონისძიებებისა და მონიტორინგის ჩასატარებლად.

3. შემუშავებულია სატუმბი აგრეგატების მართვის ახალი მეთოდი, რომელიც უზრუნველყოფს ცენტრიდანული ტუმბოს აგრეგატის ენერგოდაზოგვის ექსპლუატაციის რეჟიმს და მეთოდის რეალიზაციის სამი ვარიანტს: მარგი ქმედების კოეფიციენტის მაქსიმიზაცია, ბრუნვის სიხშირის კორექტირება და ჰიდრავლიკური მახასიათებლი.

4. შემუშავებულია „სატუმბი მოწყობილობა-მაგისტრალური მილსადენის“ სისტემის მუშაობის მათემატიკური მოდელი, რომელიც

საშუალებას გვაძლევს გაანგარიშდეს ცენტრიდანული ტუმბოს მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის ცვლილება.

5. შემუშავებულია სატუმბო სადგურის სატუმბო მოწყობილობის სარეჟიმო პარამეტრების საინჟინრო გაანგარიშების მეთოდი, რომელიც საშუალებას გვაძლევს განისაზღვროს მუშაობის სარეჟიმო პარამეტრები, მუშა თვლის ბრუნვის სიხშირის ცვლილების რეგულირებით, ცენტრიდანული ტუმბოს მარგი ქმედების კოეფიციენტის მაქსიმიზაციით.

6. შემუშავებულია მაგისტრალური მილსადენის სატუმბო სადგურის მუშაობის რაციონალური რეჟიმის ალგორითმის შერჩევა, რომლის საშუალებით გათალისწინებულია სისტემის ექსპლუატაციის ენერგოდანახარჯების გავლენის დონის ფაქტორები, რომლებიც უნდა შედარდეს კუთრი ენერგოდანახარჯების სიდიდეებთან რეგულირების თვითეული მეთოდისათვის. მოყვანილია რეგულირების სხვადასხვა მეთოდების ერთ ტონა პროდუქტზე კუთრი ენერგოდანახარჯების გაანგარიშების მაგალითი, რომელიც გვიჩვენებს სატუმბო სადგურის სატუმბო აგრეგატის მუშა თვლების ბრუნვის სიხშირის ცვლილების რეგულირების ეფექტურობის მეთოდს, მარგი ქმედების კოეფიციენტის მაქსიმალური სიდიდით და ეფექტი გვიჩვენებს $\approx 20\%$ -ს.

ლიტერატურა

1. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении и изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ. 2013. 46 с.
2. Энергетической стратегии России на период до 2030 года (электронный ресурс) – режим доступа <http://minenergo.gov.ru/activity/energostrategy/>.
3. Валиев М.А., Кутуков В.А., Шабанов В.А. Анализ использования электроэнергии при решении технологических задач перекачки нефти. Нефтегазовое дело. 2003. №1. с. 1-22.
4. Годовой отчет ОАО „АК „Транснефть“ за 2012 год“. http://www.transneft.ru/u/section_file/237/2012/pdf
5. Jiang D.J. Design And Application Of Automatic Monitoring System For Grude. Oil Pipeline Transportation. China. 2012. p. 128.
6. The Methodology and Benefits of Total Site Pinch Analysis. Linnhoff March Energy Services. 2000. (<http://www.linnhoffmarch.com/resources/technical.html>)
7. Kumana, J. 2000. Pinch Analysis – What, When, Why, How. Additional publications available by contacting jkumana@aol.com
8. Linnhoff March. 2000. The Methodology and Benefits of Total Site Pinch Analysis. Linnhoff March Energy Services. (<http://www.linnhoffmarch.com/resources/technical.html>)
9. Кутуков С.Е. Информаионно-аналитические системы магистральных трубопроводов. М., СИПРИА. 2002. 324 с.
10. Валиев М.А., Кутуков С.Е., Шабанов В.А. Анализ использования электроэнергии при решении технологических задач перекачки нефти. Нефтегазовое дело. 2003. №1. с. 1-22.
11. Ахметов Р.М. и др. Диспетчиризация и учет на нефткпроводах. М., Недра. 1976. 351 с.
12. Elvira M.B. Design of plant wide control systems with focus on maximizing Throughput. Trondheim. 2009. p. 126.
13. Kadam J.V. and all. Towards integrated dynamic real-time optimization and control of industrial processes. Proceedings Foundations of Computer-Aided Process Operations (FOCAPO@)#). Coral Springs. Florida. 2003. pp. 593-596.
14. Saving energy in the oil and gas industry. IPECA 2013. London. United Kingdam. www.ipeca.org
15. Mohinder K. Nayyar. Piping Handbook. McGraw-Hill. New York. Jersey. 1998.

