



საქართველოს ტექნიკური
უნივერსიტეტი
1922 წლიდან

თამაზ ღვანიძე

მაგისტრალური გაზსადენის ენერგოდაზოგვის საიმედოობის და ეფექტურობის გამოკვლევა

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: „ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“

შიფრი: 0713

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, თბილისი, 0160, საქართველო

2022 წ.

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ფაკულტეტი: ენერგეტიკის

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით თამაზ ღვანიძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „მაგისტრალური გაზსადენის ენერგოდაზოგვის საიმედოობის და ეფექტურობის გამოკვლევა“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის საინჟინრო, ტექნოლოგიური და საბუნებისმეტყველო საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

-----, ----- 2022 წელი

სამეცნიერო ხელმძღვანელი/ხელმძღვანელები: პროფესორი ლ. შატაკიშვილი

რეცენზენტი: _____

რეცენზენტი: _____

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2022 წ.

ავტორი: თამაზ ღვანიძე

დასახელება: „მაგისტრალური გაზსადენის ენერგოდაზოგვის საიმედოობის და ეფექტურობის გამოკვლევა“

სადოქტორო პროგრამა: „ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია“

მისანიჭებელი კვალიფიკაცია: ენერგეტიკის და ელექტროინჟინერიის დოქტორი

სხდომა ჩატარდა: _____

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემომოყვანილი 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

გაზის ტრანსპორტირების სისტემის ტექნიკური მდგომარეობის და მთლიანობის მართვა მნიშვნელოვანი ამოცანაა. მისი ეფექტურობა დიდწილად დამოკიდებულია დეფექტებისა და მათი პარამეტრების არსებობის ტექნიკურ დიაგნოზირებაზე დროში, მონაცემების მოპოვების საიმედოობისა და ეფექტურობის შესაბამისად. გაზსადენების სისტემების ტექნიკური მდგომარეობის კონტროლი და მონიტორინგი მოიცავს: მისახმარის, ნორმალურ და დაღლილობის პერიოდს, მაგისტრალური გაზსადენების საიმედო და უსაფრთხო მოქმედების უზრუნველყოფის საკითხები გავლენას ახდენს არა მხოლოდ გაზსადენების სატრანსპორტო სისტემაზე, არამედ ბევრ სხვა დარგებზე და ასევე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ქვეყნის ენერგეტიკის განვითარების ჩამოყალიბებული კონცეფციის მიზნების მიღწევაზე. მაგისტრალურ გაზსადენებში მიმდინარე პროცესები - სტოქასტიკურია, სტოქასტიკურია ტრანსპორტირების-გაზმომარაგების-მოხმარების პროცესები, ბუნებრივი გაზის შემადგენლობა და ა.შ. ცხადია, რომ ამ პროცესის მართვა ხდება მოვლენების ტრენდებით და საშუალო პარამეტრების მიხედვით. ამიტომ, როგორც წესი, პარამეტრები ითვლება დეტერმინირებლად და მიღებულია პარამეტრების მათემატიკური მოლოდინები.

ნაშრომში განხილულია სტოქასტიკური მოვლენები, ნატურული მონაცემების შესაბამისად: 1. საქართველოში აზერბაიჯანიდან და რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის თბოუნარიანობის, სიმკვრივის, გაზის შემადგენლობის და შესაბამისად, ვობბეს რიცხვის სტატისტიკური (ალბათური) შედეგები; 2. აჭარის მაგისტრალური გაზსადენში შიგა წნევის კვლევა და შესაბამისად ამ სიდიდის ამოვარდნების შემუშავება და ანალიზი.

სადისერტაციო ნაშრომის კვლევის ობიექტი და მეთოდები შემდეგია: კვლევის ობიექტია საქართველოს გაზის სექტორის მაგისტრალური გაზსადენებით (ჩრდილოეთი-სამხრეთი მაგისტრალური გაზსადენი, სამხრეთი მაგისტრალური გაზსადენი და აჭარის მაგისტრალური გაზსადენი) ბუნებრივი გაზის მიწოდების ხარისხის მაჩვენებლების დადგენის კვლევა. აგრეთვე აღნიშნული გაზსადენებში გატარებული ბუნებრივი გაზის სტოქასტიკური პარამეტრების და კომპონენტების (წნევა, ხარჯი, სიმკვრივე, თბოუნარიანობა, ვობბეს რიცხვი) კვლევა. კვლევების შედეგების მისაღებად, ნაშრომში გამოიყენება ალბათობის განაწილების ფუნქციები და ამოვარდნების თეორიის მეთოდები.

აგრეთვე, სადისერტაციო ნაშრომში დასმული პრობლემების და ამოცანების გადაჭრისას გამოყენებულ იქნა ჰიდროდინამიკის ძირითადი პრინციპები, ასევე ალბათობის სტატისტიკური მეთოდები, მწკრივების თეორია, მაგისტრალური გაზსადენების ოპტიმიზაციის პრობლემების გადაჭრის მეთოდები და სხვა.

ნაშრომში განხილულია კვლევის ამოცანები: ჩატარდა ნატურულ მონაცემებზე დამყარებული შემოსული ბუნებრივი გაზის მიწოდება-მოხმარების ხანგრძლივი პერიოდის მქონე მწკრივების სტატისტიკური დამუშავება და ალბათური მახასიათლებების მნიშვნელობების და შესაბამისი ფუნქციების დადგენა. მოხდა ბუნებრივი გაზის თბოუნარიანობის და შიგა წნევის ამოვარდნების რაოდენობის დროითი მწკრივების სტოქასტიკური სიდიდეების დამუშავება. დადგინდა ბუნებრივი გაზის ვობბეს რიცხვის ურთიერთჩანაცვლების დიაგრამა ზოგადად და კერძოდ საქართველოსათვის.

ნაშრომის ძირითადი შედეგები და სიახლეს წარმოადგენს: სტატისტიკური ინფორმაცია გაზსადენების ცალკეული უბნების მტყუნებების შესახებ, ექსპლუატაციისას წარმოდგენილია დროითი დინამიკური მწკრივების სახით, რაც საშუალებას გვაძლევს შევაფასოთ მათი ცვლილებების ტენდენციები. ნაშრომში განხილულია ნატურულ მონაცემებზე დაფუძნებული საქართველოში შემოსული ბუნებრივი გაზის მიწოდება-მოხმარების ხანგრძლივი პერიოდის მქონე მწკრივების სტატისტიკური დამუშავება და ალბათური მახასიათლებების (ბუნებრივი გაზის თბოუნარიანობა, სიმკვრივე, გაზის შემადგენლობის სტატისტიკური მაჩვენებლები, გაზსადენის შიგა წნევის სიდიდეები და ა.შ.) მნიშვნელობების და ფუნქციების დადგენა. იდენტიფიცირებულია და გამოვლინდა ისეთი ფაქტორები და კანონზომიერებები, რომლებიც აერთიანებს საექსპლუატაციო მახასიათებლებს, კერძოდ, ბუნებრივი გაზის შემადგენლობის ქიმიური ნაერთების ოდენობის სტატისტიკური მახასიათებლები, უშუალო საწვავის წვის ფაქტორები, კერძოდ, ვობბეს რიცხვთან დაკავშირებით: დადგენილია ბუნებრივი გაზის ვობბეს რიცხვის ურთიერთჩანაცვლების მეთოდიკა და აგებულია შესაბამისი დიაგრამა. შემუშავდა, საქართველოში გაზის სექტორის ენერგეტიკული ბაზრის, არსებული ენერგეტიკული პოტენციალის, კერძოდ ვობბეს რიცხვის დიაგრამის არეს ალგორითმი.

შედეგების გამოყენების სფერო და მისი რეალიზაცია შემდეგია: პირველად შემუშავებული მოდელის საფუძველზე მაგისტრალური გაზსადენის ნატურული სტატისტიკური მონაცემებით, შესწავლილი იქნა ახალი მეთოდის ფორმირების მექანიზმი და გაზსადენის შიგა წნევის დროითი მწკრივების დამოკიდებულებები, კერძოდ გაზსადენის შიგა წნევის სტატისტიკური მწკრივები და ამ სიდიდეების ამოვარდნების თეორიაზე დაფუძნებული მეთოდი. მიღებული მეთოდი საშუალებას გვაძლევს გაიცეს მაგისტრალური გაზსადენისთვის პრაქტიკულ რეკომენდაციები, რაც გაახანგრძლევს აღნიშნული ობიექტის დანიშნულ რესურსს.

ნაშრომში ასევე პირველად იქნა შემოთავაზებული საქართველოში შემოსული ბუნებრივი გაზის მიწოდება-მოხმარების ხანგრძლივი პერიოდის მქონე მწკრივების (თბოუნარიანობა, სიმკვრივეს, გაზის შემადგენლობის მაჩვენებლები) სტატისტიკური დამუშავება და ალბათური მახასიათლებების მნიშვნელობების და ფუნქციების დადგენა. იდენტიფიცირებულია და გამოვლინდა უშუალოდ საწვავის წვის პროცესის მახასიათებლებთან და კერძოდ, ვობბეს რიცხვთან დაკავშირებული ფაქტორები და კანონზომიერებები, რომელთა მეშვეობით დადგენილია საქართველოში ბუნებრივი გაზის ვობბეს რიცხვის ურთიერთჩანაცვლადობის მეთოდიკა და შემუშავდა საქართველოში ვობბეს რიცხვის არეს დიაგრამის ალგორითმი.

Abstract

Managing the technical condition and integrity of the gas transmission system is an important task. Its effectiveness largely depends on the technical diagnosis of defects and the availability of their parameters over time, on the reliability and efficiency of data mining. Control and monitoring of the technical condition of gas pipeline systems includes periods of early failure, normal and fatigue. The issues of reliable and safe operation of main gas pipelines affect not only the gas transportation system, but also many other industries, and also have a significant impact on the concept of the country's energy development. The current processes on the main gas pipelines are stochastic, stochastic transport and gas supply processes, the composition of natural gas, etc. It is clear that this process is controlled by event trends and average parameters. Therefore, the parameters are usually considered to be deterministic and the mathematical expectations of the parameters are accepted.

The paper considers stochastic events in accordance with natural data: 1. Statistical (probable) results of the heat capacity, density, gas composition and, consequently, the Wobbe number coming to Georgia from Azerbaijan and Russia; 2. Study of the internal pressure in the main gas pipeline of Adjara and, accordingly, the development and analysis of falls of this magnitude.

Object and methods of dissertation examination: The purpose of the dissertation is to study the indications of the quality of the natural gas composition on the main gas pipeline (main gas pipeline North-South, main gas pipeline South and Adjara main gas pipeline). Also study the stochastic parameters these pipelines and components of natural gas (pressure, flow rate, density, heat capacity, Wobbe number). In order for the results to be obtained in the statistic, the functions of probability distribution and analysis of falls of this magnitude are used.

Also, when solving problems set in dissertations, the basic principles of hydrodynamics are used, as well as probability-statistical methods, theory of sequence, methods of solving problems, optimization of the main gas pipeline and others.

The paper discusses the tasks of the study: statistical processing of sequences of natural gas supply - consumption values with a long period of columns based on field data and determination of the values and the corresponding functions of probabilistic characteristics. The stochastic values of the time values of the heat capacity of natural gas and the number of internal pressure drops were processed. In general, and in particular for Georgia, a natural gas interchangeability scheme has been established.

The main results and novelty of the article are: Statistical information on the inaccuracies of certain parts of the pipeline in the process of exploitation presented in terms of time dynamics succession, which allows to assess the tendencies and their changes.

In the dissertation are considered on the basis of natural data Statistical processing of long-term series of supply-demands of natural gas in Georgia and determination of values and functions of probabilistic characteristics (natural gas heat capacity, density, gas composition statistics, internal pressure values). Are identified factors and patterns that combine operational characteristics, in particular, statistical characteristics of the amount of chemical compounds in natural gas. The method of interchangeability of the Wobbe

number of natural gas is established and the corresponding diagram is constructed. An algorithm has been developed for the energy market of the gas sector of Georgia, the existing energy potential, in particular the area of the Wobbe number diagram.

The scope of the obtained results and its implementation: On the basis of the first developed model based on the natural statistics of the main gas pipeline, the mechanism for the formation of a new method and the dependences of the pipeline pressure time indicators, in particular, the statistical series of the internal pressure of the pipeline and the method based on the theory of loss of these values, was studied . The resulting methodology allows us to issue practical recommendations for the main gas pipeline, which will extend the assigned resource of the facility.

Also, for the first time, statistical processing of long-term series of natural gas supplies and costs (indicators of heat capacity, density, gas composition) and the establishment of values and functions of probabilistic characteristics are proposed for the first time.

The characteristics and patterns directly related to the process of fuel combustion, in particular the Wobbe number, are revealed, by means of which the method of interchangeability of the Wobbe number of natural gas in Georgia and the algorithm for calculating the Wobbe number are established.

შესავალი	18
თავი 1. მაგისტრალური გაზსადენების სისტემის თეორიისა და პრაქტიკის თანამედროვე მდგომარეობა და საიმედოობისა და ენერგოდაზოგვის თანამედროვე კვლევების მიმოხილვა	22
1.1. მაგისტრალური გაზსადენების სისტემის თეორიისა და პრაქტიკის თანამედროვე მდგომარეობა	22
1.2. მსოფლიო ენერგეტიკის განვითარების რესურსებისა და ეკოლოგიური შეზღუდვები	31
თავი 2. გაზის სექტორში წვის პროცესებისა და ვობხეს რიცხვის დიაგრამების ანალიზი	37
2.1. გაზის სექტორში წვის პროცესების ანალიზი	37
2.1.1. დელბურის სისტემა	38
2.1.2. ჯილბერტ-პრიგის დიაგრამა	41
2.1.3. ვივერის სისტემა	43
2.1.4. ნოის ფორმულები	44
2.2. გაზის ურთიერთჩანაცვლების განსაზღვრის სხვა სისტემები და შედარებითი შეფასება	45
თავი 3. საქართველოში ბუნებრივი გაზის სექტორში სტოქასტიკური პროცესები	53
3.1. ბუნებრივი გაზის სტოქასტიკური პროცესები, მათი მეთოდების მოდიფიცირება და გამოყენება	53
3.2. მაგისტრალურ გაზსადენებში სტოქასტიკური პროცესების ამოვარდნების დამოკიდებულების ანალიზური დადგენა	58
3.3. საქართველოში ბუნებრივი გაზის მიწოდების პროცესის დინამიკის ალბათური მახასიათებლების დადგენა	73
3.4. ბუნებრივი გაზის დინამიკური მახასიათებლების მწკრივის ამოვარდნების რაოდენობის დადგენა	88
თავი 4. აჭარის მაგისტრალური გაზსადენის სტოქასტიკური პროცესის ანალიზი	96
4.1. აჭარის მაგისტრალური გაზსადენის შიგა წნევის სტოქასტიკური მწკრივის სტატისტიკური მახასიათებლების დადგენა	96
4.2. აჭარის მაგისტრალური გაზსადენის შიგა წნევის სტოქასტიკური მწკრივის ამოვარდნების რაოდენობის დადგენა	100

4.3. აჭარის მაგისტრალურ გაზსადენში ბუნებრივი გაზის ხარჯის დინამიკური მწკრივის სტოქსტიკური მახასიათებლების დადგენა	104
თავი 5. საქართველოში შემოსული ბუნებრივი გაზის ჩანცვლადობის ანალიზი და ვობზეს რიცხვის თვისებრივი დიაგრამის დადგენა	109
5.1. ზოგადი საწვავი აირების უმაღლესი და უმდაბლესი ვობზეს რიცხვების დადგენა	109
5.2. საქართველოში აზერბაიჯანიდან და რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვობზეს რიცხვის სტოქსტიკური მახასიათებლების ანალიზი და თვისებრივი კრიტერიუმების დადგენა	114
5.3. ურთიერთჩანაცვლადობის კრიტერიუმების (ვობზეს რიცხვი, სიმკვრივე და ა.შ.) დიაგრამის ალგორითმის შემუშავება	119
თავი 6. საქართველოში ბუნებრივი გაზის ტარიფის მსოფლიო გამოცდილება და რეკომენდაციები, ვობზეს რიცხვის გათვალისწინებით	132
დასკვნები და რეკომენდაციები	147
ლიტერატურა	150

ცხრილების ნუსხა

83.

ცხრილი 1. ვობზეს რიცხვი და და მოთხოვნილი ჰაერის წვის კოეფიციენტების სცენარები (მაგალითი)	24
ცხრილი 2. ბუნებრივი გაზის მიწოდება საქართველოში	26
ცხრილი 3. კომპრესორულ სადგურებსა და ხაზოვან უბნებზე დანაკარგების განაწილებას	29
ცხრილი 4. ბუნებრივი გაზის კონვენციალური მარაგები და რესურსები	34
ცხრილი 5. დელბურის პარამეტრები	40
ცხრილი 6. ტიპური ბუნებრივი გაზის წვის ურთიერთჩანაცვლადობის პარამეტრები	48
ცხრილი 7. ბუნებრივი აირის საგამოცდო ლაბორატორიის მონაცემების ჩატარებული გამოცდების მეთოდები და ნორმატიული დოკუმენტები	76
ცხრილი 8. დროითი მწკრივის ინტერვალების დადგენა	82
ცხრილი 9. მწკრივის ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია.....	83
ცხრილი 10. ჰისტოგრამისა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია (აზერბაიჯანი)	85
ცხრილი 11. ჰისტოგრამისა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია (რუსეთი)	86
ცხრილი 12. სააწესისი მწკრივის პარამეტრები	88
ცხრილი 13. პროპორციული საშუალო გადახრის მნიშვნელობები	92
ცხრილი 14. თბოუნარიანობის შემთხვევითი მწკრივის ზედა დონის ალბათური მახასიათებლები	93
ცხრილი 15. ამოვარდნების (ქვევიდან - ზევით) რიცხვის $n(h)$ რაოდენობა.....	94
ცხრილი 16. შიგა საათური წნევის მწკრივის პარამეტრები	98
ცხრილი 17. მაგისტრალურ გაზსადენში შიგა წნევის მწკრივის ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია	99

ცხრილი 18. შიგა წნევის ამოვარდნების მახასიათებლები	103
ცხრილი 19. შიგა წნევის ამოვარდნების რიცხვის $n(C)$ ოდენობა, სხვადასხვა ბიჯისათვის	103
ცხრილი 20. ბუნებრივი გაზის ხარჯის მწკრივის სტატისტიკური მახასიათებლები	104
ცხრილი 21. მაგისტრალურ გაზსადენში ბუნებრივი გაზის ხარჯის მწკრივის ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია	105
ცხრილი 22. ბუნებრივი ხარჯის კორელაციის კოეფიციენტები, თვეების მიხედვით	107
ცხრილი 23. ზოგადი საწვავი აირების ვობეს რიცხვი	110
ცხრილი 24. წვის ბუნებრივი გაზი ისეთი მოთხოვნები, რომელიც დამზადებულია მაგისტრალური გაზსადენებით ტრანსპორტირებისთვის	112
ცხრილი 25. ბუნებრივი გაზის ტიპიური შემადგენლობა	117
ცხრილი 26. მშრალი ბუნებრივი გაზის წვის სითბოსა და ფარდობითი სიმკვრივის სიდიდეები ($0^{\circ}C$ და $101,325$ კპა)	118
ცხრილი 27. ბუნებრივი გაზის ტექნიკური მოთხოვნები	118
ცხრილი 28. აზერბაიჯანიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვობეს რიცხვის სტატისტიკური პარამეტრები	123
ცხრილი 29. რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვობეს რიცხვის სტატისტიკური პარამეტრები	123
ცხრილი 30. აზერბაიჯანიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვობეს რიცხვის დინამიკური მწკრივების ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები	124
ცხრილი 31. რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვობეს რიცხვის დინამიკური მწკრივების შემდეგ აგებულია ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები	124
ცხრილი 32. საქართველოს ნავთობისა და გაზის კორპორაციის მიერ არსებული ბუნებრივი გაზის ვობეს პარამეტრები	126
ცხრილი 33. გამოთვლილი ვობეს რიცხვის მნიშვნელობები	127

ცხრილი 34. ვობეს რიცხვის მნიშვნელობები (საქართველოს ნავთობისა და გაზის კორპორაცია).....	128
ცხრილი 35. დინამიკური მწკრივების პროპანისა და აზოტის ექვავიკლენტობის ჯამური ოდენობის პარამეტრები	128
ცხრილი 36. პროპანისა და აზოტის ექვავიკლენტობის ჯამური ოდენობის დინამიკური მწკრივების ჰისტოგრამები	129
ცხრილი 37. ბუნებრივი გაზის მოცულობების ექვივალენტური მახასიათებლები	134
ცხრილი 38. გათხევადებულ გაზის ამოღებისა და აზოტის დამატების გავლენა უმაღლეს წვის სითბოზე.....	141
ცხრილი 39. ბუნებრივი გაზის მახასიათებლების ნორმირება (ГОСТ 5542-87).....	142
ცხრილი 40. სხავადასხვა საბადოების გაზის შემადგენლობა	144
ცხრილი 41. აფშერონის ნახევარკუნძულის საბადოების შემადგენლობა	146

ნახ. 1. გაზის წარვის ენერჯის სტაბილიზაცია შემრევ სადგურში.
ანალიზატორის კორელატორის სქემა24

ნახ. 2. ბუნებრივი გაზის ერთეულები - კუბური მეტრები; კილოვატ · საათები
და მეგაჯოულები24

ნახ. 3. ბუნებრივი გაზის დინამიკა 2014-დან 2019 წლამდე.....26

ნახ. 4. მაგისტრალური გაზსადენის შემადგენლების სქემა27

ნახ. 5. უსაფრთხოების თანამედროვე კომპლექსი28

ნახ. 6. ბუნებრივი გაზის დანაკარგების განაწილება, %30

ნახ. 7. ბუნებრივი გაზის მარაგები და რესურსები33

ნახ. 8. რეგიონის მიხედვით გაზის მოპოვების ზრდა 2020-2040 წლებში35

ნახ. 9. მსოფლიოს ბუნებრივი გაზის 2017 წლის სტატისტიკა36

ნახ. 10. გაზის ურთიერთჩანაცვალეადობის დელბურის დიაგრამა39

ნახ. 11. გაზის ურთიერთჩანაცვალეების დიაგრამა ჯილბერტ-პრიგის მიხედვით.. 42

ნახ. 12. სტანდარტის ხარისხის სქემა52

ნახ. 13. ევროკავშირის მასშტაბით ვობზეს რიცხვის დიაპაზონი გაზის სისტემის
შესასვლელ წერტილებში52

ნახ. 14. შემთხვევითი პროცესების არეების (პირობითი) ინტერპრეტაცია54

ნახ. 15. ერგოდული შემთხვევითი პროცესების გრაფიკული ინტერპრეტაცია.....54

ნახ. 16. ა. გაზის წნევის რეალიზაციის ერთობლიობა (ანსამბლი);
ბ. კორელაციური ფუნქციის განსაზღვრის წესი56

ნახ. 17. კორელაციური ფუნქციის ტიპები57

ნახ. 18. მოდიფიცირებული დიაგრამა - ულვაშიანი ყუთი, მითითებული
ქვედა და ზედა ზღვრებით61

ნახ. 19. ა. თანაბარი განაწილება; ბ. ზარისებრი თანაბარი განაწილება;გ. უარყოფით გადახრული განაწილება; დ. დადებით გადახრული განაწილება	61
ნახ. 20. დიმოდალური პიკი და მდოვრე გაშლის მაგალითი - მოდიფიცირებული დიაგრამა	62
ნახ. 21. შემთხვევითი პროცესის ამოვარდნები	63
ნახ. 22. $x(t)$ პროცესის კვეთა C დონით	64
ნახ. 23. შემთხვევითი $f(x)$ ფუნქციის ამოვარდნების ილუსტრაცია	79
ნახ. 23ა. ურყოფითი ამოვარდნების რიცხვის დადგენის ილუსტრაცია	70
ნახ. 24. ფუნქციები $g(y)$ და $f(x)$ ფუნქციების იგივეურობა	72
ნახ. 25. გაზის ტრანსპორტირების პროექტების კაპიტალური ხარჯები დამოკიდებული მანძილზე	74
ნახ. 26. შპს „საქართველოს გაზის ტრანსპორტირების კომპანიას“ საიტზე მოყვანილი ლაბორატორიის მიერ შექმნილი მონაცემები (მაგალითი)	75
ნახ. 27. ბუნებრივი გაზის დინამიკა 2015-დან 2020 წლამდე	75
ნახ. 28. ვობეს რიცხვის მაჩვენებლის (კკალ/მ ³) მქონე გაზების ურთიერთჩანაცვლება	80
ნახ. 29. ბუნებრივი გაზის თბოუნარიანობის (აზერბაიჯანი) დროითი მწკრივის ინტერვალების დადგენა	82
ნახ. 30. აზერბაიჯანის გაზის თბოუნარიანობის დროითი შემთხვევითი მწკრივის ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია	83
ნახ. 31. რუსეთის გაზის თბოუნარიანობის დროითი შემთხვევითი მწკრივის ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია	84
ნახ. 32. აზერბაიჯანიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის სიმკვრივეს მწკრივი	84
ნახ. 33. აზერბაიჯანიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის სიმკვრივის ჰისტოგრამისა და განაწილების ალბათობის სიმკვრივის ფუნქცია	85
ნახ. 34. რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის სიმკვრივეს მწკრივი	86
ნახ. 35. რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის სიმკვრივის ჰისტოგრამისა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია	87

ნახ. 36. აზერბაიჯანიდან და რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის სიმკვრივის განაწილების ალბათობის სიმკვრივის ფუნქციების შედარება	87
ნახ. 37. ზედა და ქვედა დონეები, ამოვარდნების პროცესის ილუსტრაცია.....	89
ნახ. 38. თბოუნარიანების მწკრივის ინვერსია	89
ნახ. 39. ავტოკორელაციური ფუნქციები 250 დღე ბიჯით	91
ნახ. 40. ავტოკორელაციური ფუნქციის მაგალითი	91
ნახ. 41. კორელაციური ფუნქციის აგება	92
ნახ. 42. დიფერენციალური მწკრივის პროპორციული საშუალო გადახრის მნიშვნელობები	92
ნახ. 43. ამოვარდნების რცხვის $n(C)$ რაოდენობისა და ამოვარდნების $T = 1/n$ მომენტების დიაგრამა და გრაფიკი	93
ნახ. 44. თბოუნარიანობის საწყისი და ინვერსიის გრაფიკები	93
ნახ. 45. თბოუნარიანობის შემთხვევითი მწკრივის ზედა დონის ალბათური მახასიათებლები	95
ნახ. 46. ქობულეთი, უბანი: ქობულეთი, აღწერა: საკონტროლო 999, აღრიცხვის წერტილი: MP2350460872	96
ნახ. 47. მაგისტრალურ გაზსადენში შიგა წნევის დინამიკა	97
ნახ. 48. მაგისტრალური გაზსადენის შიგა წნევის მცირეციკლური დატვირთვის, სიმტკიცის დინამიკის ინტერპრეტაცია	98
ნახ. 49. შიგა წნევის სტოქასტიკური მწკრივის მახასიათებლები	99
ნახ. 50. შიგა წნევის მწკრივის ამოვარდნების რიცხვის განსაზღვრის ილუსტრაცია	100
ნახ. 51. შიგა წნევის მწკრივის ნორმირებული ავტოკორელაციური ფუნქცია.....	102
ნახ. 52. ნორმირებული ავტოკორელაციური ფუნქციების ანსამბლი ნორმირების შემდეგ	102
ნახ. 53. ამოვარდნების დროის T მომენტების დინამიკა ($\mu = 3,12$ თვე)	103

ნახ. 54. ა. ბუნებრივი გაზის მწკრივის ხარჯი (მ ³ /სთ) დინამიკა; ბ. დღიური ბუნებრივი გაზის მოხმარები საათების მიხედვით ტიპური გრაფიკები.....	104
ნახ. 55. ბუნებრივი გაზის ხარჯის მწკრივის ჰისტოგრამა და შესაბამისი ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია	105
ნახ. 56. ხარჯის მწკრივის ავტოკორელაცია	107
ნახ. 57. კორელაციური ფუნქციების ანსამბლი, თვეების მიხედვით	108
ნახ. 58. ზოგადი საწვავი აირების უმაღლესი და უმდაბლესი ვობეს რიცხვების დიაგრამა	109
ნახ. 59. პირველ მიახლოებაში უმდაბლესი და უმაღლესი ვობეს რიცხვების ურთიერთჩანაცვლადობის დიაგრამა	113
ნახ. 60. ბუნებრივი გაზის ურთიერთჩანაცვლების დიაგრამა	115
ნახ. 61. ბუნებრივი გაზის ტიპური ხარისხის დიაგრამა	116
ნახ. 62. ვობეს რიცხვის დიაგრამის აგების ილუსტრაცია	120
ნახ. 63. აზერბაიჯანიდან და რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვობეს რიცხვის დინამიკური მწკრივები	123
ნახ. 64. აზერბაიჯანიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვობეს რიცხვი დინამიკური მწკრივების ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები	125
ნახ. 65. რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვობეს რიცხვის დინამიკური მწკრივების ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები....	125
ნახ. 66. აზერბაიჯანიდან და რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვობეს რიცხვის დინამიკური მწკრივების ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციების შედარება	125
ნახ. 67. ვობეს რიცხვის დინამიკა - 2019 წ (საქართველოს ნავთობისა და გაზის კორპორაცია)	127
ნახ. 68. პროპანისა და აზოტის ექვივალენტობის ჯამური ოდენობის დინამიკური მწკრივები	129
ნახ. 69. პროპანისა და აზოტის ექვივალენტობის ჯამური ოდენობის დინამიკური მწკრივების ჰისტოგრამები (აზერბაიჯანი და რუსეთი)	130
ნახ. 70. ვობეს რიცხვის დიაგრამა	130

ნახ. 71. გაზის კრებსითი დიაგრამის შედარება დიდი ბრიტანეთისათვის და საქართველოსათვის	131
ნახ. 72. ტიპური გაზის ხარისხი	135
ნახ. 73. გათხევადებული ბუნებრივი გაზის ამოღება.....	141
ნახ. 74. მეთანის წვის სქემა	142
ნახ. 75. მეთანის აალების ზღვრების ცვლილების გრაფიკი მეთან-ჰაეროვან ნარევეში აზოტის შემცველობის ცვლილების შესაბამისად	144
ნახ. 76. ა. აზერბაიჯანის ბუნებრივი გაზის მარაგები (ტრლნ. მ3) ბ. აზერბაიჯანის გაზისა და ნავთობის ტრანსპორტირების მარშრუტები	145

შესავალი

მაგისტრალური გაზსადენების მუშაუნარიანი მდგომარეობის შენარჩუნება ხანგრძლივი დროის განმავლობაში, ერთ-ერთი მთავარი ამოცანაა, რადგანაც ექსპლუატაციის ხანგრძლივი დროის შემდეგ ხშირად წარმოიქმნება უწყესრივობები, დაზიანებები, მტყუნებები და ბოლოს ავარიები, რაც ძირითადად, იწვევს სისტემის დაბერებასა და დაღლილობას.

თავის მხრივ, მაგისტრალური გაზსადენების არსებული ავარიების მაჩვენებელი ყოველწლიურად იზრდება სარემონტო და აღდგენითი დიდი მოცულობის ფონზე, რაც მეტყველებს ამ ობიექტების მომსახურებისთვის გამოყენებული ორგანიზაციული და ტექნიკური ზომების კომპლექსის არასაკმარის ეფექტურობაზე.

გაზის საიმედო ტრანსპორტირება უნდა განხორციელდეს შესაბამისი ობიექტების გარკვეული ტექნიკური მდგომარეობით და მისი ცვლილების საიმედო პროგნოზით. გაზსადენების მდგომარეობის ბუნებრივი და ტექნიკური ფაქტორების ცვლილებიდან გამომდინარე, უნდა მოხდეს გაზოსატრანსპორტო სისტემების ექსპლუატაციის, დიაგნოსტიკის, რემონტისა და რეკონსტრუქციის პრაქტიკული პრობლემების ეფექტური და რაციონალური გადაწყვეტა.

ტექნიკური დიაგნოსტიკის ერთ-ერთი პრიორიტეტული ამოცანაა, დიაგნოსტიკური და სარემონტო სამუშაოების დაგეგმვა, და მაგისტრალური გაზსადენების ხაზოვანი ნაწილის და მოწყობილობის სტრუქტურული ელემენტების ტექნიკური მდგომარეობის შეფასება.

მაგისტრალური გაზსადენების ხაზოვანი ნაწილის და მოწყობილობის ტექნიკური მდგომარეობის ზოგადი დასკვნის შეფასება ხდება სამეცნიერო და მეთოდოლოგიური ტექნიკური მდგომარეობის შესახებ ერთობლივი ანალიზის საფუძველზე [1], კერძოდ:

- ყველა შესაძლო მონაცემებზე ჩატარებული კვლევები;
- საპროექტო და საექსპლუატაციო დოკუმენტაცია;
- ტესტირება და ხელახალი ტესტების შედეგები;

- სიმტკიცის, ნარჩენი რესურსის, შენადული პირაპირების და სხვა შესაბამისი საექსპერტო შეფასებების და საექსპლუატაციო რისკის გამოთვლების შედეგების დადგენა.

სხვადასხვა ნაშრომები [2] ეძღვნება მაგისტრალური გაზსადენების ტექნიკური მდგომარეობის ამჟამინდელი და პროგნოზირებული შეფასების მეთოდების გაუმჯობესებას, შედეგების ობიექტურობას და სანდოობის ამაღლებას, მაგისტრალური გაზსადენების ტექნიკური მომსახურების დაგეგმვას სტოქასტიკური და დეტერმინისტული ანალიზის მეთოდების ერთობლივი გამოყენების საფუძველზე.

დეტერმინისტული მიდგომის დროს, ყველა ფაქტორი, რომელიც გავლენას ახდენს მოდელის მოქმედებაზე, ე.ი. მოდელის პარამეტრები და გარემო პარამეტრები, საწყისი პირობები და ა.შ., განიხილება როგორც დეტერმინისტული. სწორად დასმული დეტერმინისტული პროგნოზირებით რეალური სისტემის პრობლემის გადაჭრა ცალსახაა.

დეტერმინისტული მიდგომისაგან განსხვავებით, მოვლენების ანალიზის სტოქსტიკური მიდგომა ითვალისწინებს შემთხვევით ფაქტორებს და საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ პროგნოზი, რომელიც შეიცავს სავარაუდო შეფასებებს. სისტემების მოქმედება არაცალსახა შეფასებისას განპირობებულია იმით, რომ ანალიზში არ არსებობს ფაქტორები, რომლებიც ან განზრახ უგულვებელყოფილია, ან ამის შესახებ არ არსებობს არასაკმარისი ინფორმაცია.

ერთიანი მიდგომის განხორციელება მოიცავს მაგისტრალური გაზსადენის უბნების მზიდუნარიანობის და რესურსის შეფასებას ტრადიციული დეტერმინირებული მეთოდებით და სხვადასხვა ფაქტორებით გაზსადენების უბნებზე საგანგებო სიტუაციების სტოქასტიკური შეფასების საფუძველზე. სხვადასხვა მკვლევარების აზრით, დეტერმინისტული და სტოქასტიკური გაანგარიშების მოდელების ერთობლივი გამოყენება ზრდის შეფასებების სანდოობას, ასევე ხელს უწყობს ანალიზის შედეგების უზრუნველყოფის საფუძველზე მიღებული გადაწყვეტილებების სისრულეს.

ტექნიკურ ლიტერატურაში, მაგისტრალური გაზსადენის აღწერილი მიდგომები ტექნიკური მდგომარეობის შესაფასებლად ყველაზე გამართლებულია

საიმედოობის თეორიის თვალსაზრისით. თუმცა, ზოგიერთ შემთხვევაში ამ მეთოდის პრაქტიკული გამოყენება მეტად რთულია [3-6].

მაგალითად, მაგისტრალური გაზსადენის ტრასაზე დამატებითი დიაგნოსტიკური და საანგარიშო-ანალიზური სამუშაოს ჩასატარებლად [4-6], ფორმირდება მაგისტრალური გაზსადენის სახაზო ნაწილის პოტენციურად საშიში უბნების ჩამონათვალი, რომელიც, კერძოდ, მოიცავს მაღალი და გაზრდილი კოროზიის საშიშროების ზონებს, რომელთა საფუძველი, ექსპერტების აზრით, შეიძლება იყოს დეფექტები და დაზიანებების ან მათი დაჩქარებული განვითარების პირობები და ა.შ.

ეს მიდგომა ყოველთვის არ გვაძლევს ადგილმდებარეობის ისეთ ლოკალიზაციას, რომლებიც საჭიროებენ ტექნიკურ დიაგნოსტიკას.

განვიხილოთ, მაგისტრალური გაზსადენების რამდენი მსხვილი ავარია:

2011 წელს, ალენტაუნში (აშშ) აფეთქდა გაზსადენი. 5 ადამიანი დაიღუპა, თითქმის განადგურდა ორმოცდაათი სახლი. მიზეზია ექსპლუატაციის რესურსის ამოწურვა - გაზსადენი დამზადებული იყო თუჯისგან 1928 წელს, 83 წლის წინ.

2012 წელს 26 დეკემბერს სოჭში აფეთქდა 325 მმ დიამეტრის მქონე გაზსადენი. გაზსადენი რღვევისას ააღდა, ალი ავიდა სამ მეტრამდე და ფაქტიურად მყისიერად შეწყდა გაზის მიწოდება. დაზიანებული გაზსადენის რემონტის დროს სოჭის თბოელექტროსადგურმა, კურორტის ენერჯის ერთ-ერთმა მნიშვნელოვანმა ობიექტმა, შეწყვიტა ექსპლუატაცია და იგი რეზერვში გადავიდა.

2013 წელს 20 თებერვალს, ღამით, დაშავდა 19 ადამიანი გაზის აფეთქების და ხანძრის შედეგად, რაც მოხდა კანზას სიტის ფემენებულ რაიონში (მისური, აშშ). რამდენიმე აფეთქება მოხდა მას შემდეგ, რაც მანქანა შეეჯახა გაზსადენს. ინციდენტი მოხდა ქალაქის სავაჭრო და გასართობი კვარტალში.

2014 წელს 27 ივნისს, ინდოეთის სამხრეთში ანდრა პრადეშიში მოხდა გაზსადენის აფეთქება, რის შედეგად, მინიმუმ 15 ადამიანი დაიღუპა, ხოლო 10 მძიმედ დაშავდა. აფეთქება მოხდა გაზსადენის უბანზე, რომელიც ეკუთვნის ინდოეთის უმსხვილეს გაზს კომპანიის GAIL, აღმოსავლეთ გოდავარის საგრაფოში.

2017 წელს 2 ივლისს, ჩინეთის სამხრეთ-დასავლეთში, გუჯოჟოს პროვინციაში მოხდა ორი გაზსადენის აფეთქება. დაიღუპა რვა ადამიანი, დაშავდა 35 ადამიანი.

2017 წელს 6 თებერვალს, ქვეყნის ირანის სამხრეთ-აღმოსავლეთით, აფეთქება მოხდა სიტანისა და ბალოხისტანის პროვინციების დამაკავშირებელ გაზსადენზე, ორი ადამიანი დაიღუპა.

2017 წელს 12 ნოემბერს, ბულგარეთში გაზსადენის უბანზე მოხდა აფეთქება, რომლის მეშვეობითაც "ლურჯი საწვავი" მიედინება რუსეთიდან საბერძნეთში. ინციდენტის შედეგად ორი ადამიანი დაიღუპა, ორი კი დაშავდა. აფეთქება მოხდა სატუმბი სადგურის მახლობლად, პლოვდივის რაიონის სოფელ სტრიამაში, გაზსადენის შემოწმებისას.

2017 წელს 23 დეკემბერი, კოლუმბიის ჩრდილო-დასავლეთში გაზსადენთან მოხდა აფეთქება. საგანგებო სიტუაციის შედეგად შვიდი ადამიანი გარდაიცვალა, 60-ზე მეტი დაშავდა. აფეთქების მიზეზი იყო არაღებულური შეჭრა.

მაგისტრალურ გაზსადენებში მიმდინარე პროცესები - სტოქასტიკურია. სტოქასტიკურია ტრანსპორტირება-გაზმომარაგება-მოხმარების პროცესები, ბუნებრივი გაზის შემადგენლობა, გარე ბუნებრივი მოვლენები, გაზოდინამიკური პროცესები (შიგა წნევისა და ხარჯის ფლუქტუაციები), მილების ლითონის არაერთგვაროვანი მასალა, პერსონალის შეცდომები, საექსპლუატაციო რეჟიმების გადახრა და წესების დარღვევა და ა.შ. ცხადია, რომ ამ პროცესის მართვა ხდება მოვლენების ტრენდებით და საშუალო პარამეტრების მიხედვით. ამიტომ, როგორც წესი, პარამეტრები ითვლება დეტერმინირებლად და მიღებულია პარამეტრების მათემატიკური მოლოდინები. თუმცა, არის მრავალი ისეთი სტოქასტიკური პროცესი და სიდიდეები, რომლის იგნორირება შეუძლებელია. კერძოდ, საიმედოობის, ენერგოდაზოგვის, ენერგოეფექტურობის და სხვა პროცესების მართვის გადაწყვეტილებები.

ნაშრომში ვიხილავთ შემდეგ სტოქასტიკურ მოვლენებს, ნატურული მონაცემების მიხედვით: 1. საქართველოში აზერბაიჯანიდან და რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის თბოუნარიანობის, სიმკვრივისა და შესაბამისად ვობზეს რიცხვის სტატისტიკური შედეგები; 2. აჭარის მაგისტრალურ გაზსადენში შიგა წნევის დამუშავება და შესაბამისად ამ სიდიდის ამოვარდნების შემუშავება და ანალიზი.

თავი 1. მაგისტრალური გაზსადენების სისტემის თეორიისა და პრაქტიკის თანამედროვე მდგომარეობა და საიმედოობისა და ენერგოდაზოგვის თანამედროვე კვლევების მიმოხილვა

1.1. მაგისტრალური გაზსადენების სისტემის თეორიისა და პრაქტიკის თანამედროვე მდგომარეობა

თბოუნარიანობა წარმოადგენს სრულ ენერგიას, რომელიც ჟანგბადთან ნივთიერების სრული წვისას სტანდარტულ პირობებში გამოიყოფა სითბოდ. წვის ქიმიური რეაქცია, როგორც წესი, არის ნახშირწყალბადის, ან სხვა ორგანული მოლეკულის რეაქცია ჟანგბადთან, ნახშირორჟანგის გაზად და წყლად გარდაქმნისას. ეს შეიძლება გამოიხატოს შემდეგი მნიშვნელობებით: ენერგია/საწვავის მოლი; ენერგია/ საწვავის მასა; ენერგია /საწვავის მოცულობა.

არსებობს თბოუნარიანობის მნიშვნელობის ორი ტიპი, რომელსაც იყენებენ, უმაღლესი და უდაბლესი თბოუნარიანობის მნიშვნელობები, იმისდა მიხედვით, თუ რამდენ პროდუქტს იძლევა გაცივებასა და ნებადართულია თუ არა ისეთი კომპონენტები, როგორცაა წყალი.

გაზ-ჰაერის თანაფარდობის რეგულირების სისტემის დამაკმაყოფილებელი ფუნქციონირება და ნარევის წნევის სტაბილიზაცია, მისი თბოუნარიანობის მნიშვნელობა შეიძლება მნიშვნელოვნად განსხვავდებოდეს საანგარიშოდან, რადგანაც, თითოეული შერეული აირის თბოუნარიანობის მნიშვნელობის რხევების გამო, მოითხოვს დამატებით კორექციას. თითქმის ყველა ნარევი ცდილობს შეინარჩუნოს წვის სითბოს ტენდენცია. ამ თანაფარდობის რეგულირება უკუკავშირით, მაგალითად, წვის პროდუქტებში ჟანგბადის ან ნახშირბადის ნარევით, ვერ უზრუნველყოფს საწვავის ცვლადი შემადგენლობის მაღალ ეფექტურობას, თუნდაც საკმარისად ზუსტ და პოტენციურ დაბალ ინერციას ჟანგბადთან.

საწვავისა და ჰაერის ოპტიმალური თანაფარდობის უზრუნველსაყოფად, დაწვის შედეგების მიღებამდე, საჭიროა საწვავის შემადგენლობიდან გამოთ-

ვლილი ჰაერისა და გაზის სიმკვრივის თეორიული რაოდენობის გათვალისწინება. წვის პროცესის ოპტიმიზაციისთვის, აუცილებელია ორი კოეფიციენტის გამოყენება (ვობზეს რიცხვი და მოთხოვნილი ჰაერის წვის კოეფიციენტი - W და C)

$$C = \frac{R}{\sqrt{P}}, \quad (1)$$

სადაც C არის მოთხოვნილი ჰაერის წვის კოეფიციენტი, R - ჰაერის მოთხოვნა, ხოლო P - სიმკვრივე.

საწვავის შემადგენლობიდან გამომდინარე, ეს კოეფიციენტები, იცვლება ერთმანეთისგან დამოუკიდებლად (ცხრილი 1): პირველი და მეორე თბოუნარიანობა იგივეა - თუმცა, ამ ნარევების იმავე პირობებში დაწვისას, სითბური დატვირთვა, განსაკუთრებული სიმკვრივის სხვაობის გამო (შესაბამისად, გაზის წვის ნაკადის სიჩქარე და ვობზეს რიცხვი) - განსხვავებულია. მეორე და მესამე ნარევების ვობზეს რიცხვი იგივეა და, შესაბამისად, ამ ნარევების წვის დროს გამოთავისუფლებული ენერგია იგივე იქნება.

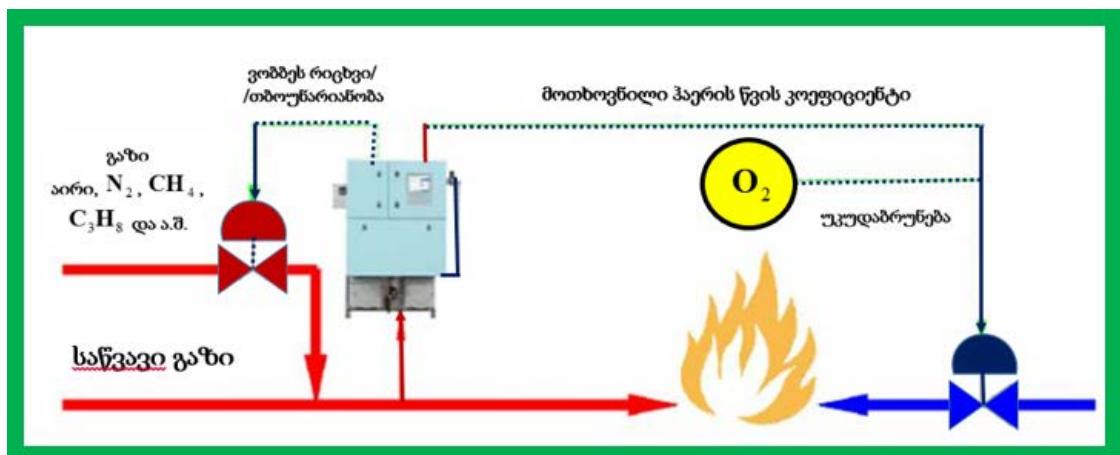
ამასთან, წყალბადის (H_2) არსებობის გამო, რომელიც მეთანისგან განსხვავებით (CH_4) ნაკლები წვის ჰაერს მოითხოვს, მეორე ნარევის ჰაერის მოხმარება მნიშვნელოვნად მცირდება. აქედან გამომდინარე, წვის მენეჯმენტის ექსპერტები (ნიდერლანდები, კომპანია „Hobre“) რეკომენდაციას უწევენ, რომ გაზის ნარევის ჰაერი/საწვავის ენერგიის კოეფიციენტის და ვობზეს რიცხვის კონტროლი და სტაბილიზაცია მოხდეს შემრევ სადგურში (ცხრილი 1).

როგორც წესი, ანალიზატორი ვობზეს რიცხვი/თბოუნარიანობა კორელირებს ვობზეს რიცხვთან, და ეს კორელაცია სწორი იქნება მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ გაზის ნარევი არ შეიცავს წყალბადს (H_2) და ნახშირჟანგს (CO) (ნახ. 1). ასეთი ანალიზატორები დამოუკიდებლად ზომავს ვობზეს რიცხვს, და მოთხოვნილი ჰაერის წვის კოეფიციენტს.

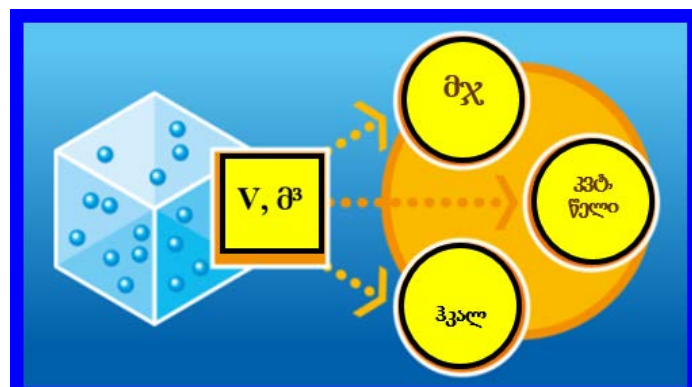
განვიხილოთ, თუ როგორ მუშაობს, ენერგიის ერთეული კუბური მეტრი გაზის ნაცვლად. რატომ დააწესა მრავალი ქვეყნის რეგულატორმა გაზის გაზომვა ენერგიის ერთეულებში და რა განსაზღვრავს მიწოდებული ბუნებრივი გაზის ხარისხს (ნახ. 2).

ცხრილი 1. ვობზეს რიცხვი და და მოთხოვნილი ჰაერის წვის კოეფიციენტების სცენარები (მაგალითი)

	ნარევი 1	ნარევი 2	ნარევი 3
მეთანი (მოც.%)	50	40	
წყალბადი (მოც.%)		60	87,9
აზოტი (მოც.%)	42		
უმაღლესი თბოუნარიანობა, მჯ/მ3	20,8	20,8	31,5
ვობზეს რიცხვი, მჯ/მ3	24,4	40,6	40,6
სიმკვრივე, კგ/მ3	0,73	0,26	0,61
მოთხოვნილი ჰაერის წვის კოეფიციენტი	6,5	10,2	10,8
ჰაერის მოთხოვნა	5,6	5,3	8,4



ნახ. 1. გაზის ნარევის ენერჯის სტაბილიზაცია შემრევსადგურში. ანალიზატორის კორელატორის სქემა



ნახ. 2. ბუნებრივი გაზის ერთეულები - კუბური მეტრები. კილოვატ საათები და მეგაჯოულები

მაგალითად, 2017 წლის 26 იანვარს, უკრაინის ენერგეტიკისა და კომუნალური მომსახურების რეგულირების ეროვნულმა კომისიამ (NKREKU) მიიღო დადგენილება. დოკუმენტი ავალდებულებს გაზგამანაწილებელი ქსელების ოპერატორებს, თანხის გარდა გადაიყვანონ გაზომვის შედეგად მიღებული ენერჯის რაოდენობა სამ ერთეულში - კილოვატ საათში (კვტ · სთ), გიგაკალორიაში (გკალ) და მეგაჯოულეში (მჯ) [7].

საქართველოში ბუნებრივი გაზი შემოდის აზერბაიჯანიდან ((ბუნებრივი გაზის მიწოდების საქმიანობას ეწევა შპს "სოკარ ჯორჯია გაზი") და რუსეთიდან.

საქართველოში ბუნებრივი გაზის რესურსები პრაქტიკულად არ არსებობს. ბუნებრივი გაზი ძირითადად შემოდის აზერბაიჯანიდან და რომლის მიწოდებელია შპს „სოკარ ჯორჯია გაზი“. საკმარისად ხანგრძლივად ბუნებრივი გაზი შემოდიოდა რუსეთიდან, ხოლო მის შემდეგ რაც რუსეთმა შეწყვიტა მიწოდება, მაშინ მხოლოდ გარკვეული დროის განმავლობაში, ნატურით საქართველოში რჩებოდა სომხეთის ტრანზიტის 10%. 2019 წლისათვის საქართველოს 2.5 მლრდ. მ³-იანი მოხმარებიდან, 95% გაზი აზერბაიჯანული წარმომავლობის იყო.

2020 წელს გაზის 92.7%-ს აზერბაიჯანიდან მიიღო, ხოლო 6.6 %-ს რუსეთიდან. საქართველოს ეკონომიკისა და მდგრადი განვითარების მინისტრმა დაამტკიცა 2020 წლის გაზის ბალანსი. დოკუმენტის მიხედვით, საქართველოში გაზის მოწოდების საპროგნოზო მოცულობა 2.57 მლრდ. მ³-ს, ანუ მთლიანი მოცულობის 92.7 %-ს საქართველო აზერბაიჯანიდან მიიღებს, მათ შორის „სოკარისგან“ 1.51 მლრდ. მ³-ს, შაჰ-დენიზის საბადოდან კი 873.8 მლნ. მ³-ს. 169.9 მლნ. მ³-ს გაზის მიღებაა გათვალისწინებული რუსეთიდან (6.6 %), ადგილობრივი მოპოვების საპროგნოზო მოცულობა კი 17.9 მლნ. მ³-ია (0.7 პროცენტი).

რაც შეეხება მოხმარებას, 2020 წელს ე.წ. სოციალური გაზის საპროგნოზო მოცულობა 1.6 მლრდ მ³-ია, მათ შორის მოსახლეობის მოხმარება მილიარდ კუბურ მეტრს შეადგენს, თბოელექტროსადგურების კი 600 მლნ. მ³-ს. კომერციული სექტორის საპროგნოზო მოხმარება 911 მლნ. მ³-ს შეადგენს, გაზის დანაკარგი კი სავარაუდოდ 35 მლნ. მ³-ს იქნება.

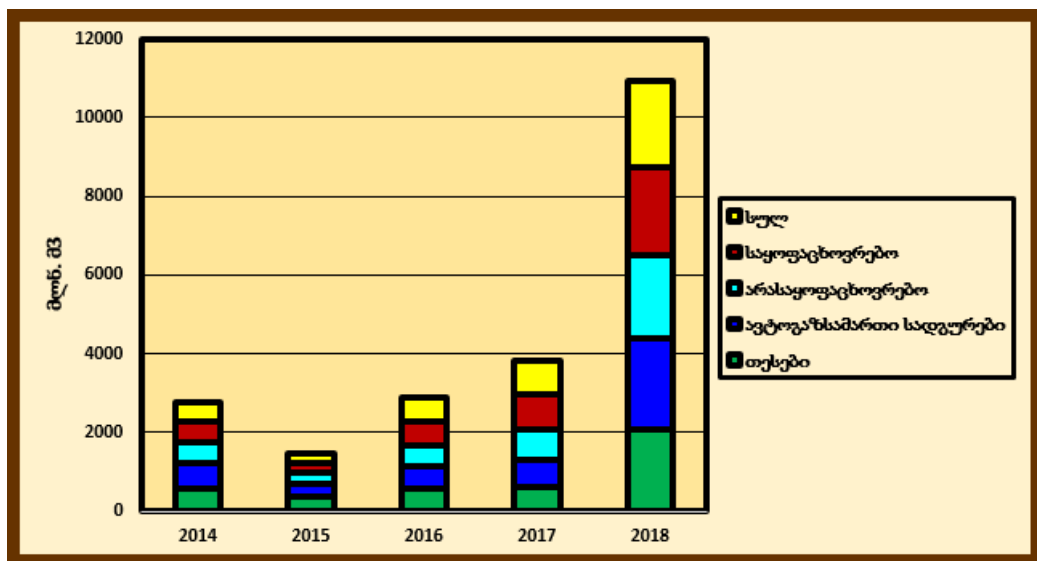
ბალანსში გათვალისწინებულია რუსული წყაროც. "გაზპრომიდან" 2020 წელს საქართველოში სავარაუდოდ, 169.865 მ³ მლნ გაზის იმპორტი განხორციელდება.

რაც შეეხება ადგილობრივ რესურსს, ამ მხრივ, პროგნოზი მხოლოდ 17.866 მ³ მლნ-ია.

აღსანიშნავია, რომ 2019 წლის საპროგნოზო ბალანსთან შედარებით, რომელიც ბოლოს მაისშია კორექტირებული, ბუნებრივ გაზზე მოსახლეობის მოთხოვნის პროგნოზი 2.1%-ით იზრდება, თბოელექტროსადგურების - 4.9%-ით, კომერციული სექტორისთვის კი 9.3%-ით მცირდება (ცხრილი 2, ნახ. 3) [8-11].

ცხრილი 2. ბუნებრივი გაზის მიწოდება საქართველოში

მიმწოდებელი	2015	2016	2017	2018
აზერბაიჯანი	2 080	2 113	2 201	2 223
რუსეთი	295	122	135	39
სომხეთი	127	19	0	15
ადგილობრივი	11	6	8	9
სულ	2 513	2 260	2 344	2 286



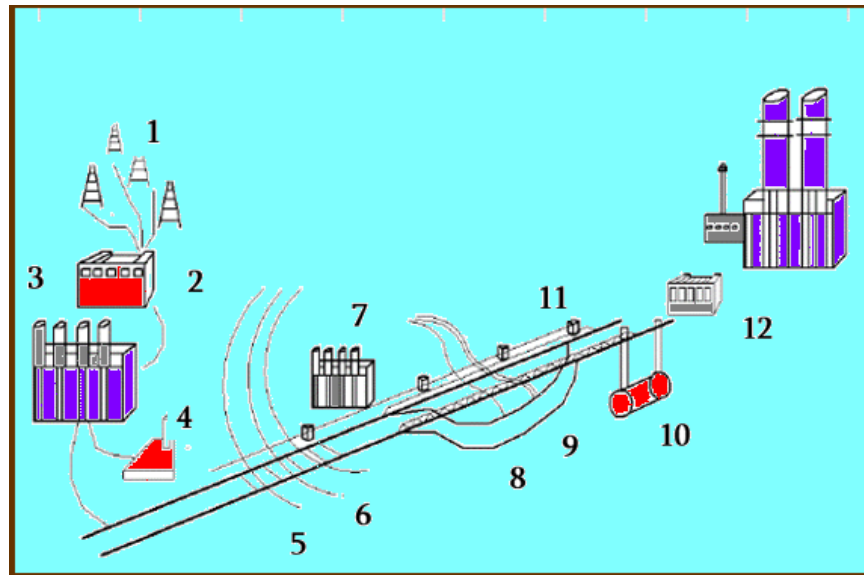
ნახ. 3. ბუნებრივი გაზის დინამიკა 2014-დან 2019 წლამდე

საწვავის და ენერგორესურსების მოხმარების მაღალი დონე ხასიათდება ნახშირწყალბადის აირების მომზადებისა და დამუშავების პროცესებით. ეს გამოწვეულია ენერგეტიკული ტექნოლოგიური დანადგარებით, რომლებიც ქმნიან რთულ საწარმოო ჯაჭვს. მათი ეფექტურობა დამოკიდებულია ენერგეტიკული კომპლექსის მოწყობილობებისა და ექსპლუატაციის რეჟიმების შემადგენლობაზე,

რომელიც აერთიანებს ყველა შიდა წარმოებას და ენერჯის გარე წყაროებს. ეს განსაზღვრავს ენერგოდაზოგვის და ენერგოეფექტურობის აქტუალურ საკითხებს.

ჩვენს ქვეყანაში ნავთობისა და გაზის ინდუსტრიის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ასპექტია მაგისტრალური მილსადენებით გაზის, ნავთობისა და ნავთობპროდუქტების ტრანსპორტირება.

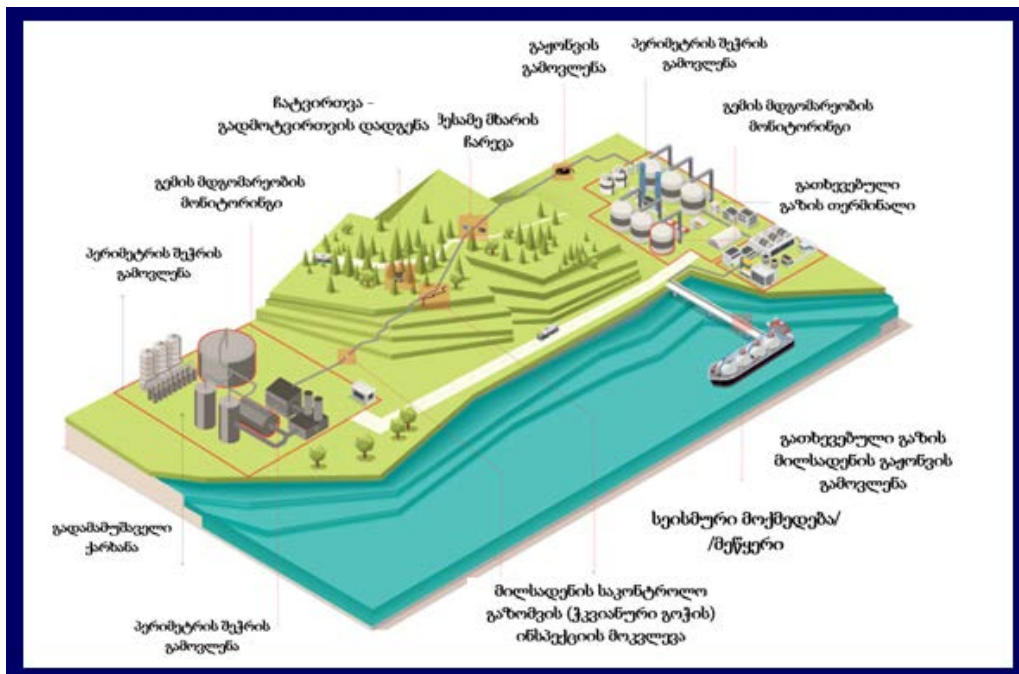
გაზის შორეული სატრანსპორტო სისტემა მოიცავს შემდეგ სქემას (ნახ. 4): საბადოს გაზგამანაწილებელი სადგური, რომელიც მოთავსებულია გაზის წყაროს მახლობლად, და მაგისტრალური გაზსადენი, რომელიც იწყება გაზის მომზადების მოწყობილობიდან ტრანსპორტისკენ და მთავრდება გაზის მსხვილ მომხმარებლებთან [8,11].



ნახ. 4. მაგისტრალური გაზსადენის შემადგენლების სქემა; 1. საბადო; 2. გაზის შემკრები; 3. სათავო საკომპრესერო სადგური; 4. ამრინები გაზგამანაწილებელი სადგურები; 5,6. რკინიგზისა და ავტოგზების გადასასვლელები; 7. საშუალოდო კომპესორული სადგური; 8,9. წყლის და ხეების გადასასვლელები; 10. მიწისქვეშა გაზსაცავები; 11. კათოდური დაცვის სადგური; 12. საბოლოო გაზგამანაწილებელი სადგურები

თანამედროვე კომპლექსი წარმოადგენს დისტანციური მონიტორინგის კომპლექსს შეზღუდული უსაფრთხოებით: მაგისტრალური მილსადენი, შიგა მილსადენები, რომელიც დაზღვეულია შემთხვევითი დაზიანებისგან, ასევე მესამე მხარის ჩარევისგან,(ნახ. 5):

უსაფრთხოების თანამედროვე კომპლექსში შედის: მილსადენის გაჟონვის გამოვლენის სისტემები ბუნებრივი და თხევადი გაზსადენებისთვის; მესამე მხარის ჩარევის გამოვლენა განზრახ დივერსიული ან უნებლიე აფეთქება ან ბურღვა სიახლოვეს; პერიმეტრის შეჭრის გამოვლენის სისტემა; ჭკვიანი გოჭის თვალყურის დევნება მილსადენის ინსპექციის გაზომვის მიკვლევა; მილსადენის მდგომარეობის მონიტორინგი მილები და ჩამკეტი არმატურა; სეისმური და მეწყერების გამოვლენა; გათხევებული გაზის ტერმინალის და მილსადენის მთლიანობა და უსაფრთხოება; გემის მთლიანობა გაჟონვის გამოვლენა გემის მონიტორინგი.



ნახ. 5. უსაფრთხოების თანამედროვე კომპლექსი

მაგისტრალური გაზსადენში გაზის გადაადგილების პროცესის განმავლობაში ხახუნისა და გაზის მომხმარებლებისათვის მიწოდების გამო, გაზის წნევა თანდათან მცირდება. გაზსადენში გაზის წნევის გასაზრდელად და აუცილებელი გამტარუნარიანობის შესანარჩუნებლად, ტრასის გასწვრივ აგებულია კომპრესორული სადგურები - ყოველ 80-120 კილომეტრში. კომპრესორული სადგურები აიგება სადგურებს შორის უბანზე წნევის დანაკარგების შესამცირებლად, წნევის გაზრდის აუცილებლობის შესაბამისად. მიწისქვეშა

საცავებში გაზის ჩაჭირხვნისას აიგება სპეციალური სადგურები, რომლებიც უზრუნველყოფს მიწისქვეშა გაზსაცავების ჩაჭირხვნას.

გაზსადენის ხაზოვანი ჩამკეტი არმატურა (ონკანები ან ჩამკეტები) დამონტაჟებულია გაზსადენზე ინტერვალით 10 - 30 კმ-ით, მარშრუტის რელიეფის შესაბამისად. ჩამკეტი არმატურა განკუთვნილია უბნების ბლოკირებისთვის ავარიის ან შეკეთების შემთხვევაში. გაზსადენზე უბნის ორივე მხარეს, კეთდება სანთლებიანი ხაზოვანი ჩამკეტი არმატურა, ავარიების დროს ატმოსფეროში გაზის არინებისათვის.

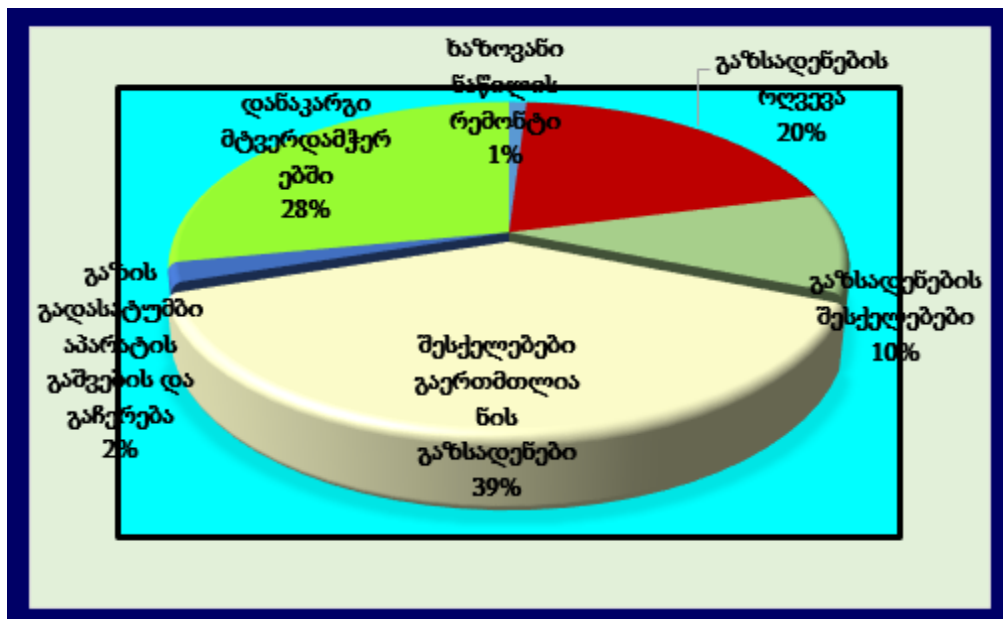
მაგისტრალური გაზსადენის ტრასის გასწვრივ გადის კავშირგაბმულობის ხაზი, რომელსაც გააჩნია სადისპეჩერო ფუნქცია. მისი გამოყენება შესაძლებელია ტელემეტრიისა და ტელეკონტროლის სიგნალების გადასაცემად. ტრასის გასწვრივ განლაგებულია კათოდური და დრეჟანური დაცვის სადგურები, რომლებიც იცავს გაზსადენს გარე კოროზიისგან, გაზგამანაწილებელი სადგურები და საკონტროლო-განაწილების პუნქტები, სადაც იწმენდება მექანიკური მინარევები, კონდენსატი, ტენიანობა, იზომება რაოდენობა, მცირდება წნევა და ხორციელდება ოდორიზაცია, შემდეგ კი გაზი მიეწოდება მომხმარებლებს.

ენერგოდაზოგვის ტექნოლოგიების მზარდი მოთხოვნის ერთ-ერთი მთავარი მიზეზია ბუნებრივი გაზის მოპოვების, შენახვის, ტრანსპორტირებისა და მოხმარების გაჟონვები და დანაკარგები. ცხრილ 3-ში და ნახ. 6-ზე ნაჩვენებია ბუნებრივი გაზის სხვადასხვა ტიპის დანაკარგების განაწილება ტექნოლოგიურ პროცესში კომპრესორულ სადგურებსა და ხაზოვან უბნებზე

ცხრილი 3. კომპრესორულ სადგურებსა და ხაზოვან უბნებზე დანაკარგების განაწილება

დანაკარგის მიზეზი	%
ხაზოვანი ნაწილის რემონტი	1
გაზსადენების რღვევა	20
გაზსადენების მამჭიდროვებლები	10
გაერთმთლიანის გაზსადენების შესქელებები	39
გაზის გადასატუმბი აპარატის გაშვება და გაჩერება	2
დანაკარგი მტვერდამჭერებში	28

მეორე ადგილზეა გაზის დანაკარგები მტვრისდამჭერი შემგროვებლების მეშვეობით. ამ ტიპის გაჟონვა დაკავშირებულია ფილტრების გაქრევასთან (გაწმენდასთან). ბუნებრივი გაზის ყველა დანაკარგის 50%-ზე მეტი ხდება უშუალოდ კომპრესორულ სადგურებზე, დანარჩენი კი უკავშირდება გაჟონვას ხაზოვან ნაწილში და ავარიებს გაზსადენებსა და კომპრესორულ სადგურებთან. ბუნებრივი გაზის ენერგოხარჯები შეიძლება იყოს 6%-მდე, ხოლო გაზის გაჟონვები 0.1% -მდე.



ნახ. 6. ბუნებრივი გაზის დანაკარგების განაწილება, %

ეფექტურობის გაზრდის მიზნით, პრაქტიკაში გამოყენებულია საკომპრესორო სადგურებისა და მაგისტრალური გაზსადენის სხვადასხვა მეთოდები. ახალი მეთოდების გამოყენება გულისხმობს ეკონომიკური ეფექტურობის ანალიზს, ხოლო ენერჯის დაზოგვის გადაწყვეტილებების უმეტესობა მომგებიანი ხდება მხოლოდ გრძელვადიან პერიოდში. ამიტომ, ენერგოეფექტური გადაწყვეტილებების განხორციელება საკმაოდ დაბალია. ახალი გადაწყვეტილებების შესრულების შედარებით დაბალ ტემპისას, საჭიროა მიღებულ იქნეს აუცილებელი გადაწყვეტილებები და მათი გამოყენება, კერძოდ, გამოიყენება შემდეგი ზომები და გადაწყვეტილებები:

1. გლუვი კედლის საფარის მქონე მილების გამოყენება, ჰიდრავლიკური დანაკარგების შესამცირებლად;
2. გაზის გადასატუმბი აგრეგატის უფრო მაღალი სიმძლავრის გამოყენება - 32 მგვტ, 50 მგვტ სიმძლავრით მეტი მქვ-ს ეფექტურობით;
3. ტრანსპორტირებული გაზის წნევის გაზრდა 9.8 და 11.8 მპა-მდე;
4. საკომპრესორო სადგურის ტექნოლოგიური მთლიანობის გამარტივება;
5. სიხშირითი-რეგულირებადი ამძრავების გამოყენება, როგორც ელექტრო გაზის გადატუმბვის აპარატებში და ასევე ჰაერის გამაგრილებლებში.
6. წნევის ქვეშ მყოფი გაზსადენების რემონტის ტექნოლოგიების გამოყენება;
7. მავნე ემისიების შემცირება და შეზღუდვა და ა.შ.

ზოგადად, გაზის დარგში უნდა ჩატარდეს უფრო სრულყოფილი და სისტემატური კვლევები ეფექტურობის ასამაღლებლად და სხვადასხვა სახის დანაკარგების შესამცირებლად. აღნიშნული უნდა განხორციელდეს ცალკეული საკომპრესორო სადგურის და მთლიანობაში სისტემის ერთიანი მიდგომის გამოყენებით.

1.2. მსოფლიო ენერჯეტიკის განვითარების რესურსებისა და ეკოლოგიური შეზღუდვები

კლასიფიკაციის საფუძველზე, ნავთობპროდუქტების მსოფლიო საბჭომ (WPC), ნავთობის გეოლოგთა ამერიკულმა ასოციაციამ (AAPG) და ნავთობის ინჟინრების შეფასების საზოგადოებამ (SPEE), ნავთობის რესურსების მენეჯმენტის სისტემა (PRMS) შექმნა 2007 წელს და შეთანხმდა გაეროს სისტემის UN Framework-თან, რომელიც მიღებულია გაეროს წიაღისეული ენერჯისა და მინერალური რესურსების ჩარჩო კლასიფიკაციის მიერ (UNFC). PRMS - UNFC კლასიფიკაციის ფარგლებში, არსებობს მთელი რიგი კატეგორიები, მათ შორის 1P (დადასტურებული რეზერვები) და მოპოვებული რესურსები.