16. World Energy Outlook. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)/International Energy Agency (IEA) 2011. Paris.
17. Федоров П.В. Совершенствование методов планирования технологических режимов и контроля процесса транспортировки нефти по магистральным нефтепроводам. Дисс. Канд.техн.наук. Ухта. 2011. 130 с.
18. Gomez Cuenca F. and all. Energy-Savings Modeling of Oil Pipelines That Use Drag-Reducing Additives Compañía Logística de Hidrocarburos (CLH), Central Laboratory. Madrid, University of Oviedo, Spain. *Energy Fuels*, 2008, 22 (5), pp. 3293–3298.
19. Wendy J. Palen and all. Energy: Consider the global impacts of oil pipelines. 2014. <https://www.nature.com/news/energy-consider-the-global-impacts-of-oil-pipelines-1.15434>
20. Poiner A. and Zaccor G. Maritime and Pipeline Transportation of Oil and gas. 1991. Paris.
21. Energy Policies of IEA Countries. Japan. International Energy Agency. France. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyPoliciesofIEACountriesJapan2016.pdf>
22. Energy Efficiency Improvement in the Petroleum Refining Industry Ernst Worrell, Ecofys Christina Galitsky, Lawrence Berkeley National Laboratory. 2005 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry. pp. 4-158 – 4-169. http://aceee.org/files/proceedings/2005/data/papers/SS05_Panel04_Paper14.pdf
23. Lahn G. and all. Saving Oil and gas in the Gulf. A Chatham House Report. 2013. https://www.chathamhouse.org/sites/files/chathamhouse/public/Research/Energy,%20Environment%20and%20Development/0813r_gulfoilandgas.pdf
24. Ugursal I. Efficient Transportation of Energy. 2015. http://poisson.me.dal.ca/site2/courses/mech4340/MECH4340_TransportationOfEnergy.pdf
25. Brandt A.R. Oil Depletion and the Energy Efficiency of Oil Production: The case of California. Department of Energy Resources Engineering. Stanford University. Stanford. 2011.
26. Gary, J.H. and G.E. Handwerk. 1994. Petroleum Refining: Technology and Economics, 3rd edition, Marcel Dekker, Inc., New York, NY.
27. Worrell E. and C. Galitsky. 2005. Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Petroleum Refineries. An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL-56183).
28. Коршак А.А., Нечваль А.М. Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов. Учебник для вузов. СПб Недр. 2008. 488 с