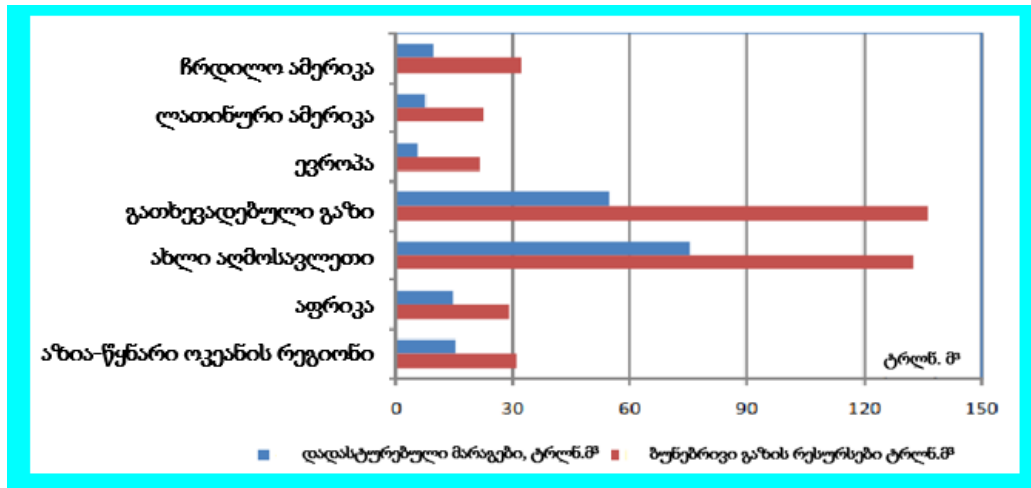
დამტკიცებული რეზერვების მოპოვება შესაძლებელია ტექნოლოგიური განვითარების თანამედროვე დონეზე, ხოლო მათი მოპოვება ეკონომიკურად გამართლებულია. სავარაუდო რეზერვები 90% შესაბამისად სავარაუდოა, მაგრამ სინამდვილეში დადასტურებულ რეზერვებს აქვთ დაახლოებით 65% ალბათობა.

მსოფლიოში დადასტურებული რეზერვები და ნავთობისა და ბუნებრივი აირის გადამუშავებული რესურსები ორი ძირითადი კატეგორიისგან შედგება - ჩვეულებრივი და არატრადიციული. არატრადიციული რეზერვები არის რეზერვები იმ ინდუსტრიული განვითარებისათვის, რომლისთვისაც საჭიროა ახალი ტექნოლოგიები.

განვიხილოთ ბუნებრივი გაზის კონვენციალური და არაკონვენციალური რესურსები. კერძოდ განვიხილოთ ბუნებრივი გაზის კონვენციალური დადასტურებული რეზერვები. ბუნებრივი გაზის მსოფლიო რეზერვები შეფასებულია (2018 წლის ბოლოსთვის IEA-ს მონაცემებით) 182.4 ტრლნ.მ³-ია, რაც საკმარისია წარმოების მიმდინარე დონის შესანარჩუნებლად 60 წლის განმავლობაში. 2000 წლიდან დადასტურებული რეზერვები გაორმაგდა, ხოლო 2018 წელს მარაგების მოპოვების წარმოების 190% შეადგინა. 2018 წელს აღმოაჩინეს სულ 9 ტრლნ.მ³-ის, ბუნებრივი გაზის მარაგები. ყველაზე დიდი აღმოჩენები დაფიქსირდა სამხრეთ იოლოტან-ოსმანის საბადოში (თურქმენეთი, 6 ტრლნ.მ³, მსოფლიოში რიგით მეხუთე, რომელიც თავდაპირველად დაზვერვა მოხდა 2012 წელს), იაშლარი თურქმენეთში (0.9 ტრლნ.მ³) და იუპიტერი ბრაზილიაში 0,6ტრლნ.მ³, შეკვი); გარდა ამისა, საბადოები დადასტურებული რეზერვებით მეტია ვიდრე 0,1 ტრლნ.მ³ და აღმოაჩინეს ირანში, ინდოეთში, ჩინეთში, ინდონეზიასა და ბანგლადეშში ღია მარაგით 10% შელფში. დადასტურებული რეზერვები თითქმის პრაქტიკულად კონვენციალურია; მხოლოდ 4%-ს (7,6 ტრლნ.მ³) მოდის არაკონვენციალური ბუნებრივი გაზის, ძირითადად ჩრდილოეთ ამერიკაში. ამავე დროს, ბუნებრივი გაზის არაკონვენციალურ სახეობებს უზრუნველყოფს მსოფლიო გაზის წარმოების 12%, ხოლო მარაგებით მათი მიწოდება დაახლოებით 20 წელია. ბუნებრივი გაზის მსოფლიოში დადასტურებული მარაგების დაახლოებით 38% კონცენტრირებულია 10 უმსხვილეს საბადოში, რომელთაგან 5 მდებარეობს რუსეთში. ამასთან, ყატარის მხოლოდ ყველაზე დიდი North Field საბადო შეიცავს მსოფლიოში ბუნებრივი გაზის რეზერვების 15.4% -ს (ნახ. 7).

დადასტურებული ბუნებრივი გაზის მარაგები უკიდურესად არათანაბრად არის განაწილებული მთელს მსოფლიოში. ცენტრალური აზიის ქვეყნები რუსეთთან ერთად, მსოფლიოს მარაგების 30%-ს შეადგენს, ხოლო შუა

აღმოსავლეთი - 41%. უფრო მეტიც, მხოლოდ სამი ქვეყანაში - რუსეთი, ირანი და ყატარი - განაწილებულია ბუნებრივი გაზის მსოფლიოში დადასტურებული რეზერვების ნახევარზე მეტზე.



ნახ. 7. ბუნებრივი გაზის მარაგები და რესურსები

დადასტურებული რეზერვები, პრინციპში, საკმარისია გაზის გლობალური მოპოვების შესანარჩუნებლად და გასაზრდელად მინიმუმ 2050 წლამდე, თუნდაც ახალი აღმოჩენების გათვალისწინების გარეშე. ამასთან, რეზერვების არათანაბარმა განაწილებამ რეგიონის მიხედვით, შეიძლება გამოიწვიოს მოპოვების შემცირება მრავალ განვითარებულ რაიონებში. ეს მოითხოვს ახალი საბადოების განვითარებას და რეგიონულ ბაზრებში დისბალანსების შექმნის შესაძლებლობა (ცხრილი. 4) [12].

სამყარო შედის ენერჯის განვითარების ახალ ეტაპზე, როდესაც, მრავალი ათწლეულის განმავლობაში ენერჯის მოხმარების უწყვეტი ზრდის შემდეგ, პირველად დაიწყო ეკონომიკურმა ზრდამ ენერჯის მოხმარების მოწყვეტა ზრდისგან. ბევრ ეკონომიკურად და ტექნოლოგიურად მოწინავე ქვეყანაში (ევროპული ეკონომიკური თანამშრომლობის ორგანიზაციის წევრები, OEEC), პირველადი ენერგომოხმარება სტაბილიზირებულია, ზოგიერთმა ქვეყანამ (ევროპის ზოგიერთი ქვეყანები, იაპონია) უკვე დაიწყო თანდათანობით შემცირება. ამ ფონზე, მსოფლიო ენერგომოხმარების ზრდის ტემპი შენელებულია. უფრო მეტიც, უახლოესი 25 წლის განმავლობაში, გაანგარიშების თანახმად, გაზი, ქვანახშირისა და ნავთობისგან განსხვავებით, შეძლებს გაზარდოს თავისი წილი

გლობალურ ენერგეტიკულ ბალანსში 2%-ით და აჩვენებს მოხმარების ყველაზე დიდ ზრდას აბსოლუტურ მოცულობებში, ყველა ტიპის საწვავებისათვის. მაგრამ ეს მოხდება საწვავის კონკურენციის არსებითი გაზრდის პირობებში [12].

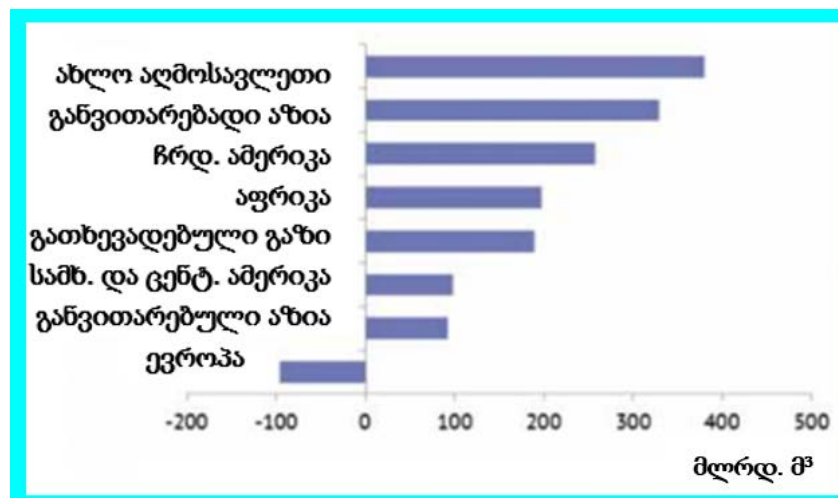
ცხრილი 4. ბუნებრივი გაზის კონვენციალური მარაგები და რესურსები წყარო: Cedigaz, USGS

რეგიონი	დადასტურებული მარაგები		მოპოვებული რესურსები		შესწავ- ლილი, %	უზრუნველყოფა, წელი	
	ტრლნ. მ3	მსოფ- ლიოს წილი, %	ტრლნ. მ3	მსოფლი- ოს, წილი %		მარაგები	რესურ- სები
ჩრდილო ამერიკა	9.5	5.2	2.2	8	29.5	12.2	41.4
ლათინური ამერიკა	7.5	4.1	22.4	5.5	33.5	52.4	156.6
ევროპა	5.4	3	21.3	5.3	25.4	18.4	72.4
გათხევა- დებული გაზი	54.9	30.1	136.5	33.8	40.2	64	159.1
ახლო არმოსავ- ლეთი	75.2	41.2	132.5	32.8	56.8	210.6	371.1
აფრიკა	14.7	8.1	28.7	7.1	51.2	71.4	139.3
აზია- წყნარი ოკეანის რეგიონი	15.2	8.3	30.8	7.5	49.4	37.3	75.7
მსოფლიო	182.4	100	404.4	100	45.1	60	152.9

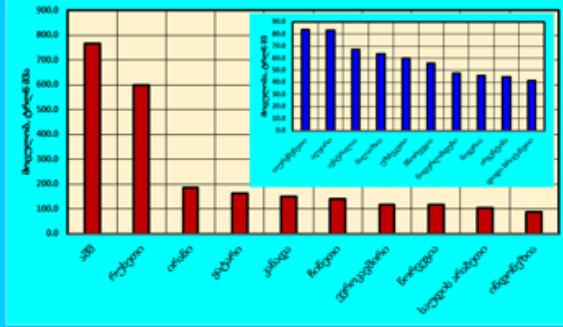
რეგიონალური თვალსაზრისით, გაზის მოპოვების მნიშვნელოვანი ზრდა პროგნოზირებულია ყველგან, გარდა ევროპისა, რომელმაც 2004 წელს მოპოვების პიკი უკვე გაიარა. ახლო აღმოსავლეთი, ჩრდილოეთ ამერიკა (ორივე რეგიონი შიგა

ბაზარზე მოთხოვნისა და ექსპორტის დასაკმაყოფილებლად) და აზიის განვითარებადი ქვეყნები ყველაზე აქტიური გახდება მოპოვების გაზრდაში (ნახ. 8). თითოეული რეგიონისთვის იქნება საკვანძო მამოძრავებელი მოპოვების გაზრდისთვის: ახლო აღმოსავლეთისთვის, ეს არის ინვესტიციების და ბაზრების გასაღება, აზიის, ევროპისა და ლათინური ამერიკის განვითარებადი ქვეყნებისთვის, მოპოვება გაორმაგდება და ერაყი გახდება 9%, საუდის არაბეთი, აგრეთვე ცენტრალური და აღმოსავლეთი ქვეყნები. აფრიკა - ახალი მოცულობის მნიშვნელოვანი ნაწილი გათვლილია შიგა ბაზრებისათვის. აღმოსავლეთ აფრიკაში საბადოების ექსპლუატაციაში შესვლა (მოზამბიკსა და ტანზანიაში), რომელიც პროგნოზირებულია 2025 წლიდან, შეიძლება მნიშვნელოვნად გაფართოვდეს 2030 წლის შემდეგ.

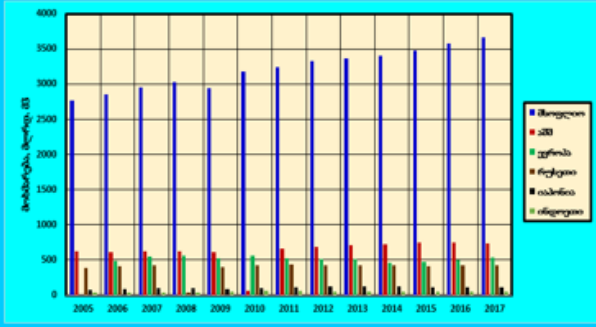
გაზის მოპოვება ავსტრალიაში, რომელიც უკვე ხდება მსოფლიოს ბაზარზე გაზის ერთ-ერთი უმსხვილესი მომწოდებელი, სავარაუდოდ, 2015-2040 სცენარისთვის წლებში გაიზრდება 2.6-ჯერ (100 მლრდ მ³-ით). აზიის განვითარებად ქვეყნებს შორის, ჩინეთში საშინაო გაზის მოპოვების სწრაფი ზრდაა მოსალოდნელია, 2040 წლისთვის ის სამჯერ გაიზრდება და 370 მლრდ მ³-ს მიაღწევს. ამავდროულად, ჩინეთში, აქტიური იქნება გაზის მოპოვების ყველა შესაძლებლობის გამოყენება, მათ შორის, როგორც ტრადიციული, ასევე ფიქალის გაზის და ასევე ნახშირის ფენების მეთანის მოპოვებისა და ბიოგაზის წარმოების ჩათვლით (ნახ. 9).



ნახ. 8. რეგიონის მიხედვით გაზის მოპოვების ზრდა 2020-2040 წლებში



ა



ბ

ნახ. 9. მსოფლიოს ბუნებრივი გაზის 2017 წლის სტატისტიკა: ა. დასაბუთებული მარაგები; ბ. მოხმარება

თავი 2. გაზის სექტორში წვის პროცესებისა და ვობბეს რიცხვის დიაგრამების ანალიზი

2.1. გაზის სექტორში წვის პროცესების ანალიზი

წვის პროცესი ინდუსტრიაში, ყოველთვის წარმოადგენდა კვლევების საგანს, რის გამოც, წვის პროცესში, მოხდა ენერგეტიკული მატარებლების უდიდესი წილის გადასვლა ნახშირიდან (პირველი თაობა) - ბუნებრივ გაზზე (მეორე თაობა), და მსოფლიოს ინდუსტრია ნახტომისებურად განვითარდა.

ამასთან დაკავშირებით, ატარებდნენ მიმოხილვას და ანალიზს ისეთი მკვლევარები, როგორებიცაა ვობბე, დელბური, ჯილბერტი, პრიგი, ვივერი, ნოი და ა.შ. [13-18]. განხილული ნაშრომები გამოჩნდა წინა საუკუნეში და მიუხედავად იმისა, რომ მათი კვლევები უკვე არქივულია, მათი წვლილი მეტად მნიშვნელოვანია და საინტერესოა. საქმე იმაშია, რომ ყველა ეს კვლევა დაკავშირებულია ვობბეს რიცხვსა და ალის გავრცელების სიჩქარესთან, აგრეთვე მნიშვნელოვანი ექსპერიმენტალური შედეგების გამო, შეიქმნა რამდენიმე დიაგრამა და ემპირიული ფორმულები. შემდგომ ამ მიდგომების გარკვეულმა მოდიფიცირებამ ასახვა პოვა დღევანდელობაში. მთავარია, რომ მსოფლიოში, დღეისათვის არ არსებობს უნივერსალური მეთოდი, რის გამოც ძნელდება აღნიშნული პარამეტრების ნორმირება. საქართველოში მხოლოდ ახლა იქმნება ელექტროენერჯისა და ბუნებრივი გაზის ბაზარი. აღნიშნული პრობლემა მეტად აქტუალურია და დაკავშირებულია არა წვის მექანიზმის კვლევასთან, არამედ შესაძლებლობასთან შეიქმნას კრიტერიუმებისა და დიაგრამების ერთობა, არსებულ ლაბორატორიულ და რეალურ მონაცემებზე დამყარებული სტოქასტიკური მიდგომა.

რა არის ვობბეს რიცხვი და რატომ არის იგი მნიშვნელოვანი ბუნებრივი გაზის სისტემებისთვის? ინდუსტრიაში ბუნებრივი გაზის ურთიერთჩანაცვალადობა დღეისათვის მთავარი თემაა. ეს არის მომხმარებელზე ორიენტირებული ძალისხმევა, რომ ბუნებრივი გაზის ხარისხი უზრუნველყოფს ტექნიკურ მოწყობილობების, ქვაბების, სანთურების და ა.შ. შრეუფერხებლად მუშაობას[19]

1927 წელს, ჯოფრედო ვობბემ, იტალიელმა, ბოლონიელმა ფიზიკოსმა, დააფიქსირა, რომ, წვისას გამომავალი ნაკადის პოტენციალი პროპორციულია თბოუნარიანობის და უკუპროპორციულია ფარდობითი სიმკვრივის კვადრატული ფესვისა [20].

გაზების არსებული სისტემების ურთიერთჩანაცვლების განსაზღვრისას გაზის სტანდარტების მიზანია უზრუნველყოს ნებისმიერი შემცვლელი საწვავი გაზის წვის ძირითადი პარამეტრები. იმ ფაქტმა, რომ ეს პარამეტრები ერთმანეთისგან დამოუკიდებლად არ არის, და, პირიქით ურთიერთგავლენას ახდენს, განაპირობა შემდეგი: პირველ რიგში, გაფართოვდა სხვადასხვა წვის პარამეტრების არჩევანი და გაჩნდა ჩანაცვალეზადობის სხვადასხვა ერთმანეთისგან განსხვავებული სისტემების მთელი რიგი; მეორეც, გაკეთდა დასკვნა იმის შესახებ, რომ ნებისმიერი პარამეტრის ზღვრული მნიშვნელობები ყოველთვის არ არის აბსოლუტური და ხშირად ის სხვა პარამეტრების საშუალებითაც განისაზღვრება. ჩანაცვალეზადობის კრიტერიუმი ხდება ორგანოზომილებიანი მახასიათებლებით, და თუნდაც სამგანზომილებიანიც - სამი ან მეტი ურთიერთდაკავშირებული შეზღუდვის პარამეტრებით.

მოკლედ მიმოვიხილოთ ევროპისა და აშშ-ში ყველაზე ფართოდ გამოყენებული ჩანაცვალეზადობის სისტემები. უნდა გვახსოვდეს, რომ თითოეული პარამეტრის ზღვრული მნიშვნელობები აღებულია ემპირიულად. სტანდარტების ემპირიული ხასიათისა და მათი მოქმედების მკაცრად განსაზღვრულ ნორმების გამო, გასაკვირი არ არის, რომ შეიძლება სხვადასხვა დასკვნების გამოტანა გაზების ჩანაცვალეზადობასთან დაკავშირებით. სხვა სიტყვით უნდა ვთქვათ, რომ ორი გაზი, რომლებიც პირველ სისტემაში გვაქვს ჩაუნაცვალეზადი, მეორეში - სრულად ჩანაცვალეზადობადია. ზოგჯერ, როდესაც ადარებენ საწვავის შემცვლელებს, სასურველია გავითვალისწინოთ არა ერთი, არამედ პარამეტრების რამდენიმე ჯგუფი.

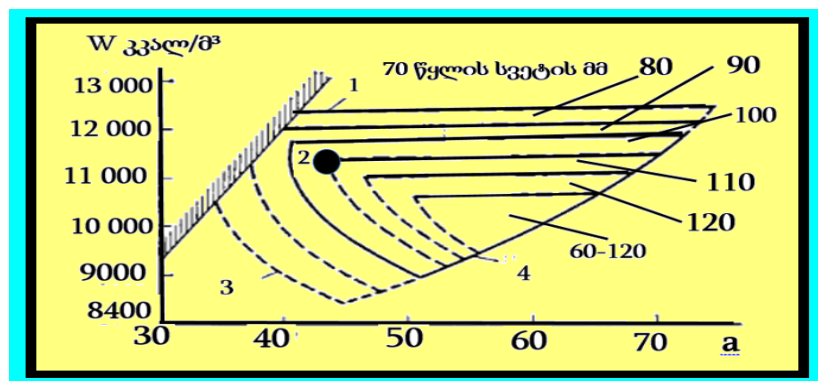
2.1.1. დელბურის სისტემა

დელბურის სისტემა [14,15] არის ერთ ერთი ყველაზე დეტალურად შემუშავებული პირველი თაობის გაზების სისტემა. ასევე მეორე თაობის

გაზებისთვის (ბუნებრივი გაზი); გაზები ითვლება ურთიერთჩანაცვალად, თუ ისინი არ გამოდიან სამკუთხედის ზღვრებიდან, გრაფიკზე ნაჩვენებია "წვის პოტენციალის" დამოკიდებულება ვობეს მოდიფიცირებულ რიცხვზე. ამ სამკუთხედის მხარეები წარმოიქმნება სამი წრფით, რომლებიც ქმნიან: წვის პროცესში ადამიანის ჯანმრთელობის გადასვლა უსაფრთხოდან საშიშზე, რაც ხასიათდება წვის პროდუქტებში 0,5%-ზე მეტი ნახშირორჟანგით; გადასვლა მდგრადი ცეცხლიდან ალის მოწყვეტამდე; აალების გავარდნა სანთურის შიგნით.

სამკუთხედი შედგენილია ემპირიულად, სახელმწიფო კომპანიის „გაზის დე ფრანსის“ ფოტომეტრული ნათურის მონაცემების საფუძველზე, აგრეთვე სანთურების და მოწყობილობების დიდი რაოდენობის დახმარებით, რომლებშიც მოხდა გამოცდა მოწყვეტაზე და შემოწმდა სხვადასხვა გაზის ნარევი აალების გახტომები, ნახშირორჟანგის ფორმირება და ალის გავარდნის შეღწევის მიზნით. დელბურის ტიპური დიაგრამა ნაჩვენებია ნახ. 10.

დელბურის დიაგრამის კოორდინატები, ე.ი. ვობეს მოდიფიცირებული რიცხვი და წვის პოტენციალი - გაზის გამოცდის ერთადერთი მახასიათებელია. ვობეს მოდიფიცირებული რიცხვი მიიღება ვობეს რიცხვის წვის უმაღლესი სიტბოს მნიშვნელობის გამრავლებით ორ მოდიფიცირებულ ფაქტორზე, რომელთაგან ერთი ითვალისწინებს მაღალმოლეკულურ ნახშირწყალბადებს, მეორე - გაზში ჟანგბადის არსებობას, როგორც სუფთა, ასევე ნახშირორჟანგის სახით, გაზებისათვის, რომლებიც ძირითადად შედგება მეთანისგან, ამიტომ ორივე კორექტირება უმნიშვნელოა.



ნახ. 10. გაზის ურთიერთჩანაცვალადობის დელბურის დიაგრამა: 1. არასრული წვა; 2. ლაკის საბადოს გაზი; 3. ალის გახტომები; 4. ალის მოწყვეტა; W არის ვობეს რიცხვი; a - გაზის ნარევის წვის პოტენციალი (ჟანგბადის წვის პოტენციალი ითვლება 100-ად)

წვის პოტენციალი არის მისი სიჩქარის გავრცელების ირიბი ზომა. იგი ემყარება თითოეული ცალკეული გაზის კომპონენტის დამახასიათებელ რამდენიმე ფაქტორს, კერძოდ: წყალბადი, ნახშირორჟანგი, მეთანი და ინერტული აირები.

გაზის ნარევის წვის პოტენციალი დელბურის მიხედვით გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$a = \frac{k_1 k_2 \sum i a_i}{\sqrt{\rho}}, \quad (2)$$

ცხრილი 5. დელბურის პარამეტრები: შენიშვნა: I - ინერტული კომპონენტების მოლური შემცველობა; საწვავში O₂ - ჟანგბადის შემცველობა

გაზის კომპონენტი და საანგარიშო ფორმულა	ურთიერთჩანაცვლების სისტემა		
	დელბური	ვივერი, ჯილბერტი-პრიგვი	ჰოლკმვისტი
წვის პოტენციალი, a_i		წვის გავრცელების სიჩქარე, F	კოეფიციენტის მახასიათებელი X_K
წყალბადი	1,0	339	0,291
მეთანი	0,3	148	7,24
ეთანი	0,75	301	10,59
პროპანი	0,95	398	13,34
ბუტანი	1,0	513	14,06
ნახშირორჟანგი	0,7	61	0,487
ეთილენი	1,9	454	7,66
ნარევის ფორმულა	$\frac{k_1 k_2 \sum i a_i}{\sqrt{\rho}}$	$\frac{\sum i F}{\sum i A + 5I - 18,8O_2 + 1}$	$\frac{\sum i X_K}{\sqrt{\rho}}$

სადაც a არის რამდენიმე გაზის საწვავი კომპონენტის წვის პოტენციალი; k_1, k_2 - ემპირიული სიდიდეები, რომლებიც დამოკიდებულია ჟანგბადის კონცენტრაციაზე და ვობეს მოდიფიცირებულ რიცხვზე (მრავალი ბუნებრივი

გაზებისათვის ტოლია ერთის); i - თვითეული კომპონენტის მოცულობა, %; a_i - ნარევის ცალკეული i კომპონენტის წვის პოტენციალი (ცხრილი 5); ρ - ფარდობითი სიმკვრივე.

ითვლება, რომ დიაგრამა აწესებს მეტად დიდ შეზღუდვებს და ვრცელდება მხოლოდ ფრანგული წარმოების მოწყობილობებისთვის, რაც საწვავის თვალსაზრისით შორს არის უნივერსალურისგან.

ვობებს მოდიფიცირებული რიცხვისა და წვის პოტენციალის გარდა, დელბურის სისტემა საშუალებას გვაძლევს შეაფასდეს გაზის უნარი წარმოქმნას ყვითელი ენები და ჭვარტლი თითოეული ცალკეული კომპონენტისთვის წვის პოტენციალის გამოყენებით. ურთიერთჩანაცვლების ან ჭვარტლის წარმოქმნის ზოგადი ინდიკატორის მოცემული კომპონენტის მოლურის შემცველობა, მრავლდება მისი წვის პოტენციალზე. რეალური ურთიერთჩანაცვლების უზრუნველსაყოფად, არც ერთი და არც მეორე ინდიკატორი არ უნდა აღემატებოდეს აირის შესაბამის მნიშვნელობას.

განვიხილოთ რამდენიმე მნიშვნელოვანი დიაგრამა (სისტემა):

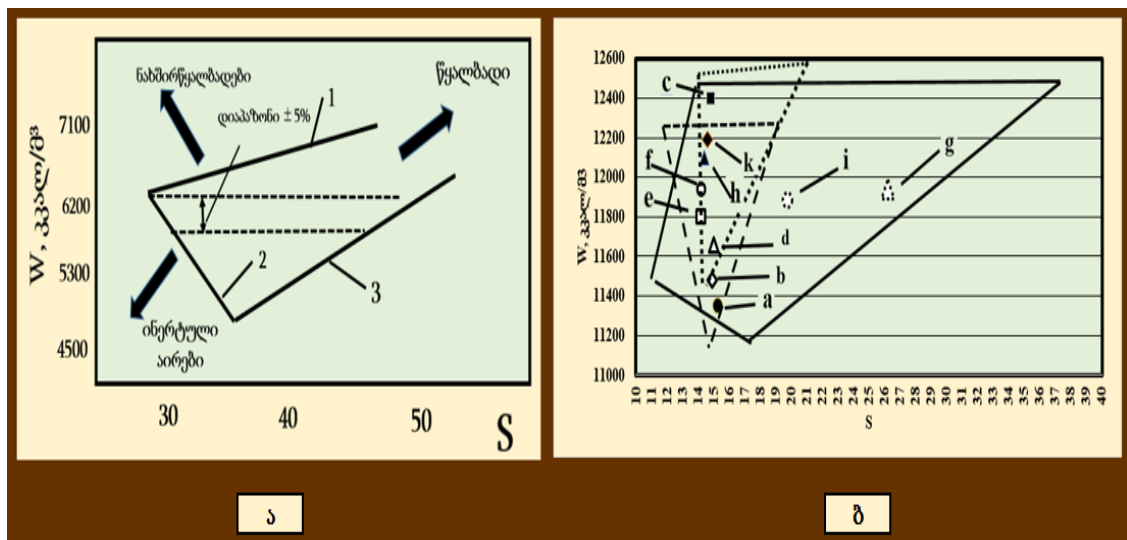
2.1.2. ჯილბერტ-პრიგის დიაგრამა

ჯილბერტ-პრიგის სისტემა [21,22] ასევე გრაფიკულია. ჯილბერტ-პრიგის გრაფიკაზე, ცვლადია ვობებს რიცხვი და ალის გავრცელების სიჩქარის კოეფიციენტი ვივერის მიხედვით. ურთიერთჩანაცვლების დიაგრამას აქვს სამკუთხედის ფორმა, რომლის მხარეები წარმოიქმნება არასრული წვის, ალის გავარდნისა და მოწყვეტის შედეგად ჩაქრობის შემცირების შესაბამისი წირებით.

ეს სქემა ფართოდ გამოიყენება დიდ ბრიტანეთში და ბრიტანეთის თანამეგობრობის სხვა ქვეყნებში. ურთიერთჩანაცვლების საზღვრები დადგენილია ე.წ. აერაციის ფოტომეტრული ნათურის ტესტირების დროს. მრავალი წლის განმავლობაში ინგლისური სანთურები და სანთურების მოწყობილობები მუშაობდნენ რამდენიმე ტიპის ეტალონურ გაზზე, სხვადასხვა ვობებს რიცხვებით. ამ სანთურებისა და სანთურების მოწყობილობები

უნივერსალურობა ის არის, რომ უნდა მოხდეს ნებისმიერ გაზის წვა, დადგენილი ნორმების მიხედვით.

ეს დიაგრამა უკიდურესად ეფექტური იყო ნახშირის გაზების და სხვა ჩანაცვლადი გაზებისთვის, ლიგროინის საფუძველზე. მეორე თაობის გაზზე ჯილბერტ-პრიგის კრიტერიუმების გამოყენების მცდელობისას წარმოიქმნა გარკვეული სირთულეები, რომლებიც შემდგომში გადაილახა და ამჟამად ეს სისტემა მოქმედებს როგორც პირველი, ასევე მეორე თაობის გაზებისათვის.



ნახ. 11. გაზის ურთიერთჩანაცვალეების დიაგრამა ჯილბერტ-პრიგის მიხედვით: 1 არასრული წვა; 2. ალის მოწყვეტა; 3. ალის გახტომა; 4. ინგლისური ურბანული გაზი (G4); 5. გაზების ნარევის ალის გავრცელების სიჩქარის კოეფიციენტი წყალბადის მიმართ (წყალბადი პირობითად ჩათვლილია 100); ბ. გაზების ურთიერთჩანაცვალეობის პროგნოზირების მეთოდების შედარება: ხარისხის დასაშვები გადახრა; 1, 2, 3 - შესაბამისად, ინგლისური, ამერიკული და ფრანგული მოწყობილობა; a - ჩრდილოეთი ზღვის ეტალონური გაზი; b - აშშ-ს ბუნებრივი გაზი; c - ალჟირის გათხევადებული გაზი; d - კატალიზურად გამდიდრებული გაზი ორსაფეხურიანი მეთანიზაციით; e - კატალიზურად გამდიდრებული გაზი, რომელიც მიღებულია ჰიდროგაზიფიკაციის მეთოდით; f - გაზი, რომელიც მიიღება თხევადი ფენიდან ნედლი ნავთობის ჰიდროგენიზაციის პროცესში, შემდგომი მეთანიზაციით; g - გაზი, რომელიც მიღებულია ჰიდროგენიზაციის პროცესში, გაზის რეცირკულაციით, შემდგომი ნახშირორჟანგიდან მოცილებით და პროპანთან შერევით; h, I, k - გაზები, რომლებიც მიღებულია "Haygas", "Bi-gas", "CO₂- Acceptor" მეთოდებით.

ნახ.11ა-ზე ნაჩვენებია ჯილბერტ-პრიგის სისტემის ურთიერთჩანაცვალეების არეალი, ურბანული გაზისთვის (G4), აგრეთვე სხვადასხვა ტიპის გაზის კომპონენტებისთვის. დიაგრამაზე ორდინატაზე არის ვიზუალურად რიცხვი

(არამოდიფიცირებული), ხოლო აბსცისზე - ალის გავრცელების სიჩქარის კოეფიციენტი ვივერის (G_4) მიხედვით.

ალის გავრცელების სიჩქარის კოეფიციენტი ვივერის მიხედვით, არ გვიჩვენებს ფარდობითს, წყალბადის დაწვის სიჩქარესთან შედარებით, პირობითად, 100-ის ტოლი; რეალური სიჩქარე შეიძლება შეფასდეს რამდენიმე გზით, და ეს დამოკიდებულია ფაქტორებზე, როგორებიცაა წნევა, ტემპერატურა და ტენიანობა. აირის ნარევის ალის სიჩქარის კოეფიციენტი განისაზღვრება ფორმულით:

$$S = \frac{\sum F_i}{\sum A_i + 5I + 18,8O_2 + 1}, \quad (3)$$

სადაც F_i არის ალის გავრცელების სიჩქარის კოეფიციენტი ვივერის მიხედვით, გამრავლებული მისი მოლურ შემადგენლობაზე; A_i - თითოეული კომპონენტის სტოქიომეტრული შექმნილი ნარევის ჰაერის ხარჯი, გამრავლებულს მის მოლურ შედგენილობაზე.

2.1.3. ვივერის სისტემა

დელბურისა და ჯილბერტ - პრიგის სისტემებისგან განსხვავებით, ვივერის მიერ შემოთავაზებული გაზის ურთიერთჩანაცვლების კრიტერიუმები ერთმანეთისგან დამოუკიდებელია და, შესაბამისად, არ მოითხოვს მათ წარმოდგენას გრაფიკული ან დიაგრამის სახით. ვივერი განსაზღვრავს ხუთ ინდიკატორს [17]:

ალის მოწყვეტა

$$J_L = J_r \frac{S_s}{S_r} + \frac{(100 - O_2)_s}{(100 - O_2)_r}. \quad (4)$$

ალის გახტომა

$$J_F = \frac{S_s}{S_r} = 1,4J_r + 0,4. \quad (5)$$

ყვითელი ენები

$$J_y = J_r + \frac{N_s - N_r}{110} - 1. \quad (6)$$

CO -ს წარმოქმნა

$$J_I = J_r - 0,366 \frac{R_s}{R_r - 0,634}. \quad (7)$$

სითბური სიმძლავრე

$$J_H = \frac{W_s}{W_r}, \quad (8)$$

სადაც J_r არის გაზისა და ჰაერის პირველადი შერევის ცვლილების ხარისხი, გაზის ჩანაცვლების გადასვლის შედეგად; S - ალის გავრცელების სიჩქარე; N, R - ფაქტორები, რომლებიც ახასიათებს ჰვარტლის და მოლეკულურ გაუჯერების წარმოქმნას; ინდექსები s, r - შესაბამისად გვიჩვენებს გაზის ჩანაცვალებას და ეტალონური გაზს, შესაბამისად.

თერმული ენერჯის სფერული ურთიერთჩანაცვლების მაჩვენებელი გვიჩვენებს, რომ ალის, ყვითელი ენების და CO -ს შექმნა - ნულია. დაშვებები ამა თუ იმა მიმართულებით არ უნდა აღემატეს 5%-ს. ტოლერანტობა ერთი მიმართულებით ან სხვა მიმართულებით არ უნდა აღემატებოდეს 5% -ს.

2.1.4. ნოის ფორმულები

იმის გამო, რომ აშშ-ში ბუნებრივი აირები იშვიათად შეიცავს არანახშირწყალბადის კომპონენტებს, ამიტომ, აშშ-ს მრავალი ენერგეტიკული კომპანია დაინტერესებულია მხოლოდ სანთურების სითბოს სიმძლავრით და უგულებელყოფს გაზის სხვა ისეთ მახასიათებლებს, რომლებიც გავლენას არ ახდენს თბურ მწარმოებლობაზე. განვიხილოთ ნოის ორი ფორმულა [17,18]:

$$C = (CV - 175)\sqrt{\rho}, \text{ დასაშვები ცვლილებით } \pm 5\%; \quad P_s = \frac{CV_s \sqrt{\rho_r}}{\sqrt{\rho_r + CV - P_r} \sqrt{\rho_s}}, \text{ (15\%-}$$

იანი ცვლილებით, რაც ემყარება, რომ სანთურის კონსტრუქციის წვის თავში გაზის ნარევის წვის სითბოს ოპტიმალური P -ს მნიშვნელობა უდრის 1560 კკალ/მ³ (7 ათასი კჯ/მ³). თუ წვის სითბოს ავლნიშნავთ CV -თი, მაშინ C არის ვობბეს რიცხვების სხვაობა, ჰაერით განუზავებული გაზებისთვის. ნოი ირწმუნება, რომ ეს განსხვავება შეიძლება იყოს არაუმეტეს 5%.

მეორე ფორმულა, რომელშიც ინდექსები S და r შესაბამისად წარმოადგენს მუშაობას შემცვლელ გაზზე, რომლებიც საშუალება გვაძლევს მუშაობას ისეთი გაზებით, რომლისთვისაც წვის სითბოს მნიშვნელობა არ განსხვავდება 1560 კკალ/მ³-დან (7 ათასი კჯ/მ³), და ამით შესაძლოა ისეთი წვის სითბოს CV -ს რეგულირება და გაზის ფარდობითი შემცვლელი-გაზის სიმკვრივე, რომ P_s -ს მნიშვნელობა შეიძლება არ განსხვავდებოდეს 15% ის ფარგლებში.

წვის გავრცელების სიჩქარე და, შესაბამისად, მისი ფორმა, ჭვარტლის და ყვითელი ენების წარმოქმნის მაჩვენებლები, ნოი თვლის, რომ ისინი მეორადი ცვალებადი სიდიდეებია.

2.2. გაზის ურთიერთჩანაცვლების განსაზღვრის სხვა სისტემები და შედარებითი შეფასება

ვივერისა და ნოის მიერ შემოთავაზებული ურთიერთჩანაცვლების სისტემების გარდა, ცნობილია შეფასების კიდევ ერთი ერთი მეთოდი - გაზის ამერიკული ასოციაციის მეთოდი [23]. ევროპაში, ბრიტანული და ფრანგული სისტემების გარდა, არსებობს ჰოლკმვისტის (შვედეთი) მიერ შემუშავებული სისტემა, სადაც ე.წ. დამახასიათებელ პარამეტრად გამოიყენება ალის გავრცელების სიჩქარის კოეფიციენტი [24]:

$$C_K = \frac{k_1 \sum iX_K}{\sqrt{\rho}} \quad (9)$$

სადაც C_K არის გაზების მახასიათებელი კოეფიციენტი, რომელიც შედგება რამდენიმე საწვავი კომპონენტისგან; k_1 - ინერტული კომპონენტების შედგენილი ფუნქცია გაზის ნარევაში; i - ამ კომპონენტის მოლური შინაარსი; X_K - გაზის ნარევის ცალკეული კომპონენტების მახასიათებელი კოეფიციენტი (ცხრილი 6).

ჰოლკმვისტის მეორე პარამეტრია უმცირესი წვის სითბოს ვობეს რიცხვი. გაზები განიხილება, როგორც სრული ურთიერთჩანაცვლებადი, W_{ud} განსხვავდება ნაკლები სიზუსტით, თუმცა ალბათ არ უნდა აღემატებოდეს 3% -ს.

ურთიერთჩანაცვლების ნორმების დადგენა და გაზების ხარისხობრივი პარამეტრების დასაშვები გადახრები, არის ყველა ტიპის გაზზე მომუშავე

სანთურების, საყოფაცხოვრებო ტექნიკის და სამრეწველო მოწყობილობების დამაკმაყოფილებელი ფუნქციონირების უზრუნველყოფა, რაც მომხმარებლებს მოცემულ რეგიონში გაზგანაწილების ქსელის საშუალებით შეუძლიათ მიიღონ. საყოფაცხოვრებო ტექნიკის წარმოება ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი ოპერაციაა შემდეგი ორი მიზეზის გამო: აუცილებელია სტანდარტული შესრულების ზუსტად დაცვა. სამრეწველო სანთურებისგან განსხვავებით, მათი დათვალიერება და რეგულირება იშვიათად ხდება ტექნიკური პერსონალის მიერ. შედეგად, გასაკვირი არ არის, რომ სხვადასხვა ქვეყნებში წარმოიქმნა სხვადასხვა გაზის ურთიერთჩანაცვლების სისტემა, რადგანაც საერთაშორისო სტანდარტებისა და გაზებისა და გაზის მოწყობილობების ერთიანი სტანდარტი დაიკარგა, რაც დაიწყო ნახშირის გაზიდან (პირველი თაობის) ბუნებრივ (მეორე თაობის) გაზზე გადასვლით. ეს ძირითადად იმით არის განპირობებული, რომ ამგვარი გადასვლა სხვადასხვა ქვეყანაში არაერთდროულად განხორციელდა, გარდა ამისა, თითოეული თაობის ფარგლებშიც კი, აღინიშნა გაზების თვისობრივი განსხვავებები (ნახ. 11ბ).

ამ ნახაზის გრაფიკზე ნაჩვენებია ვობბეს რიცხვის დამოკიდებულება ალის გავრცელების სიჩქარის კოეფიციენტზე, საფრანგეთში, აშშ-სა და დიდ ბრიტანეთში ეტალონურ გაზთან, დაშვებული გადახრების გათვალისწინებით. აშშ-ში გაზების ხარისხის დაშვებები უფრო მკაცრია, ვიდრე ევროპაში, რაც მიუთითებს ამერიკული გაზქურის მოწყობილობების დაბალ უნივერსალობაზე, განსაკუთრებით, ალის გავრცელების სიჩქარის მიხედვით.

ასე რომ, შეიძლება ჩანდეს, რომ ძნელია სხვადასხვა უპირეტესობისა და სისუსტეების შეფასება, რადგანაც ის მჭიდრო კავშირშია კონკრეტულ გაზის სანთურების მოწყობილობასთან. ამასთან, ჰოლკვისტის, ჯილბერტ-პრიგისა და დელბურის სისტემების საფუძველზე შეიძლება გაკეთდეს შემდეგი ზოგადი დასკვნა: ორივე სამკუთხედი ჰორიზონტალურად არის გაჭიმული, და იგი მოიცავს წვის სიჩქარის ფართო სპექტრს. ამრიგად, ალის გავრცელების სიჩქარეები, წვის პოტენციალი და მახასიათებელი ჰოლკვისტის კოეფიციენტი მეორეხარისხოვანია და, ჩვენი აზრით, მათი უგულებელყოფა შესაძლებელია. ეს ნიშნავს, რომ ურთიერთჩანაცვლება, ყოველ შემთხვევაში, ევროპაში, არ ითვლება ჭვარტლის და ყვითელი ენების წარმოქმნა, შეიძლება ჩაითვალოს ვობბეს რიცხვის დასაშვებ

ცვლილებებზე (ჩვეულებრივად - ვივერისა და ჯილბერტ-პრიგის სისტემებისთვის, მოდიფიცირებული - დელბურის სისტემისთვის და ვობბეს რიცხვის წვის სითბოს ყველაზე უდაბლეს მნიშვნელობაზე - ჰოლკმეისტის სისტემისთვის).

განვიხილოთ ურთიერთჩანაცვლების დიაგრამების გამოყენება ბუნებრივი გაზის შემცვლელებისას, სხვადასხვა მეთოდით მიღებული გაზების ტიპური მახასიათებლები. დიაგრამაზე მდებარეობის მიხედვით, (ცხრილი 6, ნახ. 11ბ) (c-დან k-მდე) შეგვიძლია ვთქვათ, რომ a მისაღებია მათი სრული ჩანაცვლებისთვის, ან მხოლოდ ძირითადი გაზის (a და b) ნაწილობრივი დანამატისთვის. უნდა აღინიშნოს, რომ ნახშირისგან წარმოებული შემცვლელი აირები (d, e) ყველაზე მჭიდროდ შეესაბამება სრულ ურთიერთჩანაცვლების კონცეფციას. ჰიდროგენზაციის პროდუქტების გაზები (f, g), მისაღებია ვობბეს რიცხვით, მაგრამ ძალიან მაღალია ალის გავრცელების კოეფიციენტით, განსაკუთრებით ფრანგული და ამერიკული მოწყობილობებისთვის.

დასკვნის სახით, შეგვიძლია ვთქვათ, რომ ურთიერთჩანაცვლების შესაფასებლად ყველაზე მარტივი და ალბათ ყველაზე საიმედო პრაქტიკული მეთოდია ჩვეულებრივი ვობბეს რიცხვი, ან მისი ერთ-ერთი წარმოებული, რაც საშუალებას იძლევა თბური ენერჯის პროგნოზირებისა.

გრაფიკული მეთოდები და ანალიზური ფორმულები, საშუალებას გვაძლევს დავინახოთ ვობბეს რიცხვისა და ალის წვის სიჩქარის კოეფიციენტის განსხვავებები, რაც უდავოდ ფართოდ გამოიყენება. მიუხედავად ამისა, მათ შეუძლიათ გამოიწვიონ ურთიერთსაწინააღმდეგო შედეგები სხვადასხვა ქვეყნის მოწყობილობას შორის [25]. ამიტომ, თეორიულად და პრაქტიკაში, ეს განსხვავებები უგულვებელყოფილი უნდა იქნეს და ნახშირწყალბადური გაზების შედარებისას, უნდა ვიხელმძღვანელოთ, ვობბეს რიცხვის კრიტერიუმით.

აშშ მნიშვნელოვნად და ხანგრძლივად, ვიდრე დანარჩენი მსოფლიოს ძირითადი გაზის ბაზრები, არ დაეთანხმა გაზის ურთიერთჩანაცვლებს სისტემის გამოყენებას, განსაკუთრებით გათხევადებული გაზის იმპორტთან დაკავშირებით. აშშ-ს გაზის ინდუსტრია ჯერ კიდევ ადაპტირდება სხვადასხვა გათხევადებული გაზის მახასიათებლების მიმართ. იმ განკარგულების გათვალისწინებით, რომელიც საბოლოოდ 2006 წლის შუა რიცხვებში მიიღო აშშ-ს ენერჯეტიკის

მარეგულირებელი ფედერალური კომისიამ (FERC), ეს საკითხი მარტივად შეიძლება მოგვარდეს გაზების მახასიათებლებისა და ტექნიკური შესაძლებლობების დასადგენად შესაბამისი ტექნიკური საშუალებების შემუშავებით [26].

ცხრილი 6. ტიპური ბუნებრივი გაზის წვის ურთიერთჩანაცვლადობის პარამეტრები

გაზი	წერტილი დიაგრამაზე	ვობბეს რიცხვი, კკალ/მ ³	ალის გავრცელების სიჩქარე ვივერის მიხედვით
ჩრდილოეთი ზღვის გაზი	a	11880	14,2
აშშ-ს ბუნებრივი გაზი	b	12192	14,3
ალჟირის გათხევადებული გაზი	c	12681	14,8
კატალიზურად გამდიდრებული გაზი ორსაფეხურიანი მეთანიზაციით	d	11942	14,2
კატალიზურად გამდიდრებული გაზი, რომელიც მიღებულია ჰიდროგაზიფიკაციის მეთოდით;	e	11942	14,4
გაზი, რომელიც მიიღება თხევადი ფენიდან ნედლი ნავთობის ჰიდროგენიზაციის პროცესში, შემდგომი მეთა-ნიზაციით;	f	11880	19,8
გაზი, რომელიც მიღებულია ჰიდროგენიზაციის პროცესში, გაზის რეცირკულაციით, შემდგომი ნახშირორჟანგიდან მოცილებით და პროპანთან შერევით	g	11942	26,2
"Haygas"	h	11658	15,0
"Bi-gas"	i	11480	14,9
„CO ₂ - Acceptor"	k	11346	15,3

გაზის სხვადასხვა სახეების ურთიერთჩანაცვლება ჩვეულებრივი პრობლემაა გაზგამანაწილებელი ქსელებისთვის, რომელიც მოგვარებულია გაზის მთავარ ბაზრებზე მთელს მსოფლიოში, განსაკუთრებით იქ, სადაც გაზი მიწოდება ხორციელდება მრავალი სხვადასხვა წყაროდან, განსხვავებული მახასიათებლებით. მაგალითად, კონტინენტალურ ევროპაში, რამდენიმე წლის განმავლობაში, ბაზარზე შემოვიდა ძალიან მშრალი გაზის დაახლოებით 20 სხვადასხვა კლასის და იმპორტირებული გათხევებული გაზის დაახლოებით 15 სხვადასხვა გაზის ნარევი, ხოლო ზოგიერთი ქვეყანა (ბელგია, საფრანგეთი, გერმანია და ნიდერლანდები) მუშაობდა გაზსადენის სატრანსპორტო ერთიანი სისტემით, როგორც მაღალი და დაბალი კალორიური გაზისთვის. ამ ქვეყნებში გაზმომარაგების სფეროში გაზის ტიპების ურთიერთჩანაცვლება არის გადაუდებელი პრობლემა, რომლის მოგვარება გახდა აუცილებელი, ხოლო რიგი მხარეების შეთანხმდნენ კომპოზიციურ ნორმებზე, რომ გაუმკლავდნენ ამ მრავალფეროვან ნარევებს და კომპოზიციებს.

თავის მხრივ, ჩრდილოეთ ამერიკა და დიდი ბრიტანეთი, სადაც ისტორიულად მოიხმარება შედარებით დაბალკალორიული გაზი, იძულებული გახდნენ, შეექმნათ გაზების ურთიერთჩანაცვლება, რომლებიც შედის სისტემაში მცირე, მაგრამ მნიშვნელოვან ჯგუფებში. ამრიგად, გაზის ტიპების ურთიერთჩანაცვლების საკითხები კვლავ ექვემდებარება სახელმწიფო ხარისხის სტანდარტების ზოგად პრინციპებს გათხევებული გაზის და არატრადიციული გაზის წყაროების იმპორტთან დაკავშირებით, როგორც აშშ-სა და დიდ ბრიტანეთში.

აღმოჩნდა, რომ გაზის მომხმარებლებს ურჩევნია ხარისხის განსაზღვრა ვობეს რიცხვით. აშშ-ში გაზის ტრანსპორტირებისთვის ტარიფების უმეტესობის არსებული ტექნიკური მონაცემები, დაფუძნებულია გაზის სრულ თბოუნარიანობაზე. ყველა სისტემა ადგენს მინიმალურ და მაქსიმალურ თბოუნარიანობის მნიშვნელობას. თბოუნარიანობის მნიშვნელობის მიხედვით, არსებული გაზის განაწილების ქსელები იყოფა სამ მთავარ ჯგუფად: აზია (იაპონია, კორეა, ტაივანი), სადაც მიწოდებული გაზი გამდიდრებულია, რომლის თბოუნარიანობა 43 მლნ. ჯ/მ3 (1 090 btu/st. Ft3); დიდ ბრიტანეთში და შეერთებულ შტატებში, სადაც მიწოდებული გაზი ღარიბია, თბოუნარიანობა ნაკლებია 42 მლნ. ჯ/მ3 (1 065

btu/std. Ft3); კონტინენტური ევროპა, სადაც მიღებული თბოუნარიანობის მნიშვნელობის დიაპაზონი საკმაოდ ფართოა - დაახლოებით 39-46 მლნ. ჯ/მ³ (990 - 1 160 btu/std. Ft3).

ამასთან, თბოუნარიანობის მნიშვნელობა არ არის დაკავშირებული გაზის წვის ეფექტურობასთან, არამედ მხოლოდ მის კალორიულობასთან. ბევრი პირველადი მომხმარებელი, პირველ რიგში, დაინტერესებულია წვის ეფექტურობასა და წვის მოწყობილობის რეგულირების მეშვეობით ამ მახასიათებლების ოპტიმიზაციაში. გაზის წვის ეფექტურობა უშუალოდ დაკავშირებულია სტანდარტთან, და აუცილებელია გაზის თბოუნარიანობის მნიშვნელობის კორექტირება, მისი ფარდობითი სიმკვრივის შემასწორებელით. ეს ურთიერთჩანაცვლების განსაზღვრის ყველაზე ფართოდ მიღებული საერთაშორისო გზაა. უდაბლესი თბოუნარიანობის მნიშვნელობიდან BTU/std. ft3 [კჯ/ნმ³] და აბსოლუტური სიმკვრივით, გაზის ვობბეს რიცხვი შეიძლება გამოითვალოს, როგორც უდაბლესი თბოუნარიანობის მნიშვნელობის გაყოფა ფარდობითი სიმკვრივის კვადრატულ ფესვთან.

ეს მაჩვენებელი ხშირად გამოიყენება, განსაკუთრებით დიდ ბრიტანეთში, როგორც პარამეტრი, რომლის ზედა ზღვარი წარმოადგენს მთავარ შეზღუდვას გამდიდრებული გაზების იმპორტისათვის. ძირითადი გაზის შემადგენლების შეზღუდვები, წარმოადგენს მეთანის მინიმალურ მოცულობას და ეთანის, პროპანის, ბუტანის, პენტანებისა და უფრო მძიმე ფრაქციების, აგრეთვე ინერტული აირების (განსაკუთრებით აზოტის, ჟანგბადის და ნახშირორჟანგის) მაქსიმალურ მოცულობებს.

მეტად მნიშვნელოვანია ნაშრომი [27], რომელშიც განხილულია ახალი გამოწვევები და მის განხორციელების რეალური მიდგომები. 2019 წელს, კონფერენციაზე განიხილეს H-გაზი, რომელიც წარმოადგენს მაღალკალორიულ ბუნებრივ გაზს, ანუ ეს გაზი შეიცავს უფრო მძიმე ნახშირწყალბადების შედარებით დიდ პროპორციებს და, შესაბამისად, უფრო მეტი ენერჯია გააჩნია. აქვე განხილულია ევროკავშირის გაზის ხარისხის სტანდარტის მიღების ამოცანები.

მიმდინარე გამოწვევები შემდეგია: ნაციონალური (ევროპული) ვობბეს რიცხვის მდგომარეობა; ჰოლისტიკური მიდგომის საჭიროება ევროკავშირის სამართლებრივი და ეროვნული ჩარჩოს ჩათვლით. როგორ უნდა შევიდეს

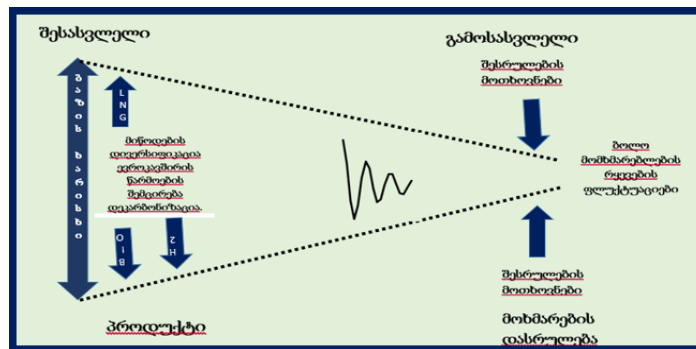
განახლებადი გაზების ხარისხი სტანდარტში, ამასთან დაკავშირებულია შემდეგი საკითხები: ა) შეუსაბამობა ამჟამად მოქმედი გაზების ვობბეს რიცხვის ღირებულებებსა და მათ სამართლებრივ ზღვრებს შორის; ბ) შიდა კონფლიქტი საბოლოო მოხმარების ეფექტურობის უზრუნველსაყოფად და გაზმომარაგების დივერსიფიკაცია/დეკარბონიზაციას შორის. გ) გათხევებული გაზი ითხოვს მაღალი ვობბეს რიცხვის მნიშვნელობებს, ძველი წარმოებისთვის ვობბეს რიცხვის დაბალ მნიშვნელობებს ზოგიერთ ქვეყანაში; დ) გამოყენებითი პროგრამები ხშირად მორგებულია და რეგულირდება ადგილობრივი გაზის ხარისხისათვის - ზოგადად, ვობბეს რიცხვის რეალურ დროში; ე) ვობბეს რიცხვის ფარდობით ცვლილებებზე გამოიყენება აბსოლუტურ მნიშვნელობებზე მეტი მნიშვნელობები. ვ) გაზის ხარისხი არ არის მხოლოდ ვობბეს რიცხვი (ცვლილების დიაპაზონი და სიჩქარე), არამედ, შემადგენლობა. ზ) არ არსებობს ევროკავშირის უსაფრთხოების შენარჩუნების ჰარმონიული კრიტერიუმები და ემისიების გამოყენება (ნახ. 12).

განვიხილოთ, სტანდარტის დამატება - მიდგომა მიმდინარე შეფასებისას: 1. ევროკავშირის მასშტაბით ვობბეს რიცხვის დიაპაზონი გაზის სისტემის შესასვლელ წერტილებში, მიმდინარე და მომავალი გაზის გათვალისწინებით (განახლებადი/დაბალი ნახშირის აირების, გათხევებული გაზის, ძველი წყაროების ჩათვლით) (ნახ. 13). 2. ვობბეს რიცხვის გასასვლელი წერტილების კლასიფიკაცია საბოლოო დანიშნულების მიზნით: სტაბილურობის კრიტერიუმების ჩათვლით (ვობბეს რიცხვის დიაპაზონი, ცვლილების ტემპი); სათანადო ადგილობრივი ვობბეს რიცხვის ინფორმაციის მიწოდება.

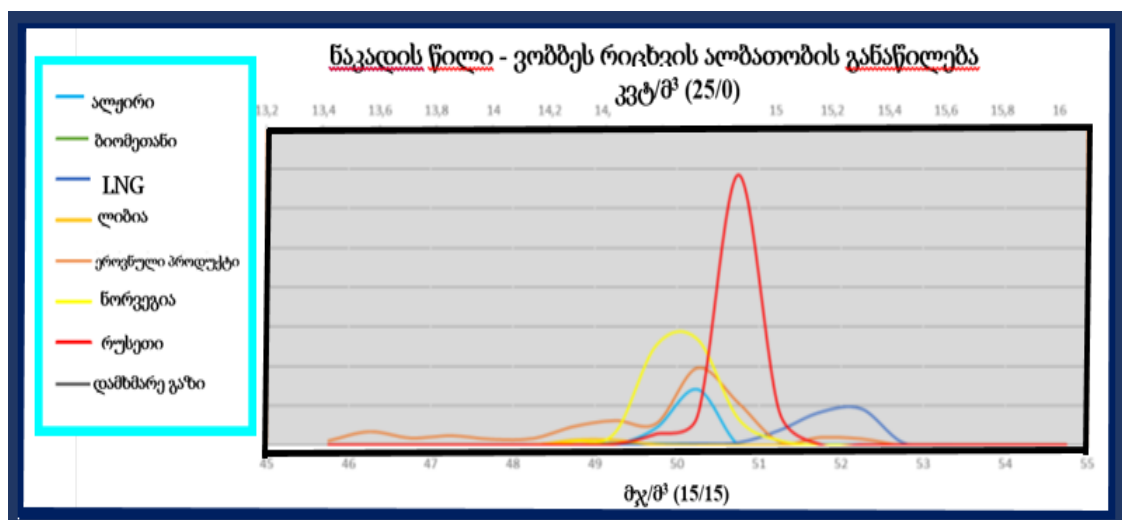
ასევე მოხდა პროცესის დასრულების გამოსასვლელი წერტილების კლასიფიკაცია - მიმდინარე SFGas GQS განხილვის საფუძველი: A და B კლასები განისაზღვრება ადგილობრივი ვობბეს რიცხვის სპექტრით და მათი გრძელვადიანი სტაბილურობით. C კლასი მოიცავს ნებისმიერ სიტუაციას, რომელიც არ არის გათვალისწინებული A და B კლასებით (სამუშაო ჯგუფის H-გაზის ხარისხის პარამეტრის წინასწარი ნორმატიული შესწავლა CEN სექტორი ფორუმის გაზის ინფრასტრუქტურისა და უტილიზაციის შესახებ (CEN SFGas GQS WG) დაარსდა 2016 წლის მაისში, ევროკომისიის DG ენერჯის მხარდაჭერით. ამ WG-ს აქვს ამოცანა შეისწავლოს და შეაფასოს შესაძლო WI დიაპაზონი

განაწილებული H-გაზზე, EN 16726: 2015–ის მომავალი გადასინჯვის გათვალისწინებით) [28].

ამგვარად, განვიხილოთ გაზის ხარისხის სტანდარტიზაცია და ევროკავშირის სამართლებრივი და ეროვნული ჩარჩოს მიდგომა: ჰოლისტიკური მიდგომა (ჰოლისტიკური მიდგომა შემოღებულ იყო ბერჯგის მიერ როგორც განუყოფელი მთლიანობის შესწავლაზე, ანუ სისტემური მიდგომა), და სტანდარტის გადასინჯვა; ევროპული და ეროვნული მარეგულირებელი ჩარჩოს ადაპტირება, მათ შორის ყველა მხარის როლები და პასუხისმგებლობები გაზის ღირებულების ჯაჭვის გასწვრივ. საბოლოოდ, გეგმა ისახავს გრძელვადიან პერსპექტივას (მაგალითად 3 წელიწადში ერთხელ).



ნახ. 12. სტანდარტის ხარისხის სქემა



ნახ. 13. ევროკავშირის მასშტაბით ვობზეს რიცხვის დიაპაზონი გაზის სისტემის შესასვლელ წერტილებში

თავი 3. საქართველოში ბუნებრივი გაზის სექტორში სტოქასტიკური პროცესები

3.1. ბუნებრივი გაზის სტოქასტიკური პროცესები, მათი მეთოდების მოდიფიცირება და გამოყენება

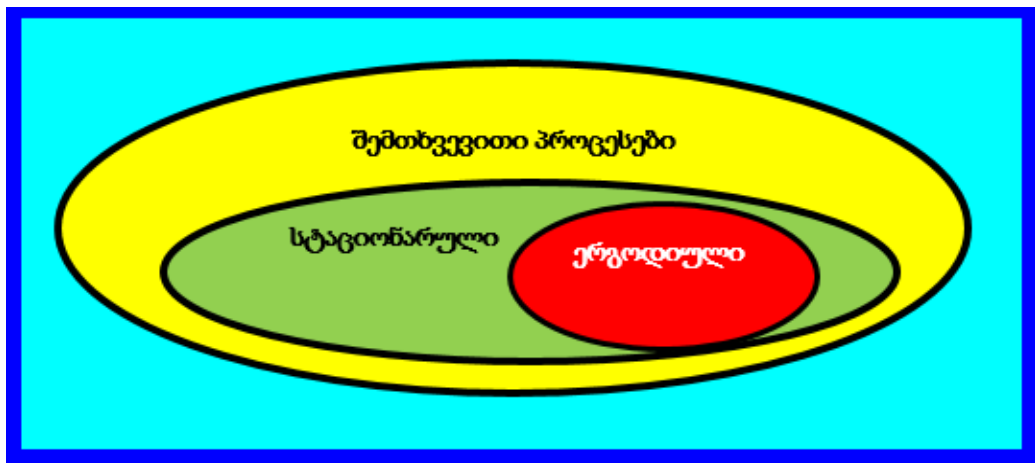
შემთხვევითი პროცესების შესწავლასა და აღწერისათვის, ნაშრომში გამოიყენება ალბათობის თეორიის მათემატიკური აპარატი. ამ თეორიის საშუალებით, შემუშავებულია შემთხვევითი პროცესების ალბათური მახასიათებლები, რომლებიც მოიცავს ალბათობის განაწილების სიმკვრივეს, ალბათობის განაწილების ფუნქციას, საწყისი და ცენტრალური მომენტის ფუნქციებს [29,30].

შემთხვევითი პროცესების მახასიათებლები უმეტეს შემთხვევაში დამოკიდებულია დროზე და უფრო იშვიათად არ არის დამოკიდებული ლოკაციაზე. ეს დამოკიდებულია იმაზე, რომ არსებობს შემთხვევითი პროცესები სტაციონარულები და არასტაციონარულები, თანაც უფრო ხშირად გვხვდება არასტაციონალური პროცესები. შემთხვევითი პროცესების თეორიაში განიხილება ჰიპოთეზები, რომლის თანახმად, დროის ხანგრძლივობის შემთხვევითი პროცესები დაყოფილია მოკლე ინტერვალებად, ხოლო მათ შიგნით პროცესები მიიღება როგორც სტაციონარულად. მაშინ ამგვარი პროცესების ალბათობის მახასიათებლები დროისგან დამოუკიდებელია.

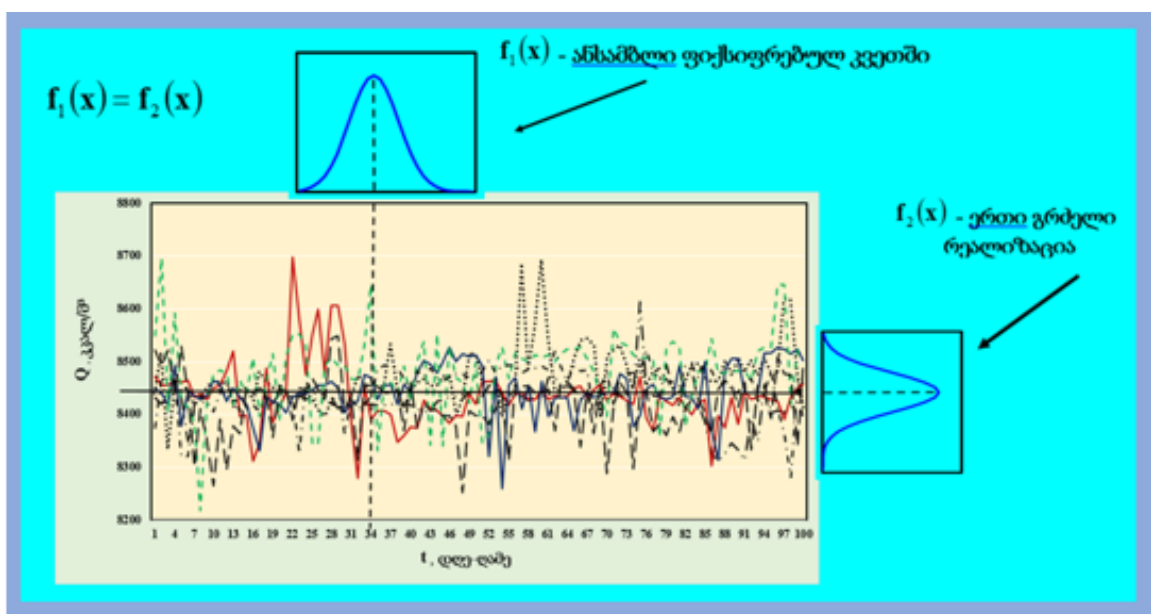
სტაციონარული შემთხვევითი პროცესების კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი თვისებაა - ერგოდიულობა. შემთხვევითი პროცესის ალბათური მახასიათებლების მიღება შესაძლებელია უფრო მეტი რაოდენობის რეალიზაციის მყისიერი მნიშვნელობების საშუალებით. ერგოდიური შემთხვევითი პროცესებისთვის, შესაძლებელია მივიღოთ გარკვეული ინტერვალის ერთი რეალიზაციის შესწავლით. რა თქმა უნდა, ერგოდიული შემთხვევითი პროცესები ძალზე სასარგებლოა პრაქტიკაში, რადგან პროცესის ერთი რეალიზაციის მოპოვება და შესწავლა უფრო ადვილია, ვიდრე ერთდროულად შემთხვევითი პროცესის უსასრულო მყისიერი მნიშვნელობების (ანსამბლის) ფორმირება. სტაციონალური

პროცესების კლასში ერგოდიული შემთხვევითი პროცესები მეტად მცირე ადგილს იკავებს. აღნიშნული გრაფიკული ინტერპრეტაცია ნაჩვენებია ნახ. 14-ზე [31,32].

ამგვარად, შემთხვევით პროცესს უწოდება ერგოდიული, თუ მისი რომელიმე სტატისტიკური მახასიათებელი უტოლდება არა მხოლოდ რეალიზებათა მთელი ჯგუფის საშუალო მაჩვენებელს, არამედ დროში გასაშუალოებულ ერთი რეალიზაციის მაჩვენებელს (ნახ. 15). სხვა სიტყვებით, შემთხვევით პროცესს ერგოდიულს უწოდებენ, თუ მისი ძირითადი მახასიათებლების მიღება შესაძლებელია არა მხოლოდ რეალიზებათა მთელი ჯგუფის საშუალო მაჩვენებლით, არამედ ერთი რეალიზაციის დროში საშუალო შეფასებით.



ნახ. 14. შემთხვევითი პროცესების არეების (პირობითი) ინტერპრეტაცია



ნახ. 15. ერგოდიული შემთხვევითი პროცესების გრაფიკული ინტერპრეტაცია

არსებული მათემატიკური თეორია მარტივდება ერგოდიულობის შემთხვევაში. ამიტომ გაზის სექტორში არსებული შემთხვევითი ფუნქციების ანალიზი ხშირია. მაგალითად გაზის სექტორში მიწოდებული ბუნებრივი გაზის მიწოდების მნიშვნელობების მწკრივები, მაგისტრალურ გაზსადენებში შიგა წნევის დინამიკა, ბუნებრივი გაზის კომპონენტების მოლური მასები და ა.შ [33].

ამიტომ, კონკრეტული ამოცანების ამოხსნისას, პირველ რიგში უნდა დადგინდეს არის თუ არა პროცესის ერგოდიულობა. აგრეთვე განვიხილოთ ბუნებრივი გაზის ტრანსპორტირების პროცესების კორელაციური და სპექტრული მეთოდების შესწავლა.

რეალური შემთხვევითი პროცესი, წარმოდგენილია $\mathbf{z}(t)$ რეალიზაციით, რომელიც შერჩეულია შემთხვევით ამგვარი ფუნქციები ანსამბლიდან (ნახ.16ა). სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, შემთხვევითი პროცესი არის დროის ისეთი ფუნქცია, რომლის თითოეული წერტილი არის შემთხვევითი როგორც დროში, ასევე სიმრავლეში (ლოკაცია). ყველაზე უმარტივესი არის ერთგანზომილებიანი განაწილების კანონი $\mathbf{P}(\mathbf{z}, t) \leq \mathbf{z}$, რომლის დროსაც ერთდროულად გვაქვს \mathbf{z} შემთხვევითი პროცეს t დროის მომენტში.

შემთხვევითი პროცესი სტაციონარულია, თუ მისი ყველა ალბათობის განაწილება უცვლელია, როდესაც ხდება დროის ცვლილება t_H -დან $t_H + T$ დრომდე, სადაც T არის დროის ათვლა წანაცვლებით. სტაციონარული შემთხვევითი პროცესებს გააჩნია ერგოდიული თვისება, როდესაც ერთ ობიექტზე შემთხვევით პროცესზე დაკვირვებისას საშუალო მნიშვნელობა დროში, ტოლია საშუალო მნიშვნელობის სიმრავლის მიხედვით, იმავდროულად ხდება დიდი რაოდენობის დაკვირვებები, მრავალრიცხოვან იდენტურ ობიექტებზე:

$$\mathbf{z} = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{z}_p(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \mathbf{x} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \mathbf{z}(t) dt .$$

ერგოდიული ჰიპოთეზა საშუალებას იძლევა გამარტივდეს ყველა შესაბამისი გაანგარიშებები და ექსპერიმენტები. სტაციონარულ შემთხვევით პროცესს გააჩნია მნიშვნელოვანი თვისება, კერძოდ ცალკეული რეალიზაცია უსასრულო პერიოდის დროის ინტერვალში, რაც სრულად განსაზღვრავს სრულ შემთხვევით პროცესს, ყველა უთვალავი შესაძლებლობის განხორციელების ტოლია. სტაციონარული

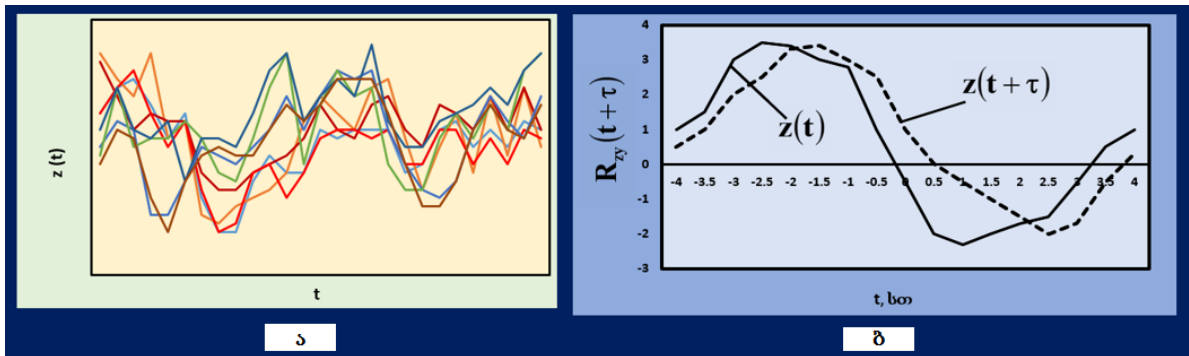
შემთხვევითი პროცესისთვის საჭიროა ყველა სავარაუდო მახასიათებლები: მათემატიკური მოლოდინი, დისპერსია, კონსტანტებია და ა.შ.. თუ ყველა ალბათობის განაწილება შეესაბამება ნორმალურ კანონს, მაშინ შემთხვევითი პროცესი წარმოადგენს გაუსის პროცესს. თუ მას გამოვაკლებთ $\mathbf{z}(t)$ პროცესის საშუალო მნიშვნელობებს, ამისთვის მიიღება ცენტრირებული შემთხვევითი სიდიდე. ამ შემთხვევაში, შემთხვევითი ცვლადის რხევა $\mathbf{z}(t) = \mathbf{z}_c(t) - \mathbf{z}_0(t)$ ხდება ფარდობითი ნულის მიმართ (ნახ. 17). ცენტრირებული შემთხვევითი ცვლადის საშუალო მნიშვნელობას ეწოდება დისპერსია (ნახ. 16ბ).

$$\sigma^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \{z_c(t) - z_0(t)\}^2 dt, \quad (10)$$

სადაც $\mathbf{z}(t)$ არის შესასვლელი და გამოსასვლელი შემთხვევითი ფუნქციების ცვლადების მნიშვნელობები, როგორც დროის ფუნქცია; $\mathbf{z}(t + \tau)$ - იგივე წანაცვლება τ სიდიდით; Δt კორელაციური წანაცვლება; Δt - დროითი ბიჯი; $2T$ - შემთხვევითი ცვლადის ინტერვალი.