29. Краус Ю.А. Проектирование и эксплуатация магистральных нефтепроводов. Омск. ОмГТУ. 2010. 102 с.
30. Колпаков Л.Г. Эксплуатация магистральных насосов. Учебное пособие. Уфа. УГНТУ. 1988. 116 с.
31. Твердохлеб И.Б. Нефтяные магистральные насосы, параллельное и последовательное включение на НПС. Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2011. «2. с. 17-19.
32. Пфлейдерер К. лопаточные машины для жидкостей и газов: водяные насосы, вентиляторы, турбовоздуходувки, турбокомпрессоры. М. Машиностроение. 1960. 684 с.
33. Спектор Ю.И. ВНИИСТ – генеральный проектировщик нефтепровода „Ямал“. Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2009. №1. с. 8-15.
34. Алексеев В.В. Рудничные насосные, вентилярные и пневматические установки: Учебное пособие для вузов. М., Недра. 1983. 381 с.
35. Bachus L., Custodio A. Know and understand centrifugal pumps. Elsevier Advanced Technology. The Boulevard, Langford Lane, Kidington, Oxford UK. 2003. 265 p.
36. Mikaelian E.A. and, Saif A. M. Evaluation of Energy Efficiency, Energy Consumption and Energy Saving in the Production of Oil, Gas and Energy Sectors. [International Journal of Energy and Power Engineering](#). Volume 5, Issue 1, February 2016, Pages: 1-5.
37. Mikaelian E.A. "Harmonisation of the Characteristics of Gas-Turbine and Gas Centrifugal Compressors regarding the Mechanical Power losses in Transmission from the Drive", Quality Management in the Oil and Gas Industry, № 1, 2015, pp. 15-18.
38. Mikaelian E.A. "Recourse-saving technologies of gas transportation", Quality Management in Oil and Gas Industry, № 2, 2012, pp. 12-13.
39. Бувалый Г.Е. Как управлять транспортированной нефти? Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2007. №2. с. 84-85.
40. Гумеров А.Г. и др. Эксплуатация оборудования нефтеперкачивающих станций. М.. Недра. 2001. 476 с.
41. Куликова Л.В., Андронов А.Л. Ползуновский альманах. 2004. №1. с 104-109
42. Богданов Р.М. Диагностика потребления электротенергии в трубопроводном транспорте нефти. Нефтегазовое дело. 2012. №3.
http://www.ogbus.ru/authors/Bogdanov/Bogdanov_3.pdf

43. Коршак А.А., Нечваль А.М. Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов. Учебник для вузов. СПб Недра. 2008. 488 с.
44. Вязунов Е.В. исследование некоторых вопросов динамики работы и оптимального управления магистральными нефтепродуктопроводами. Автор. Дисс.канд.техн.наук. М.. 1970 . 25 с.
45. Туманский А.П. Оптимизация режимов транспортировки углеводородных жидкостей по трубопроводам и промежуточными станциями, оборудованными частотно-регулируемым приводом. Дисс.канд.техн.наук. М.. 2008. 137 с.
46. Айзенштейн М.Д. Центробежные насосы для нефтяной промышленности. М., Гостехиздат. 1957. 363 с.
47. Tyler G., Hicks P.E. Pump Application Engineering. USA: McGraw-Hill. 1971. 440 p.
48. Керимов М.З. Трубопроводы нефти и газа. М., Наука. 2002. 256 с.
49. Михайлов А.К., Малюшенко В.В. Конструкции и расчет центробежных насосов высокого давления. М., Машиностроение. 1971. 304 с.
50. Пфлейдерер К. Лопаточные машины для жидкостей и газов: водяные насосы, вентиляторы, турбовоздуходувки, турбокомпрессоры. М. Машиностроение. 1960. 684 с.
51. Степанов Л.И. Центробежные и осевые насосы. М., ГНТИМА. 1960. 468 с.
52. Вайншток С.М. и др. Трубопроводный транспорт нефти, в 2 т. М., Недра. 1 т. 407 с.
53. Карелин В.Я., Минаев А.В. Насосы и насосные станции. Учебник для вузов. М., Стройиздат. 1986. 320 с.
54. Колпаков Л.Г. Эксплуатация магистральных насосов. Учебное пособие. Уфа. УГНТУ. 1988. 116 с.
55. Benra F.R. measurement of the characteristics of centrifugal pump. Pfqtikal course Turbomachinery. University Duisburg-Esson. 42 p.
56. РД-75.180.00-КТН-198-09. Унифицированные технологические расчеты объектов магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов. Гипротрубопровод. 2009. 207 с.
57. Жуковский Н.Е. Полное собрание сочинений. Гидравлика. Том VII. М., Главн.ред.авиайионной лит. 1937. 91 с.
58. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транчпорта нефти, рнефтепродуктов и газа. Учебное пособие. М., ФГУП Изд. Нефть и газ. РГУ нефти и газа И.М. Губкины. 2003. 336 с.

59. Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах. М., Энергоиздат. 1981. 248 с.
60. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М., Гос. Изд. Техничко-теор. Литературы. 1951. 225 с.
61. Роттэ А.Э. Графоаналитические методы расчета переходных процессов в нефтепроводах. Уфа. Уфимский нефтяной институт. 1975. 42 с.
62. Роттэ А.Э. Переходные процессы в нефтепроводах. Уфа. Уфимский нефтяной институт. 1975. 43 с.
63. Построить интерполяционный многочлен Лагранжа – Pascal.
<http://www.cyberforum.ru/pascal/thread131410.html>
64. Приближение функций. Интерполяционный кубический сплайн. Экстремальное свойство интерполяционного кубического сплайна. Эффективный способ интерполяционного кубического сплайна построения по значениям его вторых производных. Некоторые приложения сплайнов.
http://cs.usu.edu.ru/home/akazakov/07.computational_experiment/exam/02_15.pdf
65. Корнейчук Н.П. Сплаины в теории приближения. М.:Наука. 1984. 351 с.
66. Аппроксимация функции с помощью сплайна Безье. <http://eax.me/bezier-spline/>
67. Построение кубического сплайна функции. <http://5ballov.qip.ru/referats.php?>
68. ლომიძე ი., მამასახლისი ვ., ნამგალაძე დ. დაუმყარებელი სადაწნო მოძრაობის პარამეტრების განსაზღვრა რობინს-მონროს მეთოდით //საქართველოს ეროვნული ენერგეტიკული აკადემიის ჟურნალი "ენერჯია", #2, თბილისი, 1996, გვ.51-54.
69. <http://xuvictory08.en.made-in-china.com/product/YbQxqPvAbZVS/China-Thermal-Oil-Pump-LQRY-.html>
70. PUMP: LQRY.
https://www.google.ge/search?q=PUMP:+LQRY&biw=1920&bih=979&tbm=isch&bo=u&source=univ&sa=X&ei=gA-dVYGZAcipywPg_7rgCg&ved=0CDoQsAQ&dpr=1#imgsrc=upF8xaSOQjsh4M%3A
71. Sandpiper Air-Operated Double Diaphragm Pump.
http://www.northerntool.com/shop/tools/product_200322263_200322263
72. Многоступенчатые насосы ЦН400-105.
<http://www.rimos.ru/catalog/pump/12833>
73. Oil fuel pumps НК and НКВ types.
<http://www.kharkovmash.com/en/production/pumps-for-oil-and-petroleum-products.html>

74. Oil and natural gas treatment facilities. <http://www.mastec.com/en/projects/oil-gas/compressor-pumping-stations.aspx>
75. Pump Station wet wells. <http://www.expertwatercf.com/?q=content/applications/pumpstations&gclid=CKr5Y7628MCFUT3wgodoncAow>
76. Pipeline transport. https://en.wikipedia.org/wiki/Pipeline_transport
77. Omega/Omega^R. <http://www.afcomp.ru/pdf/ksb/omega.pdf>
78. Насосы для воды горизонтальные двустороннего входа 1Д 1250-125. <http://www.rimos.ru/catalog/pump/11332>
79. Коршак А.А., Нечваль А.М. Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов. Учебник для вузов. СПб Недра. 2008. 488 с.
80. Краус Ю.А. Проектирование и эксплуатация магистральных нефтепроводов. Омск. ОмГТУ. 2010. 102 с
81. Тетельмин В.В., Язев В.А. Нефтегазопроводы. М., Граница. 2008. 256 с.
82. Шабанов В.А., Бондаренко О.В. Целевые функции и критерии оптимизации перекачки нефти по нефтепроводам при частотно-регулируемом электроприводе магистральных насосов. Нефтегазовое дело. 2012. № 4. с. 10-17.
83. Шабанов В.А. и др. Постановка задачи структурно-параметрической оптимизации перекачки нефти по нефтепроводам при частотно-регулируемом электроприводе. Нефтегазовое дело. 2013. № 6.
- http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_19.pdf
84. Блантер С.Г., Суд И.И. Электрооборудование нефтяной и газовой промышленности. Учебник для вузов. М., Недра. 1980. 478 с.
85. Штейнмиллер О.А. Оптимизация повысительного насосного оборудования в системах водоснабжения. Промэнерго. <http://www.promenergo.spb.ru/info/optimization.php>
86. Р 50-605-91-94 Рекомендации по стандартизации „Энергосбережение. Агрегаты насосные для транспорта нефти. Нормативные коэффициенты полезного действия“. М., ВНИИСтандарт. 1994. 6 с.
87. Шаммазов А.М. и др. Проектирование и эксплуатация насосных и компрессорных станций. М., Недра. 2003. 404 с.
88. Онищенко Г.Б. Электрический привод. Учебник для вузов. М., РАСХН. 2003. 320 с.
89. Сыромятников И.А. Режим работы асинхронных и синхронных двигателей. М., Энергофтомиздат. 1984. 240 с.