სტაციონალური პროცესის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი მახასიათებელია კორელაციური ფუნქცია. ასეთი ფუნქციები შეიძლება გამოიხატოს, როგორც საშუალოების ნამრავლი - დროის განმავლობაში: ავტოკორელაციური ფუნქცია (რამდენიმე კორელაციური ფუნქციის ტიპები ნაჩვენებია ნახ. 17-ზე)

$$\mathbf{R}_{zz}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \mathbf{z}(t)\mathbf{z}(t - \tau) d\tau. \quad (11)$$

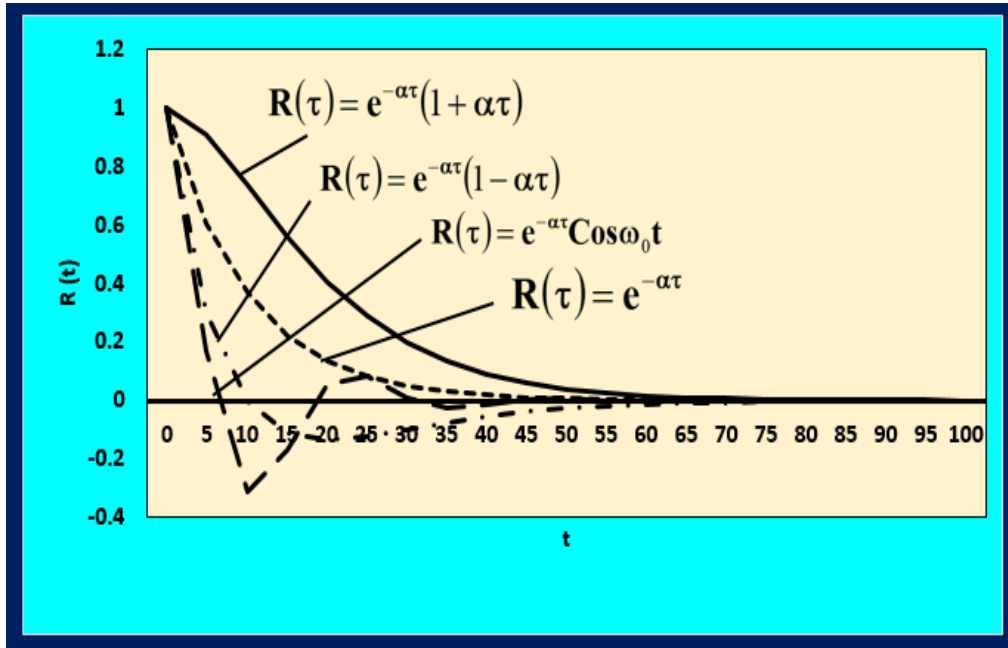


ნახ. 16. ა. გაუსის წნევის რეალიზაციის ერთობლიობა (ანსამბლი); ბ. კორელაციური ფუნქციის განსაზღვრის წესი

ურთიერთკორელაციური ფუნქცია

$$R_{zy}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T z(t)y(t-\tau)d\tau . \quad (12)$$

$$R_{yz}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T y(t)z(t+\tau)d\tau . \quad (13)$$



ნახ. 17. კორელაციური ფუნქციის ტიპები

გაზის სექტორში, ხშირად გამოიყენება გაზის რხევების რეგისტრაციის გაანგარიშებები, ბმები სტატისტიკურად გადანაწილებულ დაწნევასა და ხარჯს შორის, სარეჟიმო პარამეტრების დადგენისას და ა.შ.

საინტერესოა გაზის ხარჯის და წნევის რეალიზაციების სიხშირითი შემადგენლობა, გაზსადენის სხვადასხვა წერტილებში, ხანმოკლე და ხანგრძლივი პროგნოზისათვის. ცხადია, რომ ცალკეული მომხმარებლებისათვის პირველი ჰარმონიკის დადგენა საკმარისია, თუმცა საყოფაცხოვრო და საწარმო მომხმარებლებისათვის, საჭიროა 4-5 შემადგენელი ჰარმონიკები მაინც. ამ დროს ჰარმონიკების რაოდენობა მცირდება გაზსადენის დასაწყისიდან ბოლოსკენ. აღნიშნული პრობლემები მოყვანილია შემდეგ [15,16] ნაშრომებში.

სტატისტიკური დამუშავების შედეგების განხილვის შემდეგ შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ დაფიქსირდა წნევის პულსაციის ორი ტიპი:

1. რხევები, რომელსაც გააჩნია განაწილების ალბათობის კანონის აპროქსიმაცია ახლოს არის ნორმალურ კანონთან. კორელაციურ ფუნქციას და სპექტრალური სიმკვრივეს აქვს ექსპონენციალური ფორმა. ის დამახასიათებელია ვიწროზოლიანი გაუსის შემთხვევითი პროცესებისთვის და ნულოვანი სიხშირით;

2. წნევის რხევებს გააჩნია ამოხსნილი ტიპის ფორმის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია: შუაში მწვერვალია და კორელაციურ ფუნქციას გააჩნია ექსპონენტის ფორმა ჰარმონიული რხევების სუპერპოზიციით.

პირველი რიგის კორელაციური ფუნქციები გვიჩვენებს, რომ კორელაციური $R(t)$ ფუნქციების მნიშვნელობები τ ზრდასთან ერთად მცირდება და საბოლოოდ იძენს სტაბილურ რხევით ხასიათს (ან მიიწრაფვის ნულისკენ). რხევები დიდი τ -თვის პერიოდული ხასიათისაა და მცირდება ამპლიტუდის ცვლილება. τ -ს ზრდისას გვაქვს პერიოდული, ხოლო ამპლიტუდის შემცირებისას, გამოვლენილია გაზის გადასატუმბი პროცესების პერიოდული დეტერმინტული კომპონენტები. ამის საფუძველზე, გაზგადასატუმბი პროცესის კორელაციის ფუნქციები შეიძლება წარმოდგენილი იყოს, როგორც ექსპონენტების ჯამით.

3.2. მაგისტრალურ გაზსადენებში სტოქასტიკური პროცესების ამოვარდნების დამოკიდებულების ანალიზური დადგენა

უმარტივეს შემთხვევაში, ამოვარდნა წარმოადგენს დაკვირვებას, რომელიც არ შეესაბამება ამონაკრების მონაცემების დანარჩენ დაკვირვებებს. ზოგადად, მონაცემთა ნაკრები შეიძლება შეიცავდეს ერთზე მეტ ამოვარდნას, რომელიც განთავსებულია მოწესრიგებული მონაცემების ერთსა ან ორივე მხარეს. ამოვარდნის ძირითადი პრობლემის გამოვლენა არის იმის დადგენა, რომ მართლაც არაერთობლივი დაკვირვებები შეესაბამება დანარჩენ მონაცემებს.

შესაბამისი განაწილების მიღებული და სწორი გადაწყვეტილების შეფასება მეტად მნიშვნელოვანია. პრაქტიკაში, ხშირად განიხილება ნორმალური განაწილება, ამასთან, მონაცემების ალბათობის განაწილების არასწორი დაშვების დაკავშირებამ, შეიძლება გამოიწვიოს ელემენტების ამონაკრების არაკორექტული ამოვარდნა.

განვიხილოთ ამოვარდნების მიზეზები. ამოვარდნა ჩვეულებრივ ასოცირდება ერთ ან რამდენიმე მიზეზთან [1]:

ა) გაზომვების შეცდომები და მონაცემთა რეგისტრაცია. ეს მოიცავს გაზომვების სიზუსტის შეცდომებს, არაკორექტული დაკვირვებები და მონაცემთა რეგისტრაციის შესვლა მონაცემთა ბაზაში;

ბ) მონაცემთა ე.წ. „დაბინძურება“. მონაცემთა დაბინძურება ხდება მაშინ, როდესაც მონაცემები მიეკუთვნება ორ ან მეტ ალბათობის განაწილებებს, ე.ი. არსებობს ერთი ძირითადი განაწილება და ერთი ან მეტი დამატებითი განაწილება (ნარევი), რომლებიც „აბინძურებს“ მონაცემებს. თუ დამაბინძურებელი განაწილება მნიშვნელოვნად განსხვავდება ძირითადი განაწილების ჭეშმარიტი მათემატიკური მოლოდინისაგან და დიდი საშუალო გადახრებიდან და უფრო მძიმე განაწილების კუდებით, ვიდრე ძირითადი განაწილება. ასევე როდესაც გვაქვს ექსტრემალური დაკვირვებები, მაშინ შეიძლება გამოჩნდეს, როგორც ძირითადი განაწილების ამოვარდნები. დაბინძურების მიზეზი შეიძლება იყოს ამოვარდნების შერჩევის შეცდომა, როდესაც მონაცემების მცირე ნაწილი ითვლება მოპოვებული სხვა ნაკრებიდან, ან თუ განხორციელდა ექსპერიმენტის ან გამოკითხვის შედეგების მიზანმიმართული დამახინჯება (გადაჭარბება ან დაფასება).

გ) მონაცემთა გადანაწილების მცდარი ვარაუდი.

დ) იშვიათი დაკვირვებები. მოცემული განაწილებელიდან არჩეულ სიდიდეებში, ნაკლებად სავარაუდოა, რომ დაკვირვებები შეიძლება გამოჩნდეს ძალიან იშვიათ შემთხვევებში.

თუ გენერალურ ერთობიობას გააჩნია სიმეტრიული განაწილება, მაშინ მიღებული დაკვირვებები იშვიათად გამოიწვევს განაწილების შეცდომებს [34,35]. ამოვარდნები ყოველთვის არ არის "ცუდი" ან "მცდარი მონაცემები". ის შეიძლება ჩაითვალოს იშვიათი მოვლენების გამოვლენის ინდიკატორებად, რომლებიც შემდგომ შესწავლას მოითხოვს. მაგალითად, ამორჩევითი მათემატიკურმა მოლოდინმა და დიდი საშუალო გადახრამ შესაძლოა შეცვალოს მათი მნიშვნელობები, თუნდაც ერთი ამოვარდნებისას, რამაც შემდგომში შეიძლება გამოიწვიოს არასწორი დასკვნები.

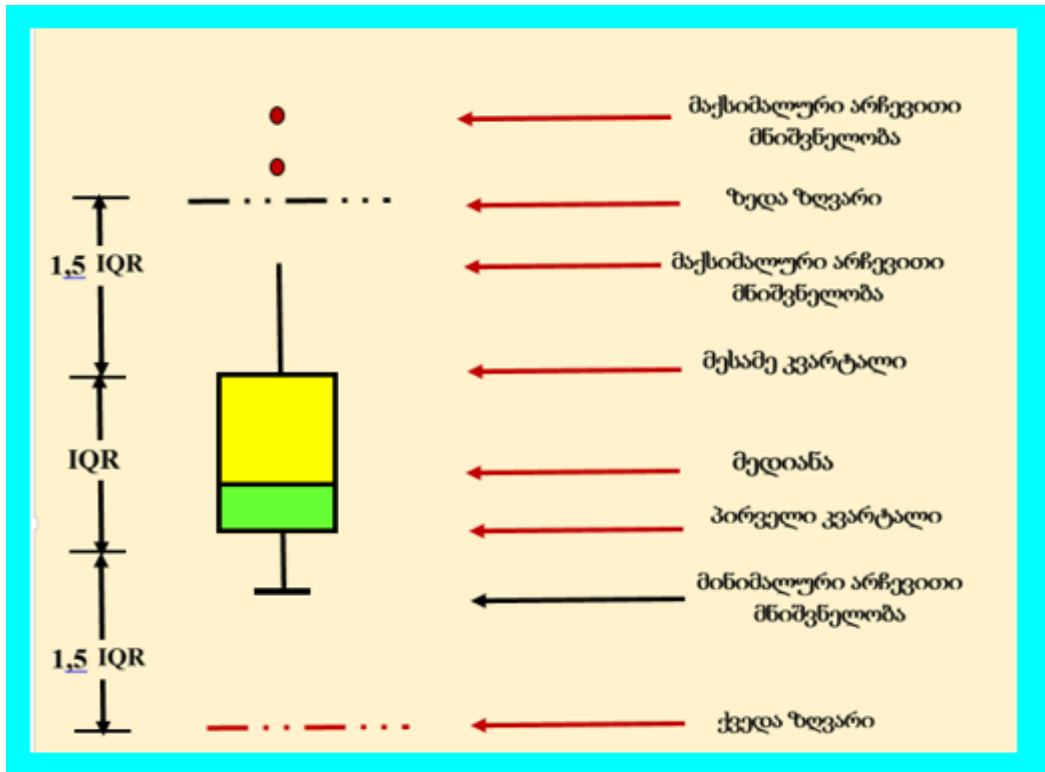
ამგვარად ამოვარდნა (Outlier) არის ქვესიმრავლის მცირე სიმძლავრის ამონაკრების ელემენტი, რომელიც მნიშვნელოვნად განსხვავდება ნიმუშის

დანარჩენი ნაწილისგან. (დაკვირვების ან ქვესიმრავლის ამონაკრები, რომლის ამოვარდნა როგორც დამოკიდებულია გენერალური ერთობლიობის შერჩეულ მოდელზე, საიდანაც შეირჩევა ამონაკრები. ამოვარდნა შეიძლება გამოჩნდეს სხვა გენერალური ერთობლიობიდან, რაც შეიძლება იყოს მონაცემთა არაკორექტული ჩაწერის შედეგი ან გაზომვის ზოგადი შეცდომა).

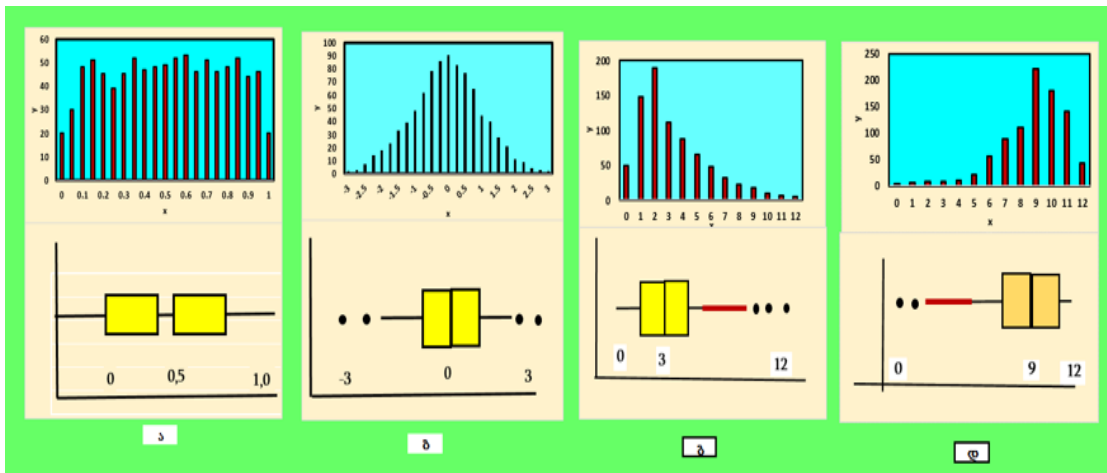
მედიანა, შერჩევითი მედიანა, მედიანის რიცხვების ნაკრები, Q_2 (medin, sample median, median of a set numbers, Q_2); k -ს რიგითი სტატისტიკა, როდესაც $k = \left[\frac{n+1}{2} \right]$, თუ ამონაკრების მოცულობა - კენტი ან ნახევარ ჯამი $\left[\frac{n}{2} \right]$ და $\left[\frac{n+1}{2} \right]$ -ის რიგითი სტატისტიკა თუ n ლუწი რიცხვია. მედიანა არის მეორე კვარტილი (Q_2).

პირველი კვარტილი, ქვედა შერჩევითი კვარტილი Q_1 (first quartile sample lower quartile, Q_1). პირველი უმცირესი მედიანა $(n-1)/2$ მნიშვნელობები კენტი დაკვირვებისას, ხოლო პირველი უმცირესი მედიანა $n/2$ მნიშვნელობები ლუწი დაკვირვებისას. მესამე კვარტილი, ზედა შერჩევითი კვარტილი Q_3 (third quartile, sample upper quartile, Q_3). შიგაკვარტილური დიაპაზონი IQR (inquaretile range, IQR). სხვაობა მესამე და პირველი კვარტლის შორის. ხუთი რიცხვის კრებსითი კომპლექტი (five-number summary). შერჩევითი მინიმუმი, პირველი კვარტილი, მედიანა, მესამე კვარტილი და შერჩევითო მაქსიმუმი (ნახ. 18 და 19).

ულვაშიანი ყუთის მოდიფიცირებული დიაგრამა - (box plot) - ხუთი რიცხვის ნაკრების გრაფიკული გამოსახულება (ჰორიზონტალური ან ვერტიკალური) (შენიშვნა 1. მოდიფიცირებული ყუთის დიაგრამის ჰორიზონტალური გამოსახულება, პირველი კვარტილი და მესამე კვარტილი სქემაზე დატანილია როგორც ყუთის პირველი და მარჯვენა გვერდითი მხარეები; მედიანა დატანილია როგორც ვერტიკალური ხაზი, რომელიც კვეთს ყუთს, მარცხენა ულვაში ვრცელდება პირველი კვარტლისგან (მცირე მნიშვნელობისკენ), რომელიც არ სცილდება ქვედა ზღვარს; მარჯვენა ულვაში მიდის მესამე კვარტლისკენ გადადის უდიდეს მნიშვნელობამდე, რომელიც არ აღემატება ზედა ზღვარს; საკონტროლო ზღვრების მიღმა განიხილება, როგორც მოვარდნები).

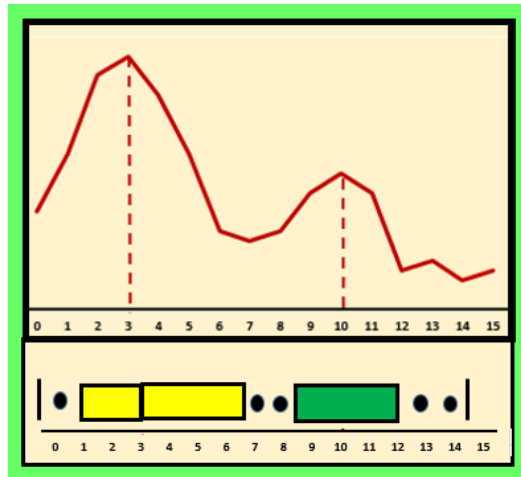


ნახ. 18. მოდიფიცირებული დიაგრამა - ულვაშიანი ყუთი, მითითებული ქვედა და ზედა ზღვრებით



ნახ. 19. ა. თანაბარი განაწილება; ბ. ზარისებრი თანაბარი განაწილება; გ. უარყოფით გადახრული განაწილება; დ. დადებით გადახრული განაწილება

მაგალითისათვის ვიხილავთ კერძო შემთხვევას, ოდესაც გვაქვს დიმი-
დალური პიკი და მდოვრე გაშლა (ნახ. 20).



ნახ. 20. დიზოდალური პიკი და მდოვრე გაშლის მაგალითი - მოდიფიცირებული დიაგრამა

განვიხილოთ $\mathbf{x}(t)$ პროცესი. ნახ. 21-ზე ნაჩვენებია შემთხვევითი $\mathbf{x}(t)$ -ის პროცესის გადაკვეთა ფიქსირებულ \mathbf{C} დონემდე. აქ ნაჩვენებია: $\mathbf{x}(t)$ - პროცესის ლოკალური \mathbf{H} მაქსიმუმი; $\mathbf{x}(t)$ - ფუნქციის აბსოლუტური \mathbf{H}_m მაქსიმუმი; τ_0 - პირველი ამოვარდნის მომენტი; $\mathbf{x}(t)$ პროცესის დადებითი ხანგრძლივობის τ_0 ამოვარდნა - $\mathbf{x}(t)$ რეალიზაციის კვეთა ქვემოდან ზემოდან \mathbf{C} დონის შესრულების $\left(\begin{matrix} * \\ \mathbf{x}(t) > 0 \end{matrix} \right)$; $\mathbf{x}(t)$ რეალიზაციის კვეთა ქვევიდან ზევით, უარყოფითი ამოვარდნის ხანგრძლივობა $\theta \left(\begin{matrix} * \\ \mathbf{x}(t) < 0 \end{matrix} \right)$; $\mathbf{x}(t)$ რეალიზაციის \mathbf{T} ხანგრძლივობა; \mathbf{N} - ამოვარდნების რაოდენობა; μ - პროცესის მათემატიკური მოლოდინი.

განვსაზღვროთ ნორმალური სტაციონარული შემთხვევითი $\mathbf{x}(t)$ პროცესის \mathbf{C} დონით ინტერვალზე $[0, \mathbf{T}]$ საშუალო რაოდენობა. ცხადია, რომ შემთხვევითი პროცესის ამოვარდნების $\mathbf{N}(t)$ რაოდენობა \mathbf{C} დონით $[0, \mathbf{T}]$ ინტერვალში, დამოკიდებულია ამ ინტერვალის ხანგრძლივობაზე და განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით:

$$\mathbf{N}(\mathbf{T}) = \int_0^{\mathbf{T}} \delta(\mathbf{x}(t) - \mathbf{C}) \cdot \mathbf{I} \left(\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} \right) dt = \int_0^{\mathbf{T}} (\mathbf{x}(t) \delta(\mathbf{x}(t) - \mathbf{C}) \mathbf{I}((\mathbf{x}(t) - \mathbf{C})) \mathbf{I} \left(\begin{matrix} * \\ \mathbf{x}(t) \end{matrix} \right) dt \quad (14)$$

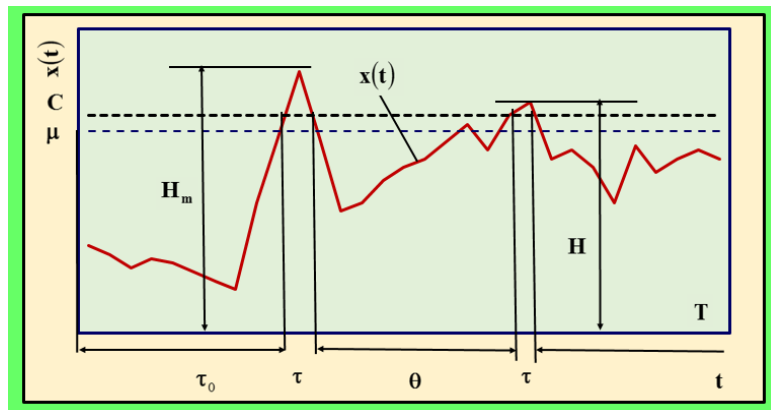
მართლაც, ინტეგრალის ქვეშა დელტა ფუნქციის თვისებებისა და ერთეულოვანი საფეხუროვანი ფუნქციის გამო, ყოველთვის ნულის ტოლია ყველგან, გარდა იმ წერტილებისა, სადაც შემთხვევითი $\mathbf{x}(t)$ პროცესი კვეთს \mathbf{C} დონეს (პირობა $\mathbf{x}(t) - \mathbf{C} = 0$) (ნახ. 21). ამ წერტილებში $t_k (k=1,2,\dots)$ ინტეგრალი ქვეშა ფუნქცია უსასრულოა (რადგანაც $\delta(0) = \infty$) და თითოეულ ამ წერტილში ინტეგრალს გააჩნია ნახტომი და ხდება ერთი. ამის ფაქტის ახსნის მიზნით, გაითვალისწინეთ $N(t)$, ინტერვალზე $(t_k - \varepsilon, t_k + \varepsilon)$, რომელსაც შემთხვევითი პროცესი კვეთს დონეს ქვევიდან. ჩავატაროთ ცვლადების ჩანაცვლება (ნახ. 22):

$$\begin{cases} \xi = \mathbf{x}(t), \quad d\xi = \mathbf{x}^*(t)dt \\ \mathbf{I}(\mathbf{x}^*(t)) = \mathbf{I}\left(\frac{d\xi}{dt}\right) = 1\left(\frac{d\xi}{dt}\right) = \mathbf{x}(t)^* > 0 \\ N_c(t_k - \varepsilon, t_k + \varepsilon) = \int_{t_k - \varepsilon}^{t_k + \varepsilon} \delta(\xi - \mathbf{C})d\xi = 1 \end{cases} \quad (15)$$

ამრიგად, ინტეგრალი ტოლია შემთხვევითი $\mathbf{x}(t)$ პროცესის დადებითი კვეთის რიცხვი \mathbf{C} დონით $[0, T]$ ინტერვალზე.

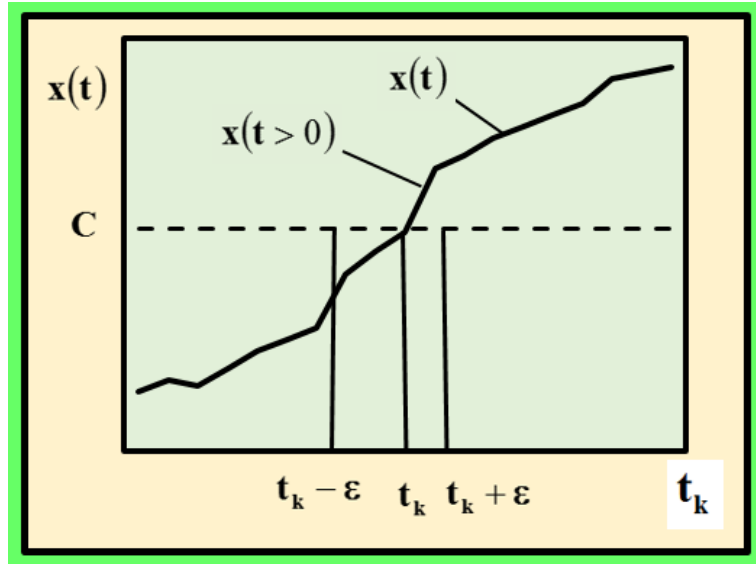
შემთხვევითი $\mathbf{x}(t)$ პროცესის დადებითი \mathbf{C} დონით ამოვარდნების საშუალო რაოდენობა ტოლია შემთხვევითი ცვლადის მათემატიკური მოლოდინით - ამოვარდნების რაოდენობება $[0, T]$ ინტერვალზე.

$$M[N_c(T)] = \int_0^T \int_0^\infty N_c(T, \mathbf{x}(t), \mathbf{x}^*(t)) f(\mathbf{x}(t), \mathbf{x}^*(t)) d\mathbf{x} dt. \quad (16)$$



ნახ. 21. შემთხვევითი პროცესის ამოვარდნები

სადაც $f(x(t), x^*(t))$ არის შემთხვევითი $x(t)$ პროცესისა და მისი $x^*(t)$ წარმოებულის ორგანზომილებიანი ალბათობის სიმკვრივის ფუნქცია, რომელიც სტაციონარული ნორმალური შემთხვევითი პროცესისთვის საშუალო ნულოვანი მნიშვნელობით გვაქვს:



ნახ. 22. $x(t)$ პროცესის კვება C დონით

$$f\left(x, x^*\right) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_{x^*}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{x^{*2}}{\sigma_{x^*}^2}\right)} \quad (17)$$

$$M[N_c(T)] = \int_0^T dt \int_0^\infty \int_0^\infty x(t) \delta(x(t) - C) f\left(x(t), x^*(t)\right) dx dx^* \quad (18)$$

გამოვიყენოთ ნებისმიერი $\varphi[x], x \in (a, b)$ ფუნქციის ცნობილი წესი, $\delta(x - C)$ დელტა ფუნქციის ინტეგრირებისთვის.

$$\int_a^b \varphi(x) \delta(x - C) dx = \varphi(C) \quad (19)$$

ვანტეგროთ ინტეგრალურშიგა გამოსახულება x ცვლადით

$$M[N_c(T)] = \int_0^T dt \int_0^\infty x(t) f\left(C, x(x, t)\right) dx \quad (20)$$

სტაციონალური შემთხვევითი პროცესისთვის შიგა ინტეგრალი არ არის დამოკიდებული დროზე. აქედან გამომდინარე, გამოსახულება (20) შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგი სახით:

$$\mathbf{M}[\mathbf{N}_c(\mathbf{T})] = \mathbf{T} \int_0^{\mathbf{T}} \mathbf{x} \mathbf{f}(\mathbf{C}, \mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (21)$$

გამოსახულება (21) საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ სტაციონარული ნორმალური $\mathbf{X}(t)$ პროცესის ამოვარდნების დადებითი საშუალო რაოდენობა მოცემულ \mathbf{C} დონეზე [19,20].

შემთხვევითი პროცესის უარყოფითი ამოვარდნების საშუალო რაოდენობა h ნებისმიერ დონეზე, ანალოგიურად განისაზღვრება:

$$\mathbf{M}[\mathbf{N}(\mathbf{T})] = \mathbf{M}[\mathbf{N}_c(\mathbf{T}) + \mathbf{N}_h(\mathbf{T})] \quad (22)$$

ვიცით რა შემთხვევითი პროცესის მოცემული დონეზე ამოვარდნების საშუალო რაოდენობა, შეგიძლიათ განსაზღვროთ ამოვარდნების რაოდენობის λ ინტენსივობა $[0, \mathbf{T}]$ ინტერვალში და გავყოთ ამოვარდნების საშუალო რიცხვზე.

$$\lambda(\mathbf{T}) = \frac{1}{\mathbf{T}} \mathbf{M}[\mathbf{N}_c(\mathbf{T})] = \int_0^{\infty} \mathbf{x} \mathbf{f}(\mathbf{C}, \mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (23)$$

შევიტანოთ ფორმულაში ალბათობის განაწილების სიმკვრივის $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{x})$ ფუნქცია და ჩავანაცვლოთ \mathbf{x} , \mathbf{C} -ზე (23)-ში და ინტეგრალის განსაზღვრის შემდეგ მივიღებთ:

$$\lambda(\mathbf{T}) = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma_x}{\sigma_x} e^{\frac{1}{2} \frac{\mathbf{C}^2}{\sigma_x^2}} \quad (24)$$

პროცესის ალბათური მახასიათებლების კვთა მოცემული დონის ფუნქციით, აუცილებელია ალბათობის გამოთვლა, რათა მოხდეს ვადის დროის დასაშვებ დონეს პროცესის გადაჭარბება. განვსაზღვროთ შემთხვევითი $\mathbf{X}(t)$ დიფერენცირებადი ფუნქციის ალბათობა გარკვეული \mathbf{C} დონის გადაკვეთის t დროთა განმავლობაში. ვივარაუდოთ, რომ შემთხვევითი ფუნქციის ცვლილების $\mathbf{V}(t) = d\mathbf{X}(t)/dt$ სიჩქარე dt დროთა განმავლობაში მუდმივია (ზუსტია უსასრულო მხცირეები მეორე რიგისთვის), $\mathbf{X}(t)$ ფუნქციის პირობითი \mathbf{C} დროის მცირე პერიოდის განმავლობაში.

$$\mathbf{C} - \mathbf{V}(t) = \int_0^{\infty} \int_{\mathbf{C}-\mathbf{V}dt}^{\infty} \omega(\mathbf{x}, \mathbf{V}) d\mathbf{x} d\mathbf{V} \quad (\mathbf{V}(t) > 0) \quad (25)$$

ამ ხდომილების ალბათობა ((25) პირობის შესაბამისად) გვექნება:

$$Q(t) = \int_0^{\infty} \int_{C-Vdt}^{\infty} \omega(x, V) dx dV \quad (V(t) > 0) \quad (26)$$

სადაც შემთხვევითი ფუნქციის $\omega(x, V)$ არის, $X(t)$ და $V(t)$ შემთხვევითი ფუნქციების ერთობლივი განაწილების სიმკვრივე.

შიგა ინტეგრალის საზღვრების სიახლოვის გამო (იგი იცვალება $\omega(a, V)Vdt$ მართკუთხედის ფართობით), ამოვარდნის ალბათობა ტოლია:

$$Q(t) = dt \int_0^{\infty} \omega(a, V) V dV \quad (27)$$

თუ ამოვარდნის Q ალბათობას გავყოფთ იმ dt დროზე, რომლის განმავლობაშიც მოსალოდნელია, დროითი ალბათობის სიმკვრივეს ამოვარდნა შესაბამის C დონეზე t დროში (ამოვარდნების საშუალო რაოდენობა დროის ერთეულში) ტოლია:

$$\phi(a) = \int_0^{\infty} \omega(a, V) V dV \quad (28)$$

შემთხვევითი სტაციონარული $X(t)$ და $V(t)$ ფუნქციების შემთხვევაში, როგორც დამოუკიდებელი შემთხვევითი ფუნქციები, და (უფრო მეტიც $V(t) = \frac{d}{dt} X(t)$) და ცნობილია ავტოკორელაციის $K[X(t)]$ ფუნქცია, შესაბამისად არის:

$$\omega(x, V) = \omega_x(x) \omega_V(V), \quad (29)$$

სადაც $\omega(x, V)$ არის $X(t)$ და $V(t)$ ფუნქციების ალბათობის ერთობლივი სიმკვრივე; $\omega_x(x)$ და $\omega_V(V)$ - შესაბამისი $X(t)$ და $V(t)$ ალბათობის სიმკვრივეებია.

$$\phi(C) = \int_0^{\infty} \omega_x(C) \omega_V(V) V dV = \omega_x(C) \int_0^{\infty} \omega_V(V) V dV \quad (30)$$

სადაც $\int_0^{\infty} \omega_x(C) V dV = \bar{V}$ არის დადებითი $V(t)$ სიჩქარის მათემატიკური მოლოდინი.

$X(t)$ ფუნქციის ნორმალური განაწილებისათვის გვექნება:

$$\omega_x(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\mathbf{x} - \mu)^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (31)$$

პროცესის სიჩქარის განაწილება აგრეთვე იქნება $\mathbf{X}(t)$ ფუნქციის ნორმალური და დამოუკიდებელი:

$$\omega_v(\mathbf{V}) = \frac{1}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\mathbf{V}^2}{2\sigma_v^2}\right] \quad (32)$$

მათემატიკური მოლოდინი $\bar{\mathbf{V}}(t) = 0$, ამიტომ პროცესის სტაციონარების გამო, შესაბამისად გვექნება: $(\sigma_v^2 = -\frac{d^2}{d\tau^2} \mathbf{K}_x(\tau)_{\tau \rightarrow \infty})$.

შევიტანოთ (31) და (32) – (30)-ში, მივიღებთ ამოვარდნის ალბათობის განაწილების სიმკვრივეს:

$$\phi(\mathbf{a}) = \frac{\sigma_v}{2\pi\sigma_x} \exp\left[-\frac{(\mathbf{C} - \mu)^2}{2\sigma_x^2}\right] \quad (33)$$

დავამტკიცოთ (33)(24)-ში. გვექნება:

$$\begin{aligned} \phi(\mathbf{a}) &= \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\mathbf{C} - \bar{\mathbf{V}})^2}{2\sigma_x^2}\right] \int_0^\infty \frac{1}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\mathbf{V}^2}{2\sigma_v^2}\right] \mathbf{V} d\mathbf{V} = \\ &= \frac{1}{2\pi\sigma_x \sigma_v} \exp\left[-\frac{(\mathbf{C} - \mu)^2}{2\sigma_x^2}\right] \int_0^\infty \exp\left[-\frac{\mathbf{V}^2}{2\sigma_v^2}\right] \mathbf{V} d\mathbf{V}. \end{aligned} \quad (34)$$

შევცვალოთ შიგა ინტეგრალური გამოსახულება,

$$\mathbf{U} = \frac{-\mathbf{V}^2}{2\sigma_v^2} \Rightarrow d\mathbf{U} = \frac{-\mathbf{V}^2}{\sigma_v^2} d\mathbf{V} \Rightarrow \mathbf{V} d\mathbf{V} = -\sigma_v^2 d\mathbf{U} \quad (35)$$

ამიტომ

$$\int_0^\infty \exp\left[-\frac{\mathbf{V}^2}{2\sigma_v^2}\right] \mathbf{V} d\mathbf{V} = -\sigma_v^2 \int_0^\infty e^{\mathbf{U}} d\mathbf{U} = -\sigma_v^2 \left(e^{\frac{\mathbf{V}^2}{2\sigma_v^2}} \right)_0^\infty = \sigma_v^2 \quad (36)$$

და საბოლოოდ $\phi(\mathbf{C}) = \frac{\sigma_v}{2\pi\sigma_x} \exp\left[-\frac{(\mathbf{C} - \mu)^2}{2\sigma_x^2}\right]$

თუ ხდება საწყისი მწკრივის ნორმირება, ე.ი. $\mathbf{x} \Rightarrow \left(\mathbf{y} = \frac{\mathbf{x} - \mu}{\sigma}\right)$, მაშინ ახალი

მწკრივებისათვის გვექნება $\sigma_y = 1$; $\mu = 0$, ამიტომ გვექნება

$$\varphi(C) = \frac{\sigma_v}{2\pi} \exp\left[-\frac{C^2}{2\sigma_v^2}\right] \quad (37)$$

რაც უფრო მაღალია \mathbf{a} დონე, მით ნაკლებია $\mathbf{q}(C)$. მეტად მცირე $\mathbf{q}(C)$ - ამოვარდნა შეიძლება ჩაითვალოს როგორც იშვიათ მოვლენებად, რადგანაც გვაქვს დამოუკიდებელი შემთხვევითი ფუნქციები. $[0, T]$ ინტერვალში შემთხვევითი $\mathbf{x}(t)$ პროცესის ამოვარდნების $N_c(T)$ რაოდენობა C დონისათვის, წარმოადგენს დისკრეტულ შემთხვევით არაუარყოფითი მთელ რიცხვებს.

საკმარისად მაღალ $C(C > 3\sigma)$ დონეზე, ნორმალური სტაციონარული $\mathbf{x}(t)$ პროცესის ამოვარდნები ხდება იშვიათი ხდონილებით, ხოლო ამოვარდნებს შორის θ ინტერვალები ამოვარდნების ხანგრძლივობასთან შედარებით იმდენად დიდი იქნება, რომ ამგვარი ინტერვალებით გამოყოფილი შემთხვევითი პროცესის კვებების მონაკვეთები თითქმის დამოუკიდებელი იქნება. შესაბამისად, ამოვარდნები t_1, t_2, \dots დროზე დამოუკიდებელი იქნება.

ამიტომ, ამგვარი ვარაუდების გამო, ამოვარდნების რაოდენობის განაწილების კანონი ახლოს იქნება პუასონის კანონთან, ე.ი.

$$P_m = P(N_c(T) = m) = \frac{[\lambda_c(T) \cdot T]^m}{m!} e^{-\lambda_c(T) \cdot T} \quad (38)$$

სადაც P_m გვაქვს იმის ალბათობაა, რომ $[0, T]$ ინტერვალში შემთხვევითი $\mathbf{x}(t)$ პროცესის C დონეზე და დადებითი ამოვარდნების რაოდენობა ტოლია m .

$$[\lambda_c(T)] \cdot T = M[N_c(T)] \quad (39)$$

ცნობილია, რომ პუასონის განაწილებისთვის დისპერსია და მათემატიკური მოლოდინი ერთმანეთს ემთხვევა

$$N_c(T) = D[N_c(T)] \quad (40)$$

რაოდენობის ინტენსივობის $\lambda_c(T)$ ამოვარდნების გამოსათვლელად, აუცილებელია ვიცოდეთ σ_x და σ_x სიდიდეები, რომლებიც განისაზღვრება სტაციონარული შემთხვევითი პროცესის ცნობილი $\mathbf{R}_x(T) = \mathbf{R}(t_1 - t_2)$ კორელაციის ფუნქციით.

მართვის სიტემების გამოკვლევა მეტად მნიშვნელოვანია პრაქტიკისათვის, რომ ამოვარდნების არარსებობა და ალბათობის P_0 , უნდა არსებობდეს ერთი მაინც

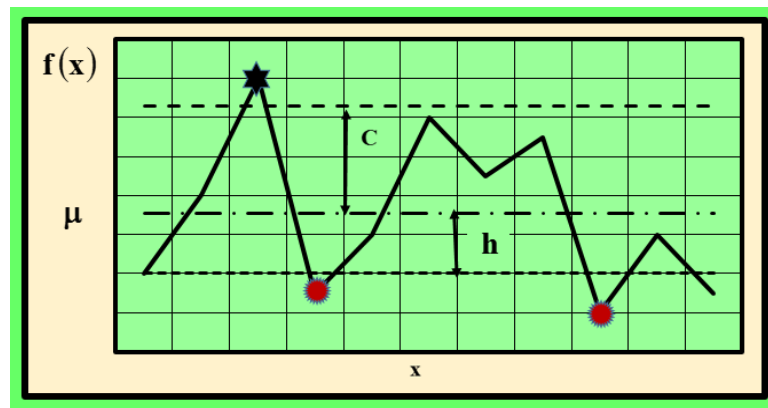
ამოვარდნა $[0, T]$ ინტერვალში, რომელიც განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით [36-38].

$$\begin{cases} \sigma_x = \sqrt{D_x} = R_x(0), \\ \sigma_x = \sqrt{D_x} \left\{ \sqrt{\frac{\partial^2 R_x(t_1, t_2)}{\partial t_1 \partial t_2}} \right\}_{t_1=t_2} \end{cases} \quad (41)$$

$$P_0 = e^{-\frac{\lambda_c(T)}{T}} \quad (m=0) \quad (42)$$

$$P_1 = 1 - P_0 = 1 - e^{-\frac{\lambda_c(T)}{T}} \quad (m=1) \quad (43)$$

ვთქვათ გვაქვს შემთხვევითი $x(x_i)$ მწკვრივი (ნახ. 23). ნახ. 19-ზე ნაჩვენებია შემთხვევითი $x(x_i)$ ფუნქცია, C და h დონეებით: μ - მათემატიკური მოლოდინი, დადებითი ამოვარდნის დონე C და უარყოფითი ამოვარდნის დონე. წერტილები შესაბამისად გვიჩვენებს დადებით (წრე) და უარყოფით (ვარსკვლავი) ამოვარდნებს. მიზანია დადებითი და უარყოფითი ამოვარდნების რიცხვის და ხანგრძლივობის ინტერვალების გამოსახულებების დადგენა.



ნახ. 23. შემთხვევითი $f(x)$ ფუნქციის ამოვარდნების ილუსტრაცია

როდესაც ვიხილავთ დადებითი ამოვარდნების რიცხვის გამოსახულებას, მაშინ შესაძლოა გამოვიყენოთ ცნობილი რაისის ფორმულას [39-41].

$$\varphi(C) = \frac{\sigma_v}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(C-m)^2}{2\sigma_v^2}\right], \quad (44)$$

სადაც σ_x და σ_v შესაბამისად არის შემთხვევითი და მისი წარმოებულის ფუნქციების საშუალოკვადრატული გადახრების მნიშვნელობები; C - დადებითი ამოვარდნის დონე.

რადგანაც უკვე განსაზღვრულია ამოვარდნების რიცხვის გამოსახულება, ამიტომ შესაძლოა განვსაზღვროთ ამოვარდნების ხანგრძლივობა. მართლაც

$$\tau = \frac{1}{\varphi(C)} = \frac{\sigma_x \pi}{\sigma_v \exp\left[-\frac{(C-m)^2}{2\sigma_v^2}\right]}. \quad (45)$$

თუ ვიღებთ ხანგრძლივობების ჯამურ დროებს, მაშინ შესწორებით გვექნება:

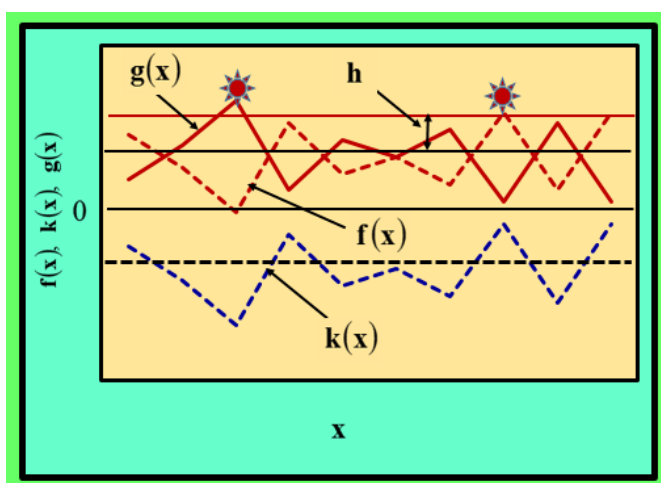
$$\tau = \frac{1}{\varphi(C)} = \frac{\sigma_x \pi \exp\left[\frac{(C-m)^2}{2\sigma_v^2}\right]}{\sigma_v} \left[1 - \Phi\left(\frac{C-m}{\sigma_x}\right)\right], \quad (46)$$

სადაც $\Phi(z)$ - ლაპლასის ინტეგრალური ფუნქციაა.

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-z^2/2} dz. \quad (47)$$

ანალოგიურად შეიძლება გამოვიყენოთ ურყოფითი ამოვარდნების რიცხვის ზევით მიღებული აღნიშნული მეთოდი. თუმცა ასეთი მსჯელობა გრძელდება და რთული გარდაქმნების საჭიროებს.

ამიტომ, ჩვენს მიერ შემუშავებულია გამარტივებული მეთოდი (ნახ. 24).



ნახ. 23ა. ურყოფითი ამოვარდნების რიცხვის დადგენის ილუსტრაცია

დაწვრილებით განვიხილოთ ჩვენს მიერ შემუშავებული მეთოდი. ვთქვათ გვაქვს საწყისი შემთხვევითი $\mathbf{x}(x_i)$ მწკვრივი. ჩავატაროთ ამ მწკვრივის. ინვერსია, ე.ი. შემოვაბრუნოთ იგი მათემატიკური μ მოლოდინის ღერძი 180° -ით, ხოლო შემდეგ მივუმატოთ მას 2μ . ე.ი. $y_i \Rightarrow y_i + 2\mu$. ნახაზ 19-ზე მოყვანილია სიმბოლოები. ცხადია რომ $f(\mathbf{x})$ და $g(\mathbf{x})$ ფუნქციებს გვექნება მათი საშუალოკვადრატული ევრთნაირი გადახრეები, ხოლო მათემატიკური მოლოდინები - სხვადასხვაა. ამიტომ, ამ შემთხვევაში შესაძლოა იგივე ფორმულის გამოყენება, მხოლოდ უარყოფითი ამოვარდნები. მივიღებთ:

$$n(\mathbf{h}) = \frac{\sigma_v}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\mathbf{h} - \mathbf{y})^2}{2\sigma_v^2}\right]. \quad (48)$$

ვთქვათ გვაქვს შემთხვევითი მწკვრივი \mathbf{x}_i და შესაბამისად განაწილების ალბათობის სიმკვრივის ფუნქცია $f(\mathbf{x})$. მოვახდინოთ საწყისი ფუნქციის არგუმენტის გარდაქმნა.

ვთქვათ მოვახდინოთ (\mathbf{x}, \mathbf{y}) წერტილის კოორდინატის შემობრუნება გარკვეულ θ კუთხით ახალ წერტილში $(\mathbf{x}', \mathbf{y}')$ კოორდინატებით [42]:

$$\begin{cases} \mathbf{x}' = \mathbf{x} \cos \theta \mp \mathbf{y} \sin \theta; \\ \mathbf{y}' = \pm \mathbf{x} \sin \theta + \mathbf{y} \cos \theta \end{cases} \quad (49)$$

თუ ხდება შემობრუნება $\theta = 180^\circ$ -ით, მაშინ გვექნება:

$$\begin{cases} \mathbf{x}' = \mathbf{x}; \\ \mathbf{y}' = -\mathbf{y}. \end{cases} \quad (50)$$

ამგვარად, ჩვენს შემთხვევაში გვექნება შემდეგი გარდაქმნა:

$$\mathbf{y} = -\mathbf{x} + 2\mathbf{m}, \quad (51)$$

სადაც \mathbf{m} არის $f(\mathbf{x})$ ფუნქციის მათემატიკური მოლოდინი.

თუ ცნობილია $f(\mathbf{x})$ ფუნქციის კერძო სახე, მაგალითად ნორმალური კანონი

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\mathbf{x} - \mathbf{m})^2}{2\sigma^2}\right],$$

როგორ დავადგინოთ $g(\mathbf{y})$ ფუნქციის სახე (ან თუ

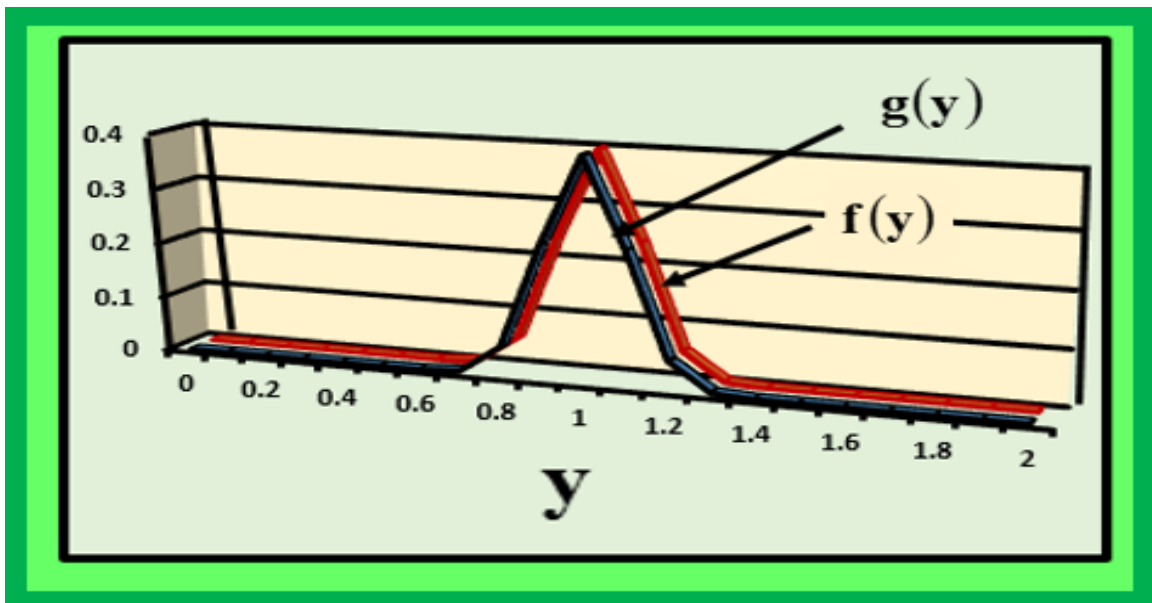
როგორია ზოგადი $f(\mathbf{x})$:

$$g(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(-\mathbf{x} + 2\mathbf{m} - \mathbf{m})^2}{2\sigma^2}\right] = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(-\mathbf{x} + \mathbf{m})^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (52)$$

ამგვარად ფუნქციები $g(y)$ და $f(x)$ ფუნქციები იგივეურია, რადგანაც გამოსახულებაში $(x-m)^2 = (-x+m)^2$.

აგრეთვე მარტივი რიცხვითი ტესტისათვის, გვაქვს ნახ. 24-ზე. საბოლოოდ დასკვნა შემდეგია: მიღებული სიმკვრივის მწკრივი y_i და მისი შესაბამისი ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია $g(y)$ იგივეურია $f(x)$ -ის. ამგვარად შესაძლოა უარყოფითი ამოვარდნების რიცხვის დადგენა, ზევით განხილული დადებითი ამოვარდნების რიცხვის ფორმულით.

ასევე მეორე მხრივ, თუ გვაქვს ξ ცვლადი და ფუნქციის $F_\xi(x)$ ალბათობის განაწილების ფუნქცია და ფუნქციის $f_\xi(x)$ ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციაა, მაშინ თუ მუდმივა a განსხვავებულია ნულისაგან და თუ გვაქვს ცვლადი $\eta = a\xi + b$ და მას გვაქვს ახალი ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია:



ნახ. 24. ფუნქციები $g(y)$ და $f(x)$ ფუნქციების იგივეურობა

$$f_\xi(x) = \frac{1}{|a|} f_\xi\left(\frac{x-b}{a}\right), \quad (53)$$

რაც ემთხვევა მიღებულ გამოსახულებას [44].

ძირითადი შემთხვევითი ფუნქციის სიჩქარის ცვლილების დისპერსია განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$\sigma_v^2 = -\frac{d^2 K_c(0)}{dt^2}, \quad (54)$$

ანდა σ_v^2 არის კორელაციური ფუნქციის სიჩქარე ნულში. $v(t)$ -ს მათემატიკური მოლოდინი შემთხვევითი პროცესის სტაციონარობის გამო ნულის ტოლია.

ამგვარად, საბოლოოდ მივიღებთ მოდიფიცირებულ ფორმულას [45]:

$$\bar{n}_c = \frac{\sigma_v}{2\pi\sigma_x} e^{-\frac{(C-\mu)^2}{2\sigma_x^2}}. \quad (55)$$

ასევე მივიღებთ ფიქსირებული დონის მიხედვით ამოვარდნის საშუალო ხანგრძლივობას

$$\tau = \frac{\pi\sigma_x}{\sigma_v} e^{-\frac{(C-\mu)^2}{2\sigma_x^2}} \left[1 - \Phi\left(\frac{C-\mu}{\sigma_x}\right) \right], \quad (56)$$

სადაც $\Phi(t)$ არის ლაპლასის ინტეგრალური ფუნქცია

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-z^2/2} dz. \quad (57)$$

3.3. საქართველოში ბუნებრივი გაზის მიწოდების პროცესის დინამიკის ალბათური მახასიათებლების დადგენა

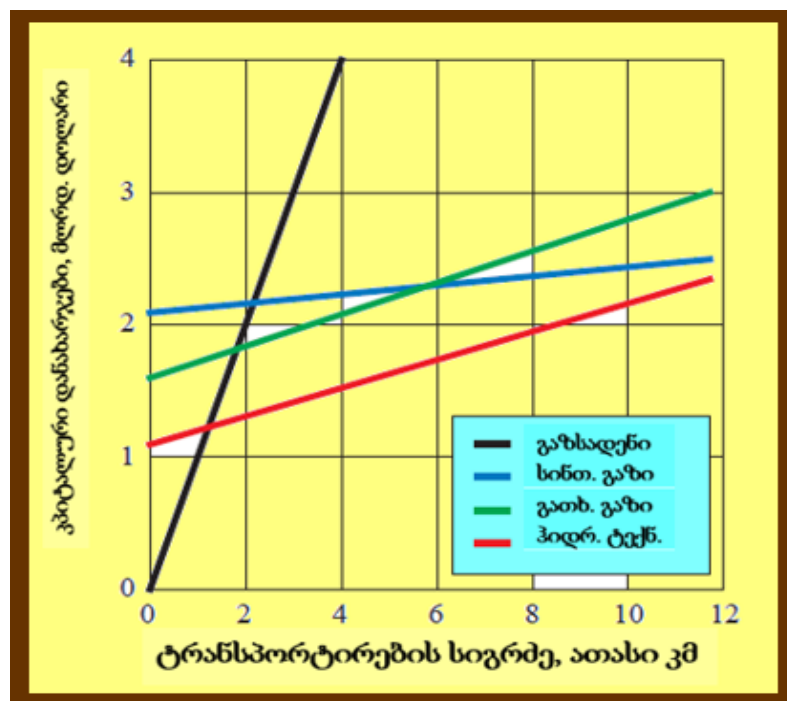
გაზის საბადოების განვითარება უკავშირდება გაზის ტრანსპორტირების ტექნოლოგიის ეკონომიკურად არჩევანს. კერძოდ: გათხევადებული ბუნებრივი გაზი, კომპირებული ბუნებრივი გაზი და ბუნებრივი გაზის ჰიდრატები, რომლებიც შეიძლება გაზსადენით ტრანსპორტირების ალტერნატივად მივიჩნიოთ. აქედან გამომდინარე, უნდა მოხდეს გათხევადებული, კომპირებული და ბუნებრივი გაზის ჰიდრატების სატრანსპორტო ტექნოლოგიების ანალიზი, რაც მაგისტრალური ტრანსპორტირების ტექნოლოგიის დამატებად ითვლება.

გაზის ტრანსპორტირების სფეროში ტექნოლოგიური გადაწყვეტილებების განმსაზღვრელი მთავარი ფაქტორი ბუნებრივი გაზის აგრეგაციის მდგომარეობაა,

რომელსაც შეუძლია შეცვალოს მდგომარეობა საბადოდან საბოლოო მომხმარებლამდე.

ტრანსპორტირებული გაზის აგრეგატული მდგომარეობები ხასიათდება ბუნებრივი გაზის შემადგენლობით, და იზომება ნორმალურ კუბურ მეტრში (ნ.მ3), სასაქონლო პროდუქციის მოცულობის ერთეულებში.

ნორვეგიელი მკვლევარების მიერ მოპოვებული მონაცემები ბუნებრივი გაზის ტრანსპორტირების მანძილზე კაპიტალური ხარჯების დამოკიდებულება, ბუნებრივი გაზის ტრანსპორტირების სპექტრისათვის წარმოდგენილია ნახ.25-ზე [46,47].



ნახ. 25. გაზის ტრანსპორტირების პროექტების კაპიტალური ხარჯების დამოკიდებულება მანძილზე

ჩვენ ვიხილავთ შპს „საქართველოს გაზის ტრანსპორტირების კომპანიას“ მიერ <http://e-platform.ggtc.ge/gasanalysis.aspx> საიტზე საჯაროდ მოყვანილი ბუნებრივი გაზის ლაბორატორიის მიერ შექმნილი მონაცემებს (მაგალითი) (ნახ. 26). ცხრილში მოყვანილია ბუნებრივი გაზის ქიმიური კომპონენტები, თბოუნარიანობა და სიმკვრივე. ვიხილავთ თბოუნარიანობისა და სიმკვრივის დროითი მწკრივები, აზერბაიჯანიდან და რუსეთიდან შემოსული

გაზებისთვის. ნახ. 26-ზე, მაგალითისათვის, ნაჩვენებია თბოუნარიანობის (აზერბაიჯანი) დროითი მწკრივი.

შპს „საქართველოს გაზის ტრანსპორტირების კომპანიის“, საიტზე მოყვანილია ბუნებრივი გაზის საგამოცდო ლაბორატორიის მონაცემები. ჩატარებული გამოცდების მეთოდები და ნორმატიული დოკუმენტები, მოყვანილია ცხრილ 7-ში.

ბუნებრივი აირის შემადგენლობა

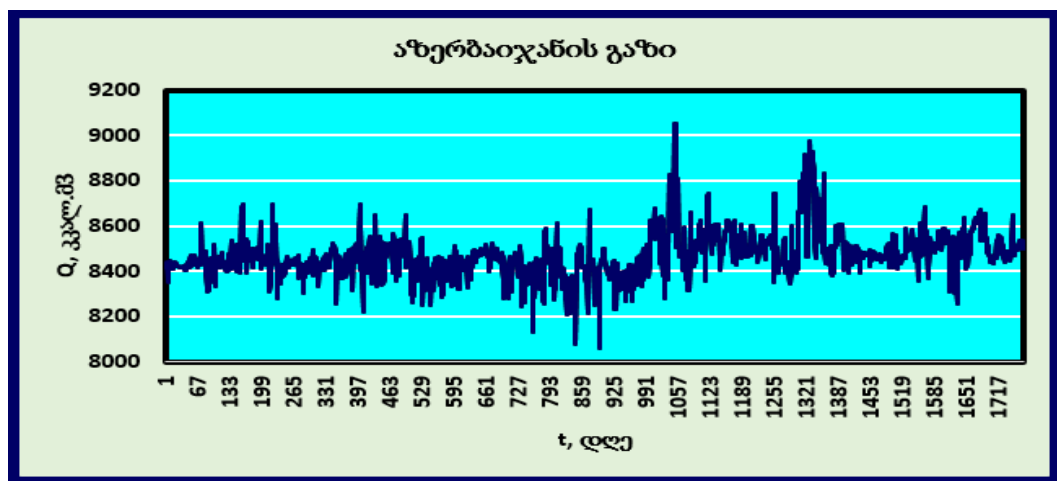
ანალიზი შესრულებულია შ.პ.ს „საქართველოს გაზის ტრანსპორტირების კომპანია“-ის მიერ, აკრედიტაციის მოწმობა GAC-TL-0089, ლაბორატორია აკრედიტებულია სსტ ისო იექ 17025:2010 მიხედვით, გაზის შემადგენლობის მონაცემები დაიხატა 2020-03-06

საინჟინრო თარიღი: 2020-03-06

საინჟინრო თარიღი	გაზის (შეფარვა)	კონც. (შეფარვა)	მომენტი (შეფარვა)	ჩაბრუნება (შეფარვა)	ჩაბრუნება (შეფარვა)	ჩაბრუნება (შეფარვა)	ჩაბრუნება (შეფარვა)	ჩაბრუნება (შეფარვა)	ჩაბრუნება (შეფარვა)	ჩაბრუნება (შეფარვა)	ჩაბრუნება (შეფარვა)	ჩაბრუნება (შეფარვა)	ჩაბრუნება (შეფარვა)	ჩაბრუნება (შეფარვა)
2020-03-06	92.9147	3.3929	1.4379	0.3793	0.2642	0.0879	0.0937	0.0091	0.7293	0.7336	0.7336	8416.93	29.24	
2020-03-06	95.7928	2.3111	0.4874	0.1001	0.0997	0.0123	0.0148	0.0027	0.7964	0.7912	0.7900	8180.47	34.25	
2020-03-06	94.1096	2.8112	1.4440	0.4069	0.2751	0.0818	0.1078	0.0147	0.1775	0.3718	0.7260	8437.53	25.41	
2020-03-06	94.0295	2.7306	1.4088	0.3871	0.2687	0.0804	0.1057	0.0134	0.4175	0.5483	0.7260	8438.87	29.29	
2020-03-06	94.1338	2.7962	1.4448	0.4073	0.2755	0.0823	0.1062	0.0134	0.1768	0.3690	0.7260	8437.53	25.41	
2020-03-06	95.7633	2.3121	0.4889	0.0999	0.0991	0.0126	0.0171	0.0032	0.8126	0.1870	0.7900	8180.47	34.25	
2020-03-06	93.5971	3.0239	1.5082	0.4142	0.2820	0.0822	0.1087	0.0149	0.2276	0.7218	0.7318	8464.70	25.44	
2020-03-06	93.2347	2.2346	1.5029	0.4119	0.2807	0.0813	0.1078	0.0139	0.2264	0.7262	0.7330	8479.02	25.80	
2020-03-06	93.1349	2.4632	1.4881	0.4083	0.2773	0.0795	0.1088	0.0127	0.2494	0.7847	0.7330	8479.02	25.80	
2020-03-06	93.7633	2.3131	0.4889	0.0999	0.0991	0.0126	0.0171	0.0032	0.8126	0.1870	0.7900	8180.47	34.25	
2020-03-06	93.4327	2.1647	1.5034	0.4133	0.2812	0.0829	0.1088	0.0149	0.2492	0.7933	0.7328	8469.48	25.44	
2020-03-06	94.7942	2.2650	1.4947	0.4088	0.2768	0.0809	0.1073	0.0134	0.1807	0.4089	0.7318	8436.04	25.32	
2020-03-06	94.7894	2.2655	1.4946	0.4134	0.2774	0.0832	0.1092	0.0180	0.1763	0.4082	0.7318	8436.49	25.33	

ნახ. 26. შპს „საქართველოს გაზის ტრანსპორტირების კომპანიის“ საიტზე მოყვანილი ლაბორატორიის მიერ შექმნილი მონაცემები (მაგალითი)

ჩვენს მიერ ვიხილავთ დაახლოებით 5 წლის მიხედვით მიწოდებული ბუნებრივი გაზის პარამეტრებს, კერძოდ თბოუნარიანობას და სიმკვრივეს (ნახ. 27).



ნახ. 27. ბუნებრივი გაზის დინამიკა 2015-დან 2020 წლამდე

ცხრილი 7. ბუნებრივი აირის საგამოცდო ლაბორატორიის მონაცემების ჩატარებული გამოცდების მეთოდები და ნორმატიული დოკუმენტები

გამოცდების სახეობა	საკვლევი პარამეტრები	გამოცდის მეთოდის იდენტიფიკაცია და დასახელება
პიკნომეტრული მეთოდი	ბუნებრივი აირის სიმკვრივე	ГОСТ 17310-2002 სიმკვრივის განსაზღვრა პიკნომეტრული მეთოდით
ქრომატოგრაფიული მეთოდი	ბუნებრივი გაზის შემადგენლობა: მეთანი, პროპანი, i-ბუთანი, n-ბუთანი, i-პენტანი, n-ჰექსანი, აზოტი, ნახშირორჟანგი	ГОСТ 17310-2002/31371, 6-2008 (ISO 6974-6:2002) გაზი ბუნებრივი, შემადგენლობის განსაზღვრა მოცემული ცდომილებით გაზის ქრომატოგრაფიული მეთოდით. ნაწილი 6. წყალბადის, ჰელიუმის, ჟანგბადის, აზოტის, ნახშირორჟანგის და ნახშირწყალბადების (C1-C8) განსაზღვრა სამი კაპილარული სვეტის გამოყენებით.
გამოთვლითი მეთოდი	სიმკვრივე (ფარდობითი და აბსოლუტური)	ГОСТ 31369-2008 (ISO 6976: 1995). ბუნებრივი აირი, თბოუნარიანობაის, სიმკვრივის, ვობეს ინდექსის განსაზღვრა ნარევებისათვის და ლაბ. პროცედურა GGTC-LF-01-14
გამოთვლითი მეთოდი	თბოუნარიანობა, ვობეს რიცხვი	ГОСТ 31369-2008 (ISO 6976: 1995). ბუნებრივი აირი, თბოუნარიანობაის, სიმკვრივის, ვობეს ინდექსის განსაზღვრა ნარევებისათვის და ლაბ. პროცედურა GGTC-LF-01-14

ბუნებრივი გაზი წარმოადგენს საწვავ-ენერგეტიკული სისტემის ერთ-ერთ ძირითად ელემენტს. ბუნებრივ გაზზე მოთხოვნილება ყოველწლიურად იზრდება. გაზის საწვავის დიდ უპირატესობას განაპირობებს მისი მილსადენებით ტრანსპორტირების შესაძლებლობა, რაც აიაფებს დიდ მანძილებზე ტრანსპორტირების ღირებულებას. ამასთანავე, ბუნებრივ გაზზე მომუშავე დანადგარებს გააჩნიათ უფრო მეტი მარგი ქმედების კოეფიციენტი ვიდრე სხვა საწვავებზე მომუშავე დანადგარებს, რაც გამოწვეულია გაზის მაღალი თბოუნარიანობით. გაზის წვის პროცესის ავტომატიზირება მარტივია, რაც უზრუნველყოფს უსაფრთხოებას და აუმჯობესებს ტექნოლოგიური პროცესების წარმართვას, აიოლებს დანადგართა ექსპლუატაციას, არ საჭიროებს საწვავის მიწოდების რთულ მოწყობილობებს. გაზი წარმოადგენს ეკოლოგიურად სუფთა საწვავს, იგი იწვის პრაქტიკულად მავნე გამონაბოლქვების გარეშე.

ბუნებრივი გაზი ძირითადად შედგება ზღვრული ნახშირწყალბადებისგან, გვხვდება აგრეთვე გოგირდწყალბადი, აზოტი, ნახშირორჟანგი და წყლის ორთქლი. ბუნებრივი გაზის შემადგენლობაში შედის წვადი (მეთანი CH_4 , ნახშირბადის ოქსიდი CO , წყალბადი H_2) და არაწვადი (აზოტი N_2 , ნახშირბადის დიოქსიდი (ნახშირორჟანგი) CO_2 , ჟანგბადი O_2) გაზები, ასევე მავნე კომპონენტები (გოგირდწყალბადი H_2S). სხვადასხვა საბადოდან მოპოვებული ბუნებრივი გაზის ქიმიური შემადგენლობა შეიძლება განსხვავდებოდეს, თუმცა მისი ძირითადი კომპონენტია მეთანი (CH_4), რომელიც 98%-დეც აღწევს, გამომდინარე აქედან ბუნებრივი გაზის თვისებები ძირითადად განპირობებულია მეთანის თვისებებით. 15მ3 მეთანის მასა შეადგენს 0.717 კგ-ს, ხოლო მისი მოლეკულური მასის 75% შეადგენს ნახშირბადი, 25%-ს წყალბადი $M(\text{CH}_4) = 12 + 4 = 16$, რაც განაპირობებს დაწვის სითბოს უმაღლეს და უდაბლეს მაჩვენებლებს შორის განსხვავებებს. მეთანის ჰაერზე წვის ქიმიური ფორმულა გამოისახება შემდეგი ტოლობით:



მეთანის დაწვა ხდება ენერჯის სითბოდ მიღების მიზნით. გამოყოფილი სითბოს რაოდენობის გაზომვის ძირითად ერთეულად გამოიყენება კალორია (კალ.). კალორია არის სითბოს ის რაოდენობა, რომელიც აუცილებელია 1გრ წყლის ტემპერატურის 10C-ით მოსამატებლად. რაც უფრო მეტია გაზის კალორიულობა მით ნაკლები მისი რაოდენობაა საჭირო წყლის ასადუღებლად ან ოთახის ტემპერატურის 1 გრადუსით მოსამატებლად. SI სისტემაში სითბო გამოისახება უნივერსალურ ერთეულში - ჯოული.

სხვადასხვა სახის საწვავი გამოყოფს განსხვავებულ სითბოს რაოდენობას. გამომდინარე აქედან, შემოდებულია წვის კუთრი სითბოს მცნება. გაზის საწვავის წვის კუთრი სითბო არის სითბოს ის რაოდენობა, რომელიც გამოიყოფა 1მმ³ ან 1კგ გაზის დაწვისას. ბუნებრივი გაზის წვის კუთრი სითბო იზომება კილოკალორიები კუბურ მეტრში (00C ან 200C ტემპერატურაზე და 760 მმ.ვწყ.სვ წნევაზე).

როგორც აღვნიშნეთ, განასხვავებენ დაწვის სითბოს უმაღლეს Q_{Max} და უდაბლეს (Q_{Min}) მაჩვენებლებს. დაწვის სითბოს უმაღლეს Q_{Max} მაჩვენებელი შეესაბამება იმ პირობებს, რომელთა დროს წვის პროდუქტებში შემავალი წყლის ორთქლი მიიყვანება თხევად მდგომარეობამდე. რეალურ პირობებში გაზის წვის დროს წყლის ორთქლი არ კონდესირდება, არამედ იმყოფება ორთქლის მდგომარეობაში. განსაზღვრება დაწვის სითბოს უდაბლესი მაჩვენებელი შეეფარდება იმ გაზებს, რომელთა წვის დროს გამოიყოფა წყლის ორთქლი. სხვა სიტყვებით: დაწვის სითბოს უმაღლეს Q_{Max} მაჩვენებელი შეესაბამება სითბოს იმ რაოდენობას, რომელიც გამოიყოფა ერთეული მოცულობა გაზის დაწვისას, გაზომილი ნორმალურ და სტანდარტულ პირობებში, აღნიშნულ რაოდენობაში შედის ასევე წყლის ორთქლის კონდესირებისას (ნამის ტემპერატურამდე გაციებისას) გამოყოფილი სითბო, ხოლო დაწვის სითბოს უდაბლეს (Q_{Min}) მაჩვენებელში წყლის ორთქლების კონდესირების სითბო არ შედის.

განსხვავება Q_{Max} და Q_{Min} მაჩვენებელს შორის შეადგენს 600კკალ-ს ყოველ კილოგრამ წყლის ორთქლზე, ანუ 600 კკალ იმ ტენიანობის ყოველ პროცენტზე, რომელსაც შეიცავს გაზისებრი საწვავი. გამომდინარე აქედან,

$$Q_{Max} = Q_{Min} - 600 \cdot 0,8V_{Air} \quad (59)$$

სადაც, $8V_{Air}$ არის წყლის ორთქლის მოცულობა (ნმ3), რომელიც წარმოიქმნება 1 ნმ3 გაზის დაწვისას, 0.8 - წყლის ორთქლის სიმკვრივე (კგ/მ3).

გაზის დაწვისას სითბოს ნაკადის მუდმივობა ხასიათდება ვობეს რიცხვით, რომელიც მიიღება დაწვის სითბოს (უმადლესი ან უდაბლესი) მოცულობითი თანაფარდობით გაზის და ჰაერის სიმკვრივეების ფარდობითი მნიშვნელობის კვადრატულ ფესვთან:

$$W_{Max} = Q_{Max} / \sqrt{\rho_G / \rho_H} \quad (60)$$

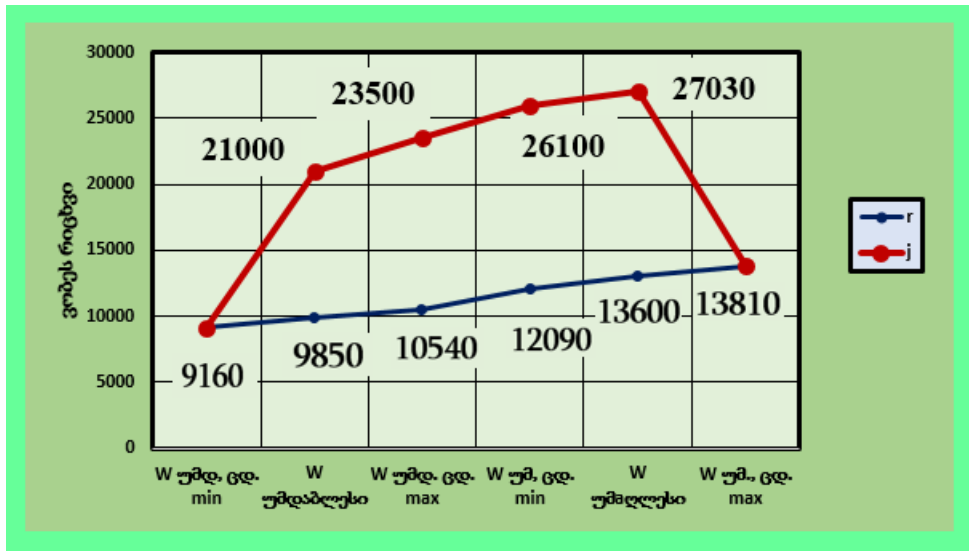
ერთნაირი ვობეს რიცხვის მქონე გაზები თანაბარი წნევით გამოდინებისას შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ერთმანეთის ურთიერთჩანაცვლებით, სანთურის ან საქშენის შეცვლის გარეშე. სანთურაზე განსხვავებული ვობეს რიცხვის მქონე გაზების მიწოდებისას, ვობეს ნაკლები მნიშვნელობის მქონე გაზი უნდა მიეწოდოს უფრო მეტი წნევით.