90. Чиликин М.Г. и др. Теория автоматизированного электропривода. М., Энергия. 1979. 615 с.
91. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного траншпорта нефти, нефтепродуктов и газа. Учебное пособие. М., ФГУП Изд. Нефть и газ. РГУ нефти и газа И.М. Губкины. 2003. 336 с.
92. Степанов А.Г. Динамика машин. Екатеринбург. УрО РАН. 1999. 302 с.
93. Колпаков А.Г. Эксплуатация магистральных насосов. Учеб. Пособие. Уфа. 1988. 116 с.
94. Коршак А.А., Нечваль А.М. Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов. Учебник для вузов. СПб. 2008. 488 с.
95. მანდარია გ. სითხის მილსადენში დაუმყარებელი მოძრაობის აღმწერი განტოლებების ანალიზი. "ენერჯია". 2013, № 4, გვ. 38-41.
96. ნამგალაძე დ., მანდარია გ. მაგისტრალურ მილსადენებში დაუმყარებელი მოძრაობის ჰიდრავლიკური წინაღობის კოეფიციენტის დადგენა. GEN. 2014, №4 (72), გვ. 59-61.
97. მანდარია გ. მილსადენში არასტაციონარული პროცესის ჰიდრავლიკური კოეფიციენტის დადგენის რიცხვითი მეთოდის შემუშავება, პროცესის რეალიზაციების შესაბამისად. "ენერჯია". 2013, № 4, გვ. 59-62.
98. ნამგალაძე დ., მანდარია გ. მილსადენში არასტაციონარული პროცესის ექსპერიმენტალური გამოკვლევები, ქ. ქუთაისის წყალმომარაგების სისტემის მილსადენის მაგალითზე. GEN. 2015, №4 (76), გვ. 57-61.
99. ნამგალაძე დ., მანდარია გ. მაგისტრალური მილსადენის სისტემის ჰიდრომექანიკური ფაქტორების გამოვლენა და ენერგოდამზოგავი რეჟიმების დასაბუთება. "ენერჯია". 2017, № 4 (84), გვ. 76-82.
100. მანდარია გ. Determination of experimental factor of unsteady motion hydraulic resistance in main pipelines. საერთაშორისო კონფერენციის - "მექანიკა 2014" - შრომების კრებული, #2(55). 19-21 ივნისი, 2014, თბილისი, საქართველო, გვ. 137-141.
101. ნამგალაძე დ., მანდარია გ. მაგისტრალურ მილსადენში გარდამავალი პროცესის გაანგარიშება, ტუმბოს მყისი გათიშვისას. მესამე საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის - „ენერჯეტიკა; რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები“ - შრომების კრებული. 2015 წლის 23-25 ოქტომბერი. ქუთაისი, საქართველო., გვ. 244-247.