საწვავი გაზების ურთიერთ ჩანაცვლება - ეს არის ღუმელებში, დანადგარებში და ხელსაწყოებში მათი წვისთვის გამოყენების შესაძლებლობა გაზმომხმარებელი მოწყობილობების კონსტრუქციის ცვლილების გარეშე. გაზგამომყენებელი მოწყობილობების მდგრადი მუშა რეჟიმი ხასიათდება სანთურების ცეცხლის ალის მოწყვეტისა და გახტომების გარეშე მუშაობით. აღნიშნული რეჟიმი მიიღწევა დაწვის სითბოს მუდმივობის შენარჩუნებით (ნახ. 28). დიაგრამით ნაჩვენებ არეში მოქცეული ვობეს რიცხვის მაჩვენებლის (კვალ/მ³) მქონე გაზების ურთიერთ ჩანაცვლება შესაძლებელია გაზმომხმარებელი მოწყობილობების კონსტრუქციის ცვლილების გარეშე.

ამგვარად ვიხილავთ თბოუნარიანობის სტოქასტიკურ მწკრივს და ჩავატაროთ მისი მახასიათებლების ანალიზს და დადგენას. პირველ რიგში მოვახდინოთ ინტერვალების რაოდენობის განსაზღვრა და ჰისტოგრამის დადგენა.

ჰისტოგრამების აგებისა და ისეთი სტატისტიკების გაანგარიშებისას როგორებიცაა დამაჯერებლობის ან χ^2 პირსონის კრიტერიუმის გამოიყენება ინტერვალების რაოდენობის დაჯგუფება. ინტერვალების **K** რაოდენობის

შესაფასებლად რეკომენდებული ფორმულების შეფასება უმეტესად ემპირიულია და, როგორც წესი, იძლევა უფრო მაღალ მნიშვნელობებს.



ნახ. 28. ვობეს რიცხვის მაჩვენებლის (კვალ/მ³) მქონე გაზების ურთიერთჩანაცვლება

ინტერვალების რაოდენობის დადგენა დაკავშირებულია ამონაკრეფის ოდენობასთან. სხვადასხვა წყაროების მრავალი რეკომენდაცია ინტერვალების რაოდენობის არჩევის შესახებ მოცემულია [48]-ში.

თანაბარი სიგრძის ინტერვალის შერჩევისას, განმსაზღვრელი მოთხოვნაა, რომ ინტერვალებში მოხვედრილი დაკვირვების რაოდენობა არც თუ ისე მცირე და შესაძარებითი იყოს. ასეთი მოთხოვნა დაკავშირებულია იმ საფრთხესთან, რომ

წინააღმდეგ შემთხვევაში ტიპის სტატისტიკის χ^2 განაწილება, არ იქნება χ_r^2 განაწილება. უფრო მეტიც, ხშირად რეკომენდირებულია, რომ ინტერვალთა გათვალისწინებული დაკვირვებების რაოდენობა უნდა იყოს მინიმუმ 10.

პირსონის χ^2 კრიტერიუმის სიმძლავრის შესწავლის მიძღვნილ ნაშრომებთან უნიმოდალური განაწილების შემთხვევაში, მოსალოდნელი დაკვირვებული სიხშირეები ერთ ან ორ ინტერვალზე შეიძლება შემცირდეს 1 ან 2 ინტერვალთ.

სტატისტიკური მოდელირება ადასტურებს, რომ ასეთ სიტუაციებში, χ^2 ტიპის სტატისტიკის განაწილებები შესაბამისობაშია χ_r^2 განაწილებებთან.

დიდი N ამონაკრებისას, K -ს სხვადასხვა ფორმულების მიხედვით, გაბნევა საკმაოდ დიდია. ამრიგად, პრაქტიკაში, ინტერვალის რაოდენობის შერჩევას, ხელმძღვანელობენ იმით, რომ ინტერვალებში უნდა მოხვდეს მინიმუმ 5-10 დაკვირვება.

ცნობილია, რომ ჰისტოგრამის გადახრა განაწილების სიმკვრივისგან საუკეთესო შემთხვევაში არის $1/\sqrt[3]{N}$ -ის რიგი, რომელიც აღწევს K ინტერვალების რაოდენობა $\sqrt[3]{N}$ -ის რიგით. ცხადია, რომ K -ს "ოპტიმალური" მნიშვნელობა დამოკიდებულია არა მხოლოდ ამონაკრების მოცულობაზე, არამედ ასევე განაწილების შესახებ კანონის ტიპი და დაჯგუფების მეთოდი.

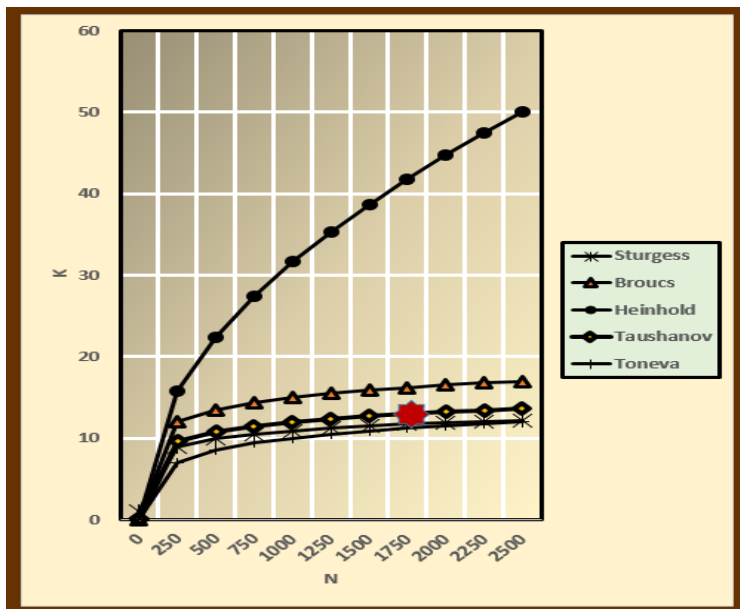
ასიმპტოტიურად ოპტიმალურ დაჯგუფებებში სკალარული პარამეტრის გათვალისწინებით 10-11 ინტერვალებით, ინახება ამონაკრების ინფორმაციის დაახლოებით 98%, პარამეტრის ვექტორთან მიმართებაში ოპტიმალური დაჯგუფებით (ორი პარამეტრით) გვაქვს 15 ინტერვალი, რაც დაახლოებით 95%-ია. ინტერვალების რაოდენობის შემდგომი ზრდა მნიშვნელოვანია.

ოპტიმალური დაჯგუფებით, ინტერვალებში მოხვედრის ალბათობა, ზოგადად - სხვადასხვაა. ჩვეულებრივად, ბოლო ინტერვალებში მოხვედრის ალბათობა მინიმალურია. აქედან გამომდინარე სასურველია შევირჩიოთ პირობები ნებისმიერი ინტერვალისთვის, ოპტიმალური დაჯგუფებით. K -ს შერჩევა ხდება $NP_i(\theta) \geq 5-10$ პირობების ნებისმიერი ინტერვალისთვის, ოპტიმალური დაჯგუფებით.

ჩავატაროთ ანალიზი და განვიხილოთ ინტერვალების რაოდენობის დადგენის ფორმულები და შესაბამისი ინტერვალების რაოდენობის ფუნქციები ამონაკრების რიცხვის მიხედვით (ცხრილი 8, ნახ. 29).

მრავალ წყაროში, მოყვანილია სტარჯესის ევრისტიკული ფორმულა ინტერვალების "ოპტიმალური" რაოდენობის შესახებ. ევრისტიკული მეთოდი – ეფუძნება დასმული ამოცანის ეტაპობრივ გადაწყვეტას. ეს პროცესი სწავლებისას ფაქტების დამოუკიდებლად დაფიქსირებისა და მათ შორის კავშირების დანახვის გზით ხორციელდება.

ამ შემთხვევაში პარამეტრები ტოლია: $Q_{\min} = 8000$; $Q_{\max} = 9000$
 $\mu = 8573$; $\sigma = 98,5$. ცხრილ 9-ში და ნახ. 29-ზე მოყვანილია თბოუნარიანობის დროითი შემთხვევითი მწკრივის ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია.



ნახ. 29. ბუნებრივი გაზის თბოუნარიანობის (აზერბაიჯანი) დროითი მწკრივის ინტერვალების დადგენა

ცხრილი 8. დროითი მწკრივის ინტერვალების დადგენა

ავტორი, წყარო	ფორმულა
სტარჯესი [49]	$K = 1 + 3,3 \lg N$
ბრუქსი და კარუეზერი [50]	$K = 5 \lg N$
ჰეინჰოლდი [49,50]	$K = \sqrt{N}$
ტაუსანოვი [51]	$K = 54gN$
ტონევა [52]	$K = 5 \lg N - 5$

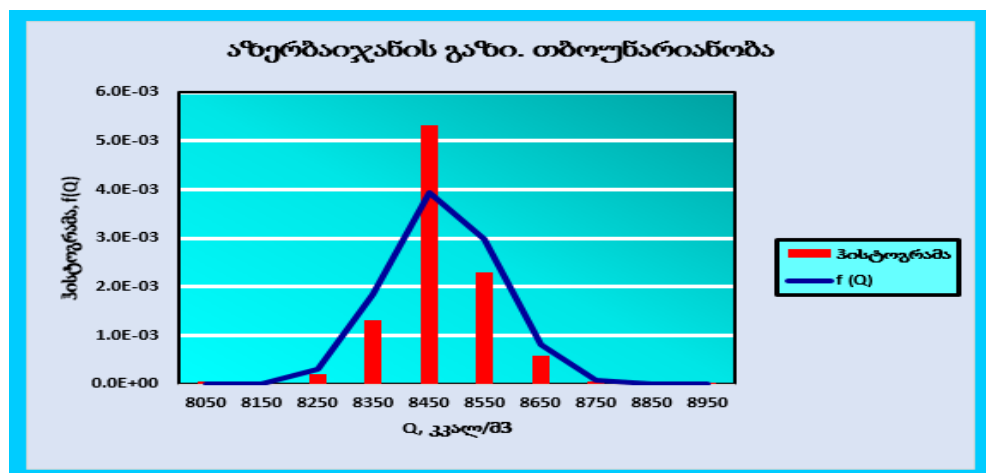
თბოუნარიანობის დროითი შემთხვევითი მწკრივის ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია (ნახ. 30):

ცხადია, რომ თბოუნარიანობის დროითი შემთხვევითი მწკრივის ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია - ნორმალურია. გარდა ამისა დადგინდა, რომ მწკრივი სტაციონარულია და ერგოდიულია.

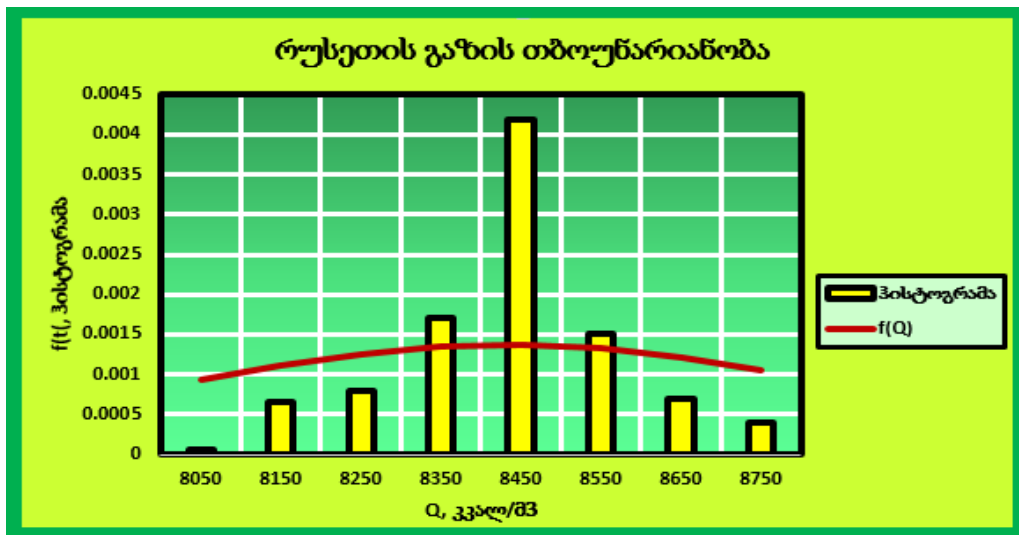
ანალოგიურად დადგინდა რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის თბოუნარიანობა და რუსეთიდან და აზერბაიჯანიდან გაზის სიმკვრივეს ალბათური მახასიათებლები (ნახ. 31) [53,54].

ცხრილი 9. მწკრივის ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია

Q	ჰისტოგრამა	f(Q)
8050	0.0052	0
8150	0.0069	0.0019
8250	0.0213	0.0312
8350	0.1309	0.1858
8450	0.5323	0.3942
8550	0.2290	0.2985
8650	0.0588	0.0806
8750	0.0063	0.0078
8850	0.0052	0.0003
8950	0.0040	0

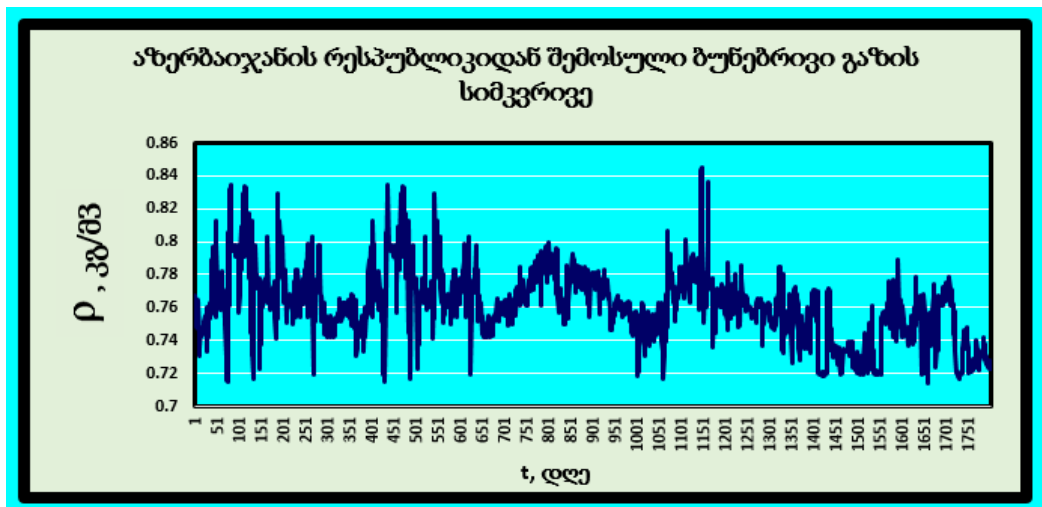


ნახ. 30. აზერბაიჯანის გაზის თბოუნარიანობის დროითი შემთხვევითი მწკრივის ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია



ნახ. 31. რუსეთის გაზის თბოუნარიანობის დროითი შემთხვევითი მწკრივის ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია

განვიხილოთ აზერბაიჯანიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის სიმკვრივის მწკრივი (ნახ. 32).



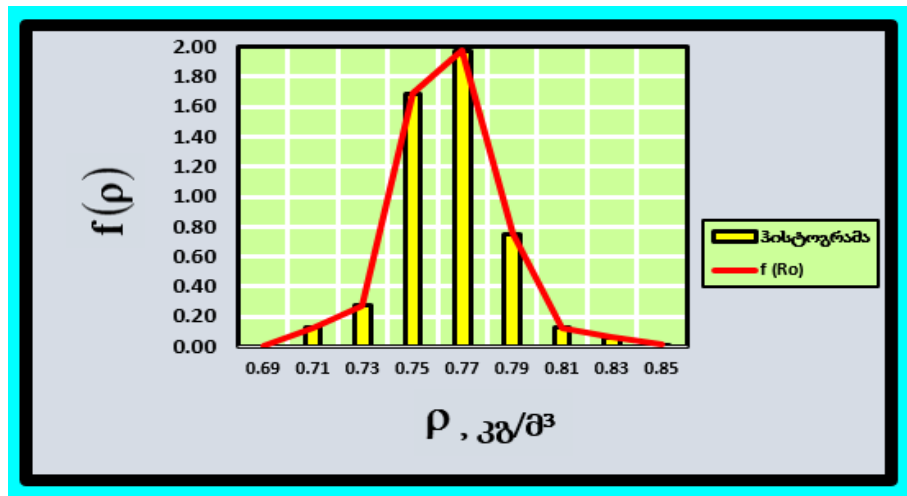
ნახ. 32. აზერბაიჯანიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის სიმკვრივეს მწკრივი

აზერბაიჯანიდან შემოსული ბუნებრივი სიმკვრივეს მწკრივის სტატისტიკური დამუშავების შემდეგ, მივიღებთ: მწკრივის მონაცემების რაოდენობა $N = 1568$, მათემატიკური მოლოდინი $\mu = 0,7614$ და საშუალოკვადრატული გადახრა $\sigma_p = 0,0234$

ცხრილ 10-ში და ნახ. 33-ზე, მოყვანილია ჰისტოგრამისა და განაწილების ალბათობის სიმკვრივის ფუნქცია.

ცხრილი 10. ჰისტოგრამისა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია (აზერბაიჯანი)

ρ , კგ/მ ³	ჰისტოგრამა	$f(\rho)$
0.69	0	0.14
0.71	1.24	1.34
0.73	2.71	6.1
0.75	16.87	13.32
0.77	19.74	14.02
0.79	7.49	7.11
0.81	1.24	1.74
0.83	0.61	0.2
0.85	0.1	0.01

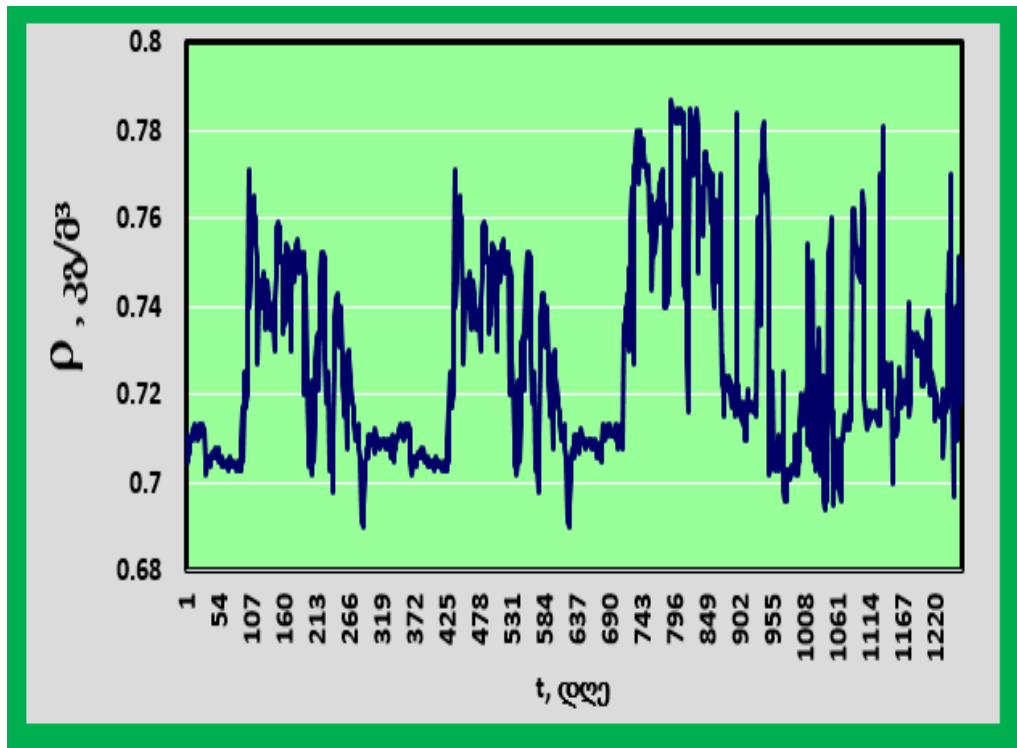


ნახ. 33. აზერბაიჯანიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის სიმკვრივის ჰისტოგრამისა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია

შემდგომში განვიხილოთ რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის სიმკვრივეს მწკრივი (ცხრილი 11, ნახ. 34).

რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი სიმკვრივეს მწკრივის სტატისტიკური დამუშავების შემდეგ, მივიღებთ: მწკრივის მონაცემების რაოდენობა $N = 1264$, მათემატიკური მოლოდინი $\mu = 0,7274$ და საშუალოკვადრატული გადახრა $\sigma = 0,0234$

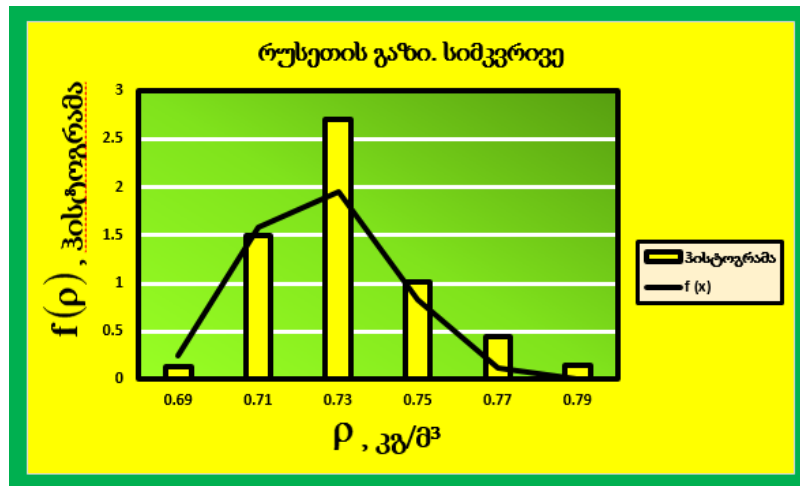
ცხრილ 11-ში და ნახ. 35-ზე, მოყვანილია ჰისტოგრამისა და განაწილების ალბათობის სიმკვრივის ფუნქცია.



ნახ. 34. რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის სიმკვრივის მწკრივი

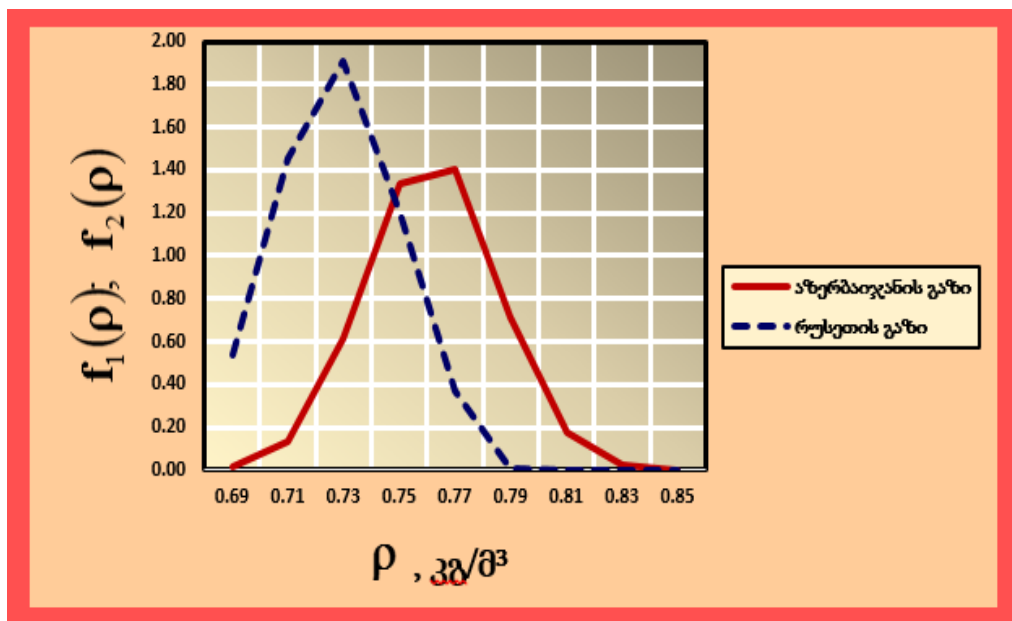
ცხრილი 11. ჰისტოგრამისა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია (რუსეთი)

ρ , კგ/მ ³	ჰისტოგრამა	$f(\rho)$
0.69	0	0
0.71	1.2	1.2
0.73	2.7	2.7
0.75	16.9	16.9
0.77	19.7	19.7
0.79	7.5	7.5
0.81	1.2	1.2
0.83	0.6	0.6
0.85	0.1	0.1



ნახ. 35. რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის სიმკვრივის ჰისტოგრამისა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია

შევადართ აზერბაიჯანიდან და რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის სიმკვრივის ჰისტოგრამისა და განაწილების ალბათობის სიმკვრივის ფუნქციები (ნახ. 36).



ნახ. 36. აზერბაიჯანიდან და რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის სიმკვრივის ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციების შედარება

ამიტომ, აზერბაიჯანიდან და რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის სიმკვრივეს შედარება ასეთია: აზერბაიჯანიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის სიმკვრივეს მათემატიკური მოლოდინი უფრო მაღალია, ვიდრე რუსეთის. თუმცა

აზერბაიჯანიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის სიმკვრივეს საშუალოკვადრატული გადახრა უფრო მეტია (გაბნევა მეტია). რუსეთი გაზის სიმკვრივეს გაბნევა - ნაკლებია, თუმცა ორივე პარამეტრი ნორმაშია.

3.4. ბუნებრივი გაზის დინამიკური მახასიათებლების მწკრივის ამოვარდნების რაოდენობის დადგენა

გნვიხილოთ თბოუნარიანობის ზევით აღნიშნული ამოვარდნების რიცხვი. სააწყის მონაცემების შესაბამის, განვიხილოთ ამ მწკრივის პარამეტრები, რომლებიც განისაზღვრება ცნობილი პროცედურის შესაბამისად, გარდა $C = 8743$ - ის ნაცვლად $h = 8723$ (ცხრილი 12, ნახ. 37).

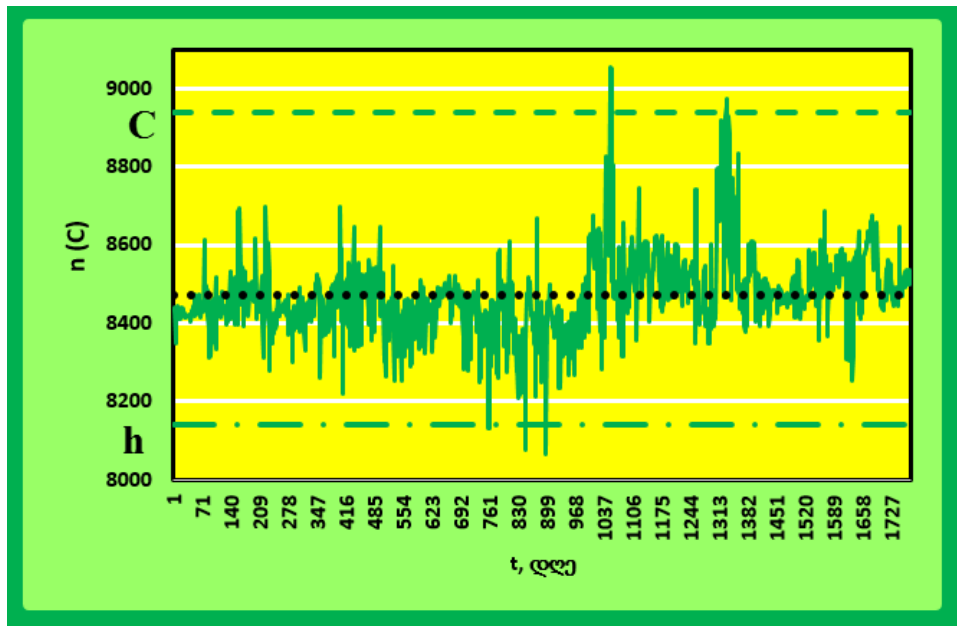
მაგალითისათვის, ნახ. 38-ზე ნაჩვენებია თბოუნარიანების მწკრივის ინვერსია:

ამოვარდნების რიცხვის დადგენა ხდება ზევით მიღებული ფორმულით:

$$n(C_{Max}) = \frac{\sigma_y}{2\pi\sigma_x} \exp\left[-\frac{(C-m)^2}{2\sigma_y^2}\right]. \quad (61)$$

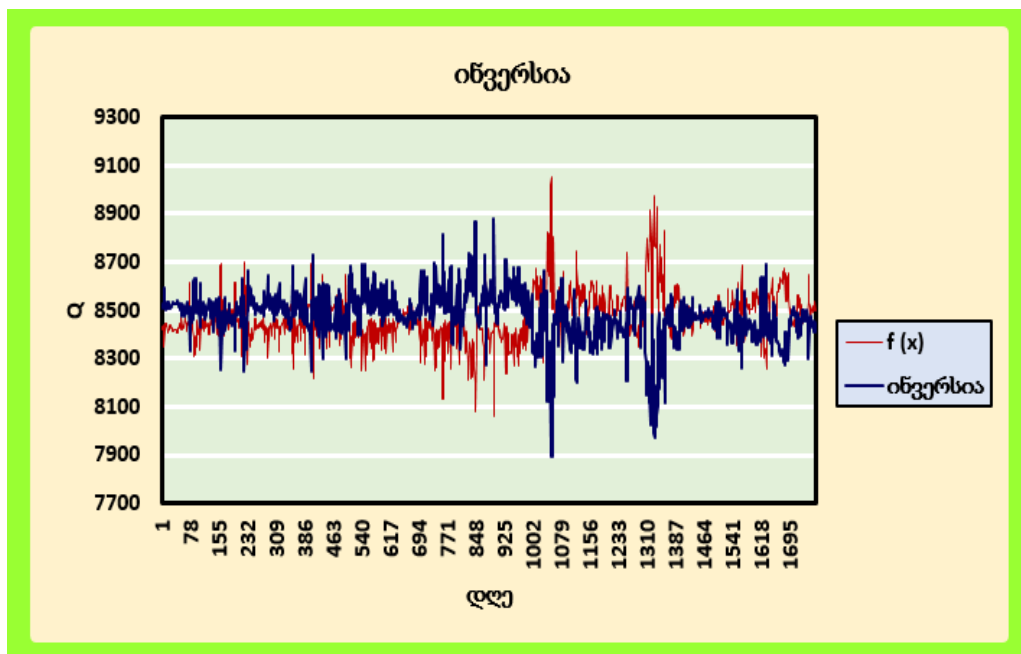
ცხრილი 12. სააწყისი მწკრივის პარამეტრები

ამონაკრების ოდენობა	$n = 1734$
სააწყისი მწკრივის მათემატიკური მოლოდინი	$\mu = 8473$
სააწყისი მწკრივის საშუალო კვადრატული გადახრა	$\sigma_x = 98,5$
დიფერენცრებული სააწყისი მწკრივის საშუალო კვადრატული გადახრა	$\sigma_y = 70,1$
მაქსიმალური დონე	$C = 8723$
მინიმალური დონე	$h = 8723$



ნახ. 37. ზედა და ქვედა დონეები, ამოვარდნების პროცესის ილუსტრაცია

შემდეგი ეტაპია საწყისი მწკრივის კორელაციური ფუნქციების დადგენა, რადგანაც ამოვარდნების დასადგენად საჭიროა კორელაციური ფუნქციების მნიშვნელობები.



ნახ. 38. თბოუნარიანების მწკრივის ინვერსია

ავტოკორელაციური ფუნქცია ახასიათებს კავშირს დისკრეტული τ ბიჯით წანაცვლებული იგივე კოპირებული მწკრივებს შორის:

$$\mathbf{R}(t) = \int_{\tau}^T \mathbf{X}(t)\mathbf{X}(T + \tau)dt. \quad (62)$$

ავტოკორელაციური კოეფიციენტი განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით [57]:

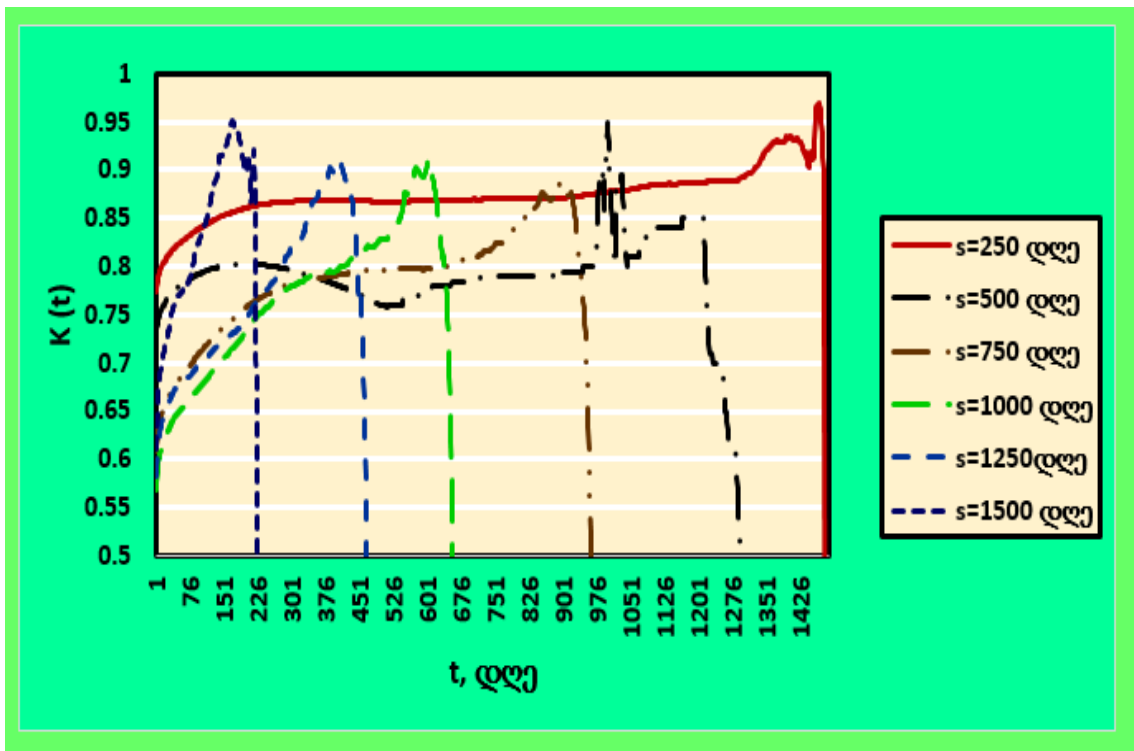
$$r(\tau) = \frac{\left(N - \tau \sum_{t=1}^{N-\tau} x_t x_{t+\tau} - \sum_{t=1}^{N-\tau} x_t \sum_{t=1}^{N-\tau} x_{t+\tau} \right)}{\sqrt{\left[\left(N - \tau \sum_{t=1}^{N-\tau} x_t^2 - \left(\sum_{t=1}^{N-\tau} x_t \right)^2 \right) \right] \left[\left(N - \tau \sum_{t=1}^{N-\tau} x_{t+\tau}^2 - \left(\sum_{t=1}^{N-\tau} x_{t+\tau} \right)^2 \right) \right]}}. \quad (63)$$

ავტოკორელაციური კოეფიციენტები ირხვევა „-1“-დან „+1“-მდე. ფეხნერის კავშირის თვისობრივი მახასიათებელი იცვლება: თუ [-0,9;-1] გვაქვს უკუძლიერი კავშირი; [-0,7;-0,9] - უკუძალი კავშირი; [-0,5;-0,7] - შესამჩნევი უკუკავშირი; [-0,3;-0,5] - ზომიერი უკუკავშირი; [-0,1;-0,3] - სუსტი უკუკავშირი; 0-ია დროს კავშირი არ არის; [0,1;0,3]- სუსტი პირდაპირი კავშირი; [0,3;0,5] - ზომიერი პირდაპირი კავშირი; [0,5;0,7] - შესამჩნევი პირდაპირი კავშირი; [0,7;0,9] - მაღალი პირდაპირი კავშირი; [0,9;1] - პირდაპირი ძლიერი კავშირი [57].

ამგვარად გამოვიყენოთ EXCEL-ში სმბოლო CORREL და ავაგოთ ავტოკორელაციური ფუნქციები 250 დღის ბიჯით (ნახ. 39).

ცხადია, რომ ავტოკორელაციური ფუნქციების დინამიკური ტენდენციის ამ ფუნქციების ანალიზი რთულია. ჩვენს მიერ თითქმის ვერ მოიძებნა ასეთი სახის მრუდები, თუმცა მოპოვებულია მხოლოდ ორი შემთხვევა (ნახ. 40) [58]. ეს საკითხი კერძო ფინანსური პროცესია, ხოლო ერთ-ერთ ნაშრომში [59] მოყვანილია ორი $S_1(t)$ და $S_2(t)$ სიგნალი ნახ.41-ზე. $S_1(t)$ სიგნალის წანაცვლებისას ($\tau > 0$), კორელაციური ფუნქცია ჯერ იზრდება, ხოლო შემდეგ ეცემა ნულამდე ($\tau = T$), ხოლო შედეგად მიიღება ასიმეტრიული ფუნქცია.

რადგანაც ანალიზი გართულებულია, ამიტომ შემდგომში განვიხილოთ ფორმალური ანალიზი, და კერძოდ გამოვიყვანოთ ავტოკორელაციური კოეფიციენტების მნიშვნელობები საწყის $t = 0$ -ში.

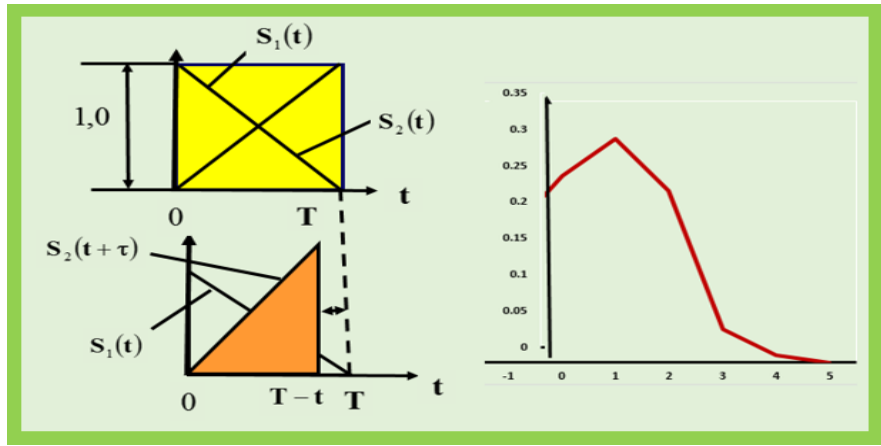


ნახ. 39. ავტოკორელაციური ფუნქციები 250 დღე ბიჯით

რადგანაც, დიფერენციალური ფუნქცია ნულში ტოლია $\sigma_y = 70.1$, ამიტომ პროპორციულად დავადგინოთ საშუალო გადახრის მნიშვნელობები ბიჯით და მივიღებთ (ცხრილი 13, ნახ. 42).



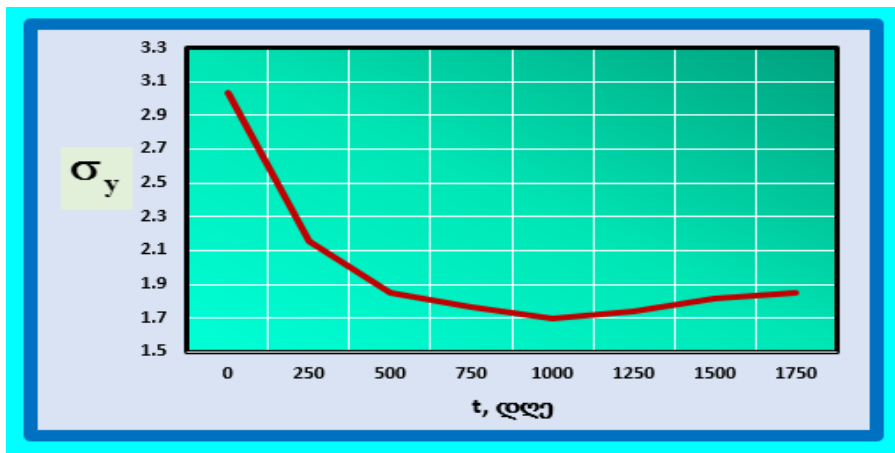
ნახ. 40. ავტოკორელაციური ფუნქციის მაგალითი



ნახ. 41. კორელაციური ფუნქციის აგება: 1. სიგნალების საწყისი მდგომარეობა; 2. $S_1(t)$ სიგნალის τ წანაცვლება; 3. კორელაციური ფუნქცია

ცხრილი 13. პროპორციული საშუალო გადახრის მნიშვნელობები

t , დღე	σ_y	$n(C_{Max})$
1	70.1	0.00183
250	54.23	0.001416
500	47.19	0.001232
750	42.64	0.001113
1000	40.35	0.001054
1250	40.88	0.001067
1500	43.05	0.001124

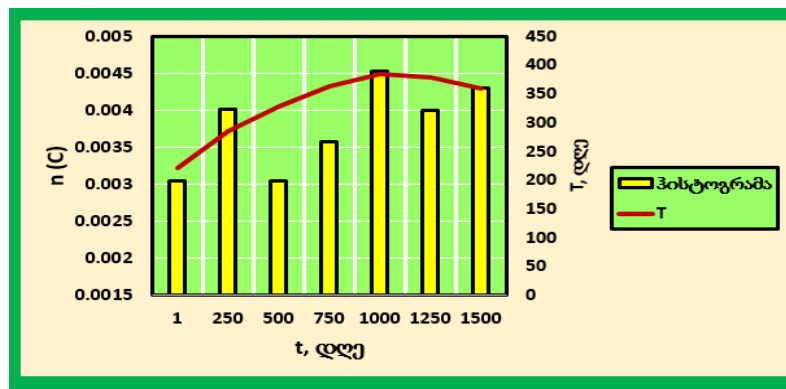


ნახ. 42. დიფერენციალური მჭკრივის პროპორციული საშუალო გადახრის მნიშვნელობები

შესაბამისი გაანგარიშებით, ვლებულობთ ზედა დონის ამოვარდნების რიცხვს $n(C)$ რაოდენობას და ამოვარდნების $T = 1/n$ მომენტებს (ცხრილი 14, ნახ. 43).

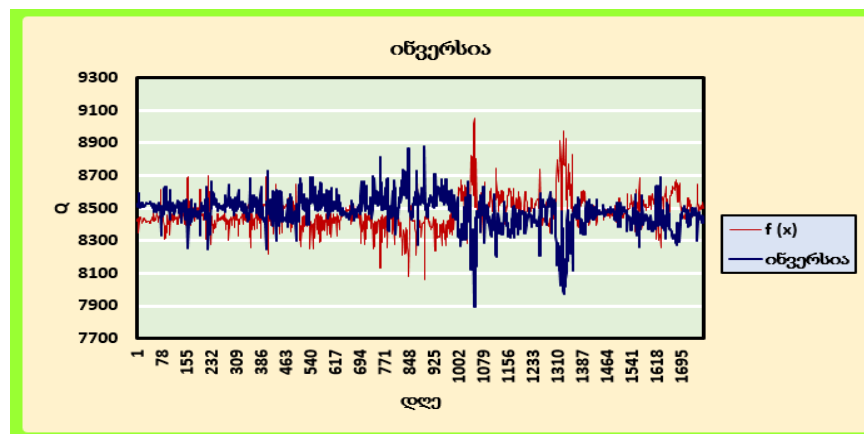
ცხრილი 14. თბოუნარიანობის შემთხვევითი მწკრივის ზედა დონის ალბათური მახასიათებლები

t, დღე	σ_y	ამოვარდნების რიცხვი n(C)	ამოვარდნების მომენტები, დღე $T = 1/n$
1	70.1	0.0045	221
250	54.23	0.0035	286
500	47.19	0.0030	328
750	42.64	0.0028	363
1000	40.35	0.0026	384
1250	40.88	0.0026	379
1500	43.05	0.0028	360



ნახ. 43. ამოვარდნების $n(C)$ რაოდენობისა და ამოვარდნების $T = 1/n$ მომენტების დიაგრამა და გრაფიკი

გადავიდეთ ამოვარდნების (ქვევიდან - ზევით) რაოდენობის $n(C_{Min})$ განსაზღვრის მეთოდზე და შესაბამისი გაანგარიშებაზე. ნახ. 44-ზე ნაჩვენებია თბოუნარიანობის საწყისი და ინვერსიის გრაფიკები.



ნახ. 44. თბოუნარიანობის საწყისი და ინვერსიის გრაფიკები

ჩვენს შემთხვევაში, შესაბამისი გაანგარიშებით, ვღებულობთ ქვედა დონის ამოვარდნების რიცხვის $n(h)$ რაოდენობას და ამოვარდნების $T=1/n$ მომენტებს (ცხრილი 15, ნახ. 45) [60,61].

$$n(h) = \frac{1}{2\pi\sigma} \exp\left[-\frac{(-h+m)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (64)$$

ამ შემთხვევაში, ანალოგიურად, ინვერსიის მწკრივისას, შესაბამისად მივიღებთ:

ცხრილი 15. ამოვარდნების (ქვევიდან - ზევით) რიცხვის $n(h)$ რაოდენობა

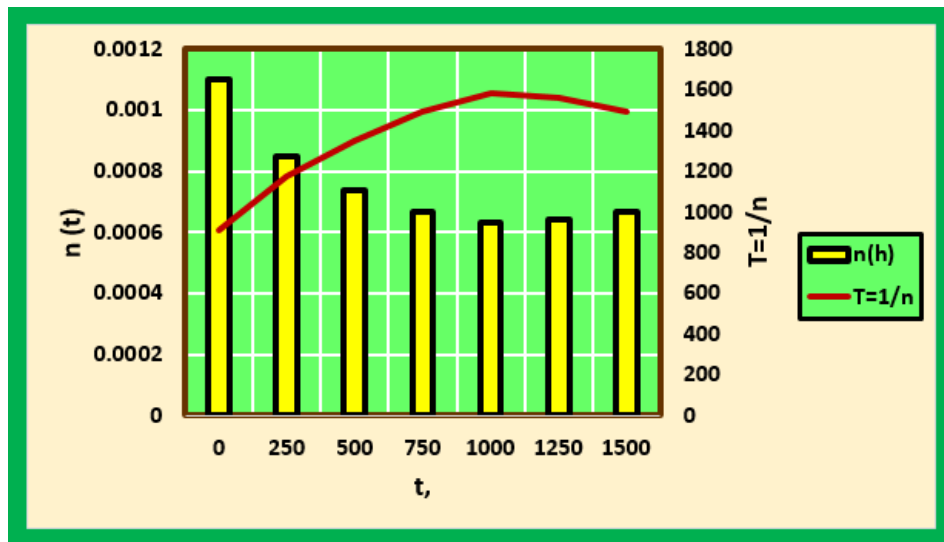
t, დღე	σ_y	ამოვარდნების რიცხვი $n(h)$	ამოვარდნების მომენტები, დღე $T = 1/n$
1	70.1	0.00110	912
250	54.23	0.00085	1179
500	47.19	0.00074	1355
750	42.64	0.00067	1499
1000	40.35	0.00063	1584
1250	40.88	0.00064	1564
1500	43.05	0.00067	1485

ამგვარად, შეიძლება შემდეგი დასკვნების მიღება:

- თბოუნარიანობის შემთხვევითი მწკრივი წარმოადგენს სტაციონარულს და ერგოდიულს;

- კორელაციური ფუნქციის გაანგარიშების შედეგად მიღებულია, რომ ავტოკორელაციური ნორმირებული კოეფიციენტი არის $0,6 \div 0,7$, რაც არის ზომიერი პირდაპირი კორელაციური კავშირი;

- რთული გარდაქმნის გამო, შეიძლება მარტივი, ჩვენს მიერ, შემუშავებული მეთოდი. ამ მეთოდის საფუძველია საწყისი მწკრივის ინვერსია, ხოლო მისი ანალიზის შედეგად შესაძლოა არსებული მათემატიკური თეორიის აპარატის გამოყენება;



ნახ. 45. თბოუნარიანობის შემთხვევითი მწკრივის ზედა დონის ალბათური მახასიათებლები

თავი 4. აჭარის მაგისტრალური გაზსადენის სტოქსტიკური პროცესის ანალიზი

4.1. აჭარის მაგისტრალური გაზსადენის შიგა წნევის სტოქსტიკური მწკრივის სტატისტიკური მახასიათებლების დადგენა

განვიხილოთ შპს „სოკარ ჯორჯია გაზ“-ის კუთვნილი აჭარის მაგისტრალური გაზსადენი, რომლის სიგრძეა $L = 28$ კმ, $D = 500$ მმ. მონაცემები განხილულია შპს „სოკარ ჯორჯია გაზ“-ის სერვის ცენტრის ცხრილში (ნახ.46).

Periodic History: გვარა														
Uploaded: 2/11/2020 4:08:58 PM														
რევიონი: აჭარა, სერვის ცენტრი: ქობულეთი, უბანი: ქობულეთი, აღწერა: საკონტროლო 999, აღრიცხვის წერტილი: MP2350460872														
	Date	Time	კორექტ. ხარჯი	კორექტ. ჩვენება	კორექტ. ხარჯი (მოლიანი)	კორექტ. ჩვენება (მოლიანი)	შრიც. ხარჯი	შრიც. ჩვენება	შრიც. ხარჯი (მოლიანი)	შრიც. ჩვენება (მოლიანი)	წნევა	ტემპ.	კუმ. კოეფიცი.	კორექტ. კოეფიცი.
1	2/10/2020	11:00:00	33606.53	168743345.72	33606.53	168743345.72	2780.00	15499530.00	2780.00	15499530.00	11.8100	7.2100	0.9713	12.5480
2	2/10/2020	10:00:00	29797.36	168709739.19	29797.36	168709739.19	2310.00	15496750.00	2310.00	15496750.00	12.4900	6.7700	0.9694	13.3148
3	2/10/2020	09:00:00	23971.91	168679941.82	23971.91	168679941.82	1750.00	15494440.00	1750.00	15494440.00	13.0200	6.3400	0.9678	13.9215
4	2/10/2020	08:00:00	17652.95	168655969.91	17652.95	168655969.91	1250.00	15492690.00	1250.00	15492690.00	13.1500	6.2400	0.9674	14.0796
5	2/10/2020	07:00:00	15578.32	168638316.96	15578.32	168638316.96	1110.00	15491440.00	1110.00	15491440.00	12.9900	6.2400	0.9678	13.8937

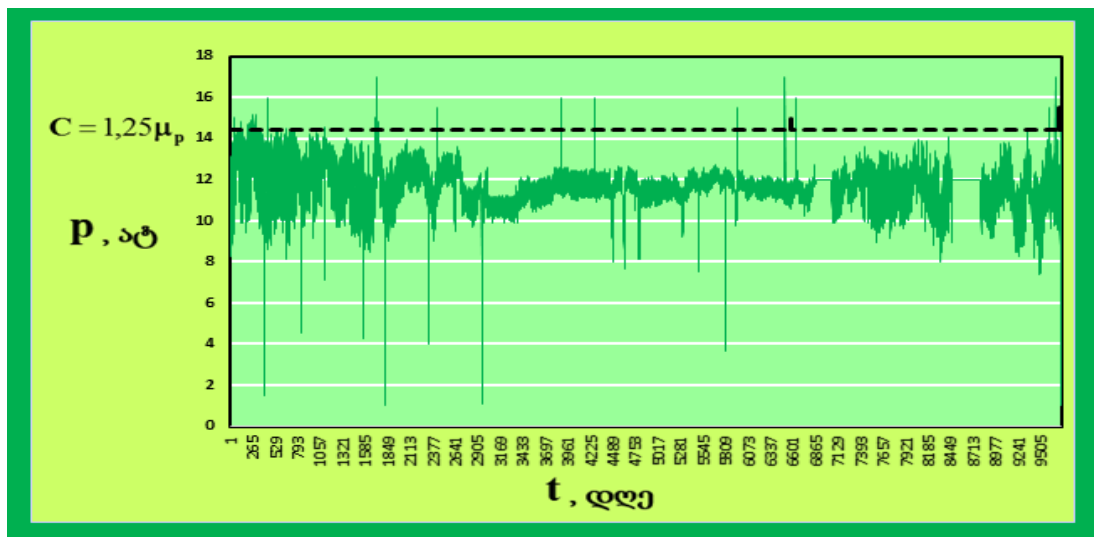
ნახ. 46. ქობულეთი, უბანი: ქობულეთი, აღწერა: საკონტროლო 999, აღრიცხვის წერტილი: MP2350460872

განვიხილოთ აჭარის გვარა-სალიბაურის 500 მმ-იანი მიწისქვეშა ფოლადის მაღალი წნევის გაზსადენი. აჭარის ავტონომიური რესპუბლიკის ბუნებრივი გაზის მკვებავი გაზსადენის დაერთების ადგილია ქობულეთის მუნიციპალიტეტის სოფელი გვარა. დაერთების ადგილას მოწყობილია რედუცირებისა და აღრიცხვის კვანძი. გაზსადენის ფაქტობრივი სიგრძე სოფელი გვარადან ხელვაჩაურის მუნიციპალიტეტის სოფელ სალიბაურამდე 36000 მეტრია, მიწისქვეშა და მიწისზედა, მაღალი წნევის $D = 500$ მმ.

გაზსადენის პერიმეტრზე რამდენიმე დაერთებაა. მათ შორის ქალაქ ბათუმის მკვებავი გაზსადენი, რომელიც გრძელდება ხელვაჩაურის მუნიციპალიტეტის მიმართულებითაც, ქალაქ ქობულეთის მკვებავი გაზსადენი, ხუთი გაზგასამართი სადგური, ორი სამრეწველო ობიექტი, ჩვიდმეტი დაერთებით კი ბუნებრივი გაზი მიეწოდება ქობულეთის და ხელვაჩაურის მუნიციპალიტეტის 26 სოფელს.

აღნიშნულ გაზსადენზე დაერთებულია, მაგრამ ამ ეტაპისათვის ექსპლუატაციაში არაა შესული სალიბაური-ხიჭაურას (შუახევი) 65000 მეტრი სიგრძის მაღალი წნევის $D = 300$ მმ მიწისქვეშა და მიწისზედა გაზსადენი, რომლის გაგრძელებაზე მიმდინარებს ხიჭაური-ხულოს (გოდერძის უღელტეხილი) იგივე პარამეტრების გაზსადენის მშენებლობა. გაზსადენი შეერთდება ადიგენი-ხულოს (გოდერძის უღელტეხილთან). სამუშაოების დასრულებისა და ექსპლუატაციაში შესვლის შემდგომ აჭარის ავტონომიური რესპუბლიკის უწყვეტი გაზმომარაგება კიდევ უფრო სტაბილური გახდება.

ჩვენს მიერ განიხილება ნატურული მონაცემები, კერძოდ შიგა წნევის (ატ) საათური მწკრივი (ნახ. 47).

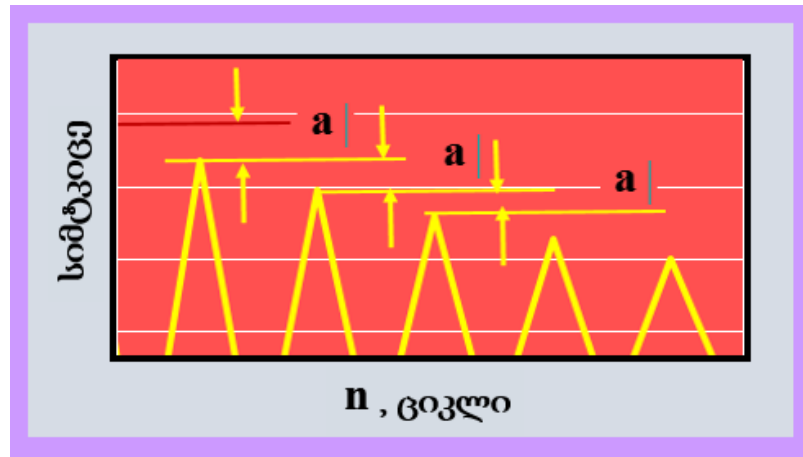


ნახ. 47. მაგისტრალურ გაზსადენში შიგა წნევის დინამიკა

ამგვარად, ჩავატაროთ მაგისტრალურ გაზსადენში შიგა წნევის დინამიკური მწკრივის სტოქასტიკური მახასიათებლების დადგენა [62-72].

ამ თავის მიზანი შემდეგია: მაგისტრალურ გაზსადენები დაპროექტებულია ისეთნაირად, რომ პროცესის ნორმალური ექსპლუატაციისას გვაქვს უსაფრთხო მუშაობა. შიგა წნევა p , აგრეთვე მისი გამოცდის წნევა $1,1p \div 1,25p$ - უსაფრთხოა და არ იწვევს მილსადენის გაგლეჯას. გაზსადენის მუშაობისას ხშირად ხდება ჩართვა-ამორთვის პროცედურები და სხვა ფლუქტიაციები. ამიტომ მცირე ციკლიური პროცესების გამო, ხდება მილსადენის ლითონის დაღლილობა. პრაქტიკაში ცნობილია, რომ ნორმალური მუშაობისას (ანუ p საექსპლუატაციო წნევაზე), მაინც

ხდება მილსადენის გაგლეჯა. ამიტომ აუცილებელია წნევის დროის დინამიკური მწკრივების ამოვარდნების ოდენობის დადგენა (ნახ. 48).



ნახ. 48. მაგისტრალური გაზსადენის შიგა წნევის მცირეციკლური დატვირთვის, სიმტკიცის დინამიკის ინტერპრეტაცია

პირველ რიგში ვიანგარიშეთ შიგა წნევის მწკრივის სტოქასტიკური პარამეტრები (ცხრილი 16). ჩვენს მიერ მოძიებულია მონაცემები შიგა წნევის მწკრივის საათური პარამეტრები, კერძოდ წნევის მნიშვნელობები (ატ).

ცხრილი 16. შიგა საათური წნევის მწკრივის პარამეტრები

ამონაკრების ოდენობა, N	9743
მათემატიკური მოლოდინი, μ , ატ	11.5
საშუალოკვადრატული გადახრა, σ_p , ატ	1.31
ამონაკრების მაქსიმუმი, p_{max} , ატ	15
ამონაკრების მინიმუმი, p_{min} , ატ	1,0

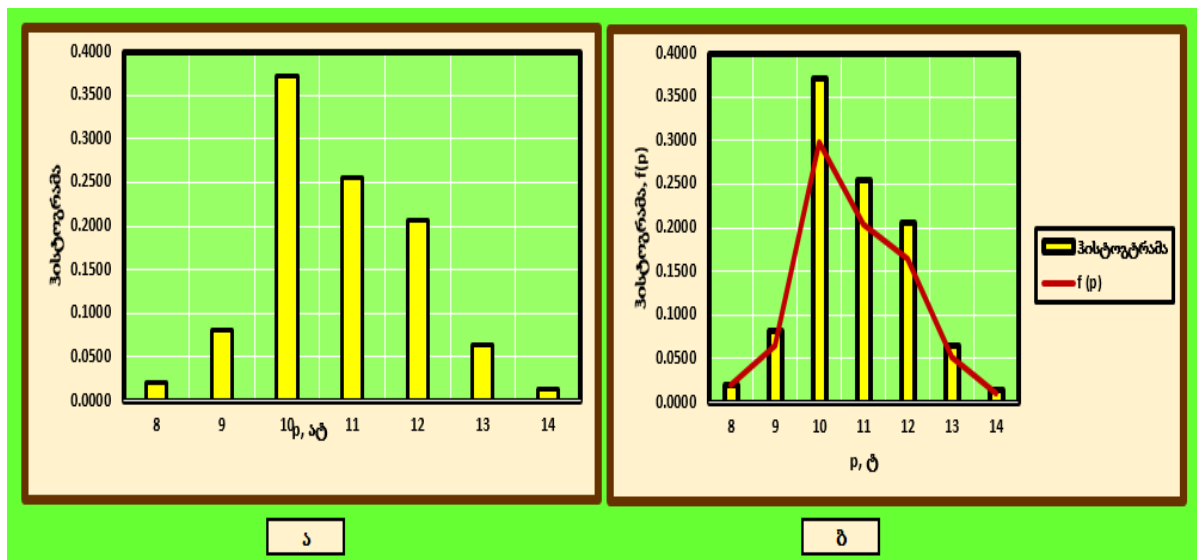
განვიხილოთ შიგა წნევის მწკრივის სტოქასტიკური პარამეტრების დადგენა, ხოლო საწყისი მწკრივის დიფერენციალური ფუნქცია განისაზღვრება რიცხვითი მეთოდით, კერძოდ შემდეგი გამოსახულებიდან $f'(x) = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$.

ავაგოთ აღნიშნული მწკრივის ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია (ცხრილი 17, ნახ. 49) [73].

ცხრილი 17. მაგისტრალურ გაზსადენში შიგა წნევის მწკრივის ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია

წნევა, p , ატ	ჰისტოგრამა	$f(p)$
8	0.0000	0.0200
9	0.0813	0.0650
10	0.3712	0.2970
11	0.2556	0.2045
12	0.2060	0.1648
13	0.0647	0.0517
14	0.0133	0.0107

როგორც ჩანს, ჰისტოგრამა აღარ ექვემდებარება ნორმალურ კანონს (ნახ. 49, ა):



ნახ. 49. შიგა წნევის სტოქასტიკური მწკრივის მახასიათებლები: ა. ჰისტოგრამა; ბ. ერთობლივი ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია

ანალიზის შემდეგ დადგინდა, რომ შიგა წნევის მწკრივი ექვემდებარება განაწილების აპროქსიმაციის რელეის კანონს (ნახ. 4 ბ) [74,75]:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{x}{B^2} e^{-\frac{x^2}{2B^2}}, & x \geq 0 \end{cases} \quad (65)$$

სადაც B არის რელეის პარამეტრი.

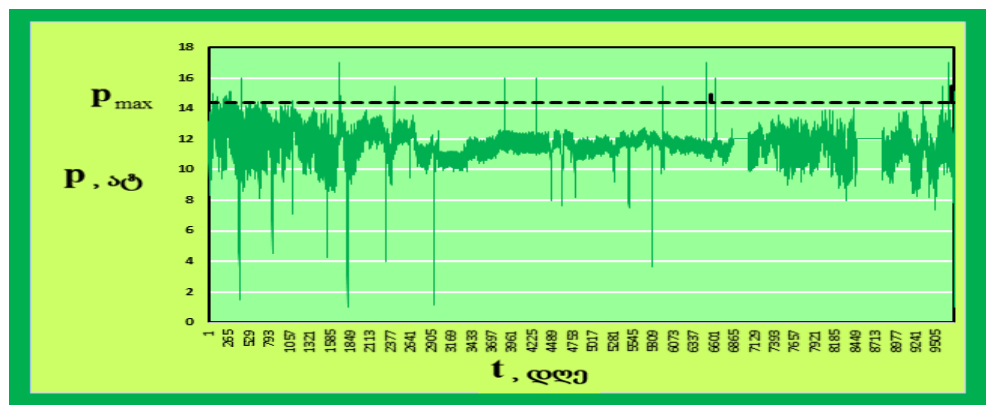
4.2. აჭარის მაგისტრალური გაზსადენის შიგა წნევის სტოქასტიკური მწკრივის ამოვარდნების რაოდენობის დადგენა

განვიხილოთ შიგა წნევის მწკრივის ამოვარდნების რიცხვის დადგენა (ნახ. 50): განვსაზღვროთ ამოვარდნების რიცხვის ოდენობა, როდესაც დონედ ჩათვლილია $C = 1,25\mu$.

რადგანაც შიგა წნევა განაწილებულის რელეის კანონით, ამიტომ გამოვიყვანოთ ამოვარდნების რიცხვის ოდენობის ფორმულა, კერძოდ რელეის ალბათობის განაწილების სიმკვრივის რელეის კანონის ფორმულა ტოლია:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{x}{B^2} e^{-\frac{x^2}{2B^2}}, & x \geq 0 \end{cases} \quad (66)$$

ამოვარდნების რიცხვის ოდენობის ფორმულა შემდეგია:



ნახ. 50. შიგა წნევის მწკრივის ამოვარდნების რიცხვის განსაზღვრის ილუსტრაცია

$$n(c) = \int_0^{\infty} \omega(C, V) V dV, \quad (67)$$

სდაც $\omega(C, V)$ არის საწყისი $f_p(p)$ მწკრივის ალბათობის განაწილების სიმკვრივისა და დიფერენციალური მწკრივის $f_V(V)$ -ს ერთობლივი

$$\omega(C, V) = f_p(p) f_V(V) \quad (68)$$

ამგვარად

$$\mathbf{n}(\mathbf{c}) = \int_0^{\infty} \mathbf{f}_p(\mathbf{p}) \mathbf{f}_v(\mathbf{V}) \mathbf{V} d\mathbf{V} = \mathbf{f}_p(\mathbf{C}) \int_0^{\infty} \mathbf{f}_v(\mathbf{V}) \mathbf{V} d\mathbf{v} \quad (69)$$

სადაც

$$\mathbf{f}_p(\mathbf{C}) = \left[\frac{1}{\mathbf{B}^2} e^{-\frac{\mathbf{p}^2}{2\mathbf{B}^2}} \right]_{\mathbf{p}=\mathbf{C}} = \frac{1}{\mathbf{B}^2} e^{-\frac{\mathbf{c}^2}{2\mathbf{B}^2}} \quad (70)$$

გავაწარმოთ საწყისი ფუნქცია. გვექნება:

$$\mathbf{f}_v(\mathbf{V}) = \left(\frac{1}{\mathbf{B}^2} e^{-\frac{\mathbf{p}^2}{2\mathbf{B}^2}} \right)' = \frac{1}{\mathbf{B}^2} \left(-\frac{1}{2\mathbf{B}^2} \right) 2\mathbf{V} e^{-\frac{\mathbf{p}^2}{2\mathbf{B}^2}} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{B}^4} e^{-\frac{\mathbf{p}^2}{2\mathbf{B}^2}} \quad (71)$$

მივიღებთ;

$$\mathbf{n}(\mathbf{c}) = \frac{1}{\mathbf{B}^2} \frac{1}{\mathbf{B}^4} e^{-\frac{\mathbf{c}^2}{2\mathbf{B}^2}} \int_0^{\infty} \mathbf{V}^2 e^{-\frac{\mathbf{v}^2}{2\mathbf{B}^2}} d\mathbf{V} \quad (72)$$

რადგანაც გვაქვს

$$\int_0^{\infty} \mathbf{x}^n e^{-ax^2} d\mathbf{x} = \int_{-\infty}^0 \mathbf{x}^n e^{-ax^2} d\mathbf{x} = \frac{(2k-1)!}{2^{k+1} a^k} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \quad (73)$$

ამიტომ

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} \mathbf{V}^2 e^{-\frac{\mathbf{v}^2}{2\mathbf{B}^2}} d\mathbf{V} &= \left| \begin{array}{l} \mathbf{n} = 2 \\ \mathbf{k} = -1 \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} \mathbf{n} = 2\mathbf{k} \\ \mathbf{a} = \frac{1}{\mathbf{B}^2} \end{array} \right| = \int_{-\infty}^0 \mathbf{V}^2 e^{-a\mathbf{V}^2} d\mathbf{V} = \left| \int_{-\infty}^0 \mathbf{x}^2 e^{-ax^2} d\mathbf{x} \right| = \frac{1}{2a} \sqrt{\frac{\pi}{a}} = \frac{1}{2a} \sqrt{\frac{\pi}{a}} = \\ &= \frac{\mathbf{B}^2}{2a} \sqrt{\frac{\pi}{a}} = \frac{\mathbf{B}^2}{2} \sqrt{\pi \mathbf{B}^2} = \frac{\mathbf{B}^3}{2} \sqrt{\pi} \end{aligned} \quad (74)$$

ამგვარად, საბოლოოდ გვექნება;

$$\mathbf{n}(\mathbf{c}) = \frac{\sqrt{\pi}}{\mathbf{B}^6} \frac{\mathbf{B}^3}{2} e^{-\frac{\mathbf{c}^2}{2\mathbf{B}^2}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2\mathbf{B}^3} e^{-\frac{\mathbf{c}^2}{2\mathbf{B}^2}} \quad (75)$$

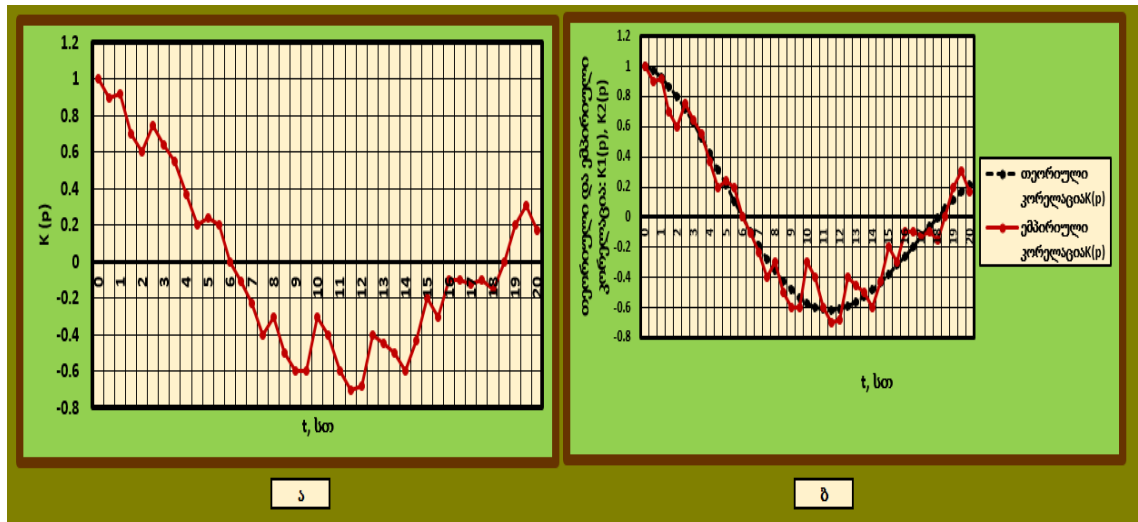
შემდეგი ეტაპია შიგა წნევის მწკრივის კორელაციური კავშირების დადგენა. ნახ. 51ა-ზე მოყვანილია ემპირიული ნორმირებული ავტოკორელაციური ფუნქცია, ხოლო ნახ. 51ბ-ზე, შედარებისათვის, მოყვნილია ერთობლივი ემპირიული და თეორიული ავტოკორელაციური ფუნქციები.

ბუნებრივია, რომ მისაღებია ნორმირებული ავტოკორელაციური ფუნქციის შემდეგი სახე (ნახ. 51ბ):

$$\mathbf{K}(\mathbf{t}) = e^{-\alpha \mathbf{t}^2} \text{Cos} \omega_0 \mathbf{t}, \text{ სადაც } \omega_0 = \frac{2\pi}{2\mathbf{T}} \quad (76)$$

ნორმირების შემდეგ გვაქვს:

$$K(x) = \sigma_x^2 e^{-at} \cos \omega_0 t. \quad (77)$$

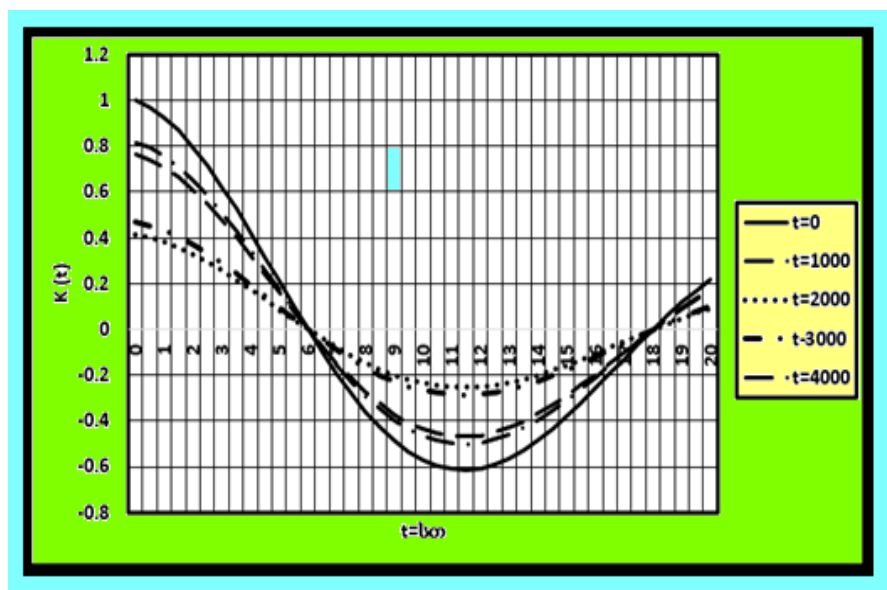


ნახ. 51. შიგა წნევის მწკრივის ნორმირებული ავტოკორელაციური ფუნქცია:
 ა. ემპირიული ავტოკორელაციური ფუნქცია; ბ. ემპირიული და თეორიული
 ავტოკორელაციური ფუნქციები

ნახ. 52-ზე მოყვანილია ნორმირებული ავტოკორელაციური ფუნქციების
 ანსამბლი, სხვადასხვა ბიჯისათვის.

$$K(x) = \sigma_x^2 e^{-at} \cos \omega_0 t \quad (78)$$

შესაბამისი გაანგარიშების შემდეგ მივიღებთ (ცხრილი 18).



ნახ. 52. ნორმირებული ავტოკორელაციური ფუნქციების ანსამბლი ნორმირების
 შემდეგ

ცხრილი 18. შიგა წნევის ამოვარდნების მახასიათებლები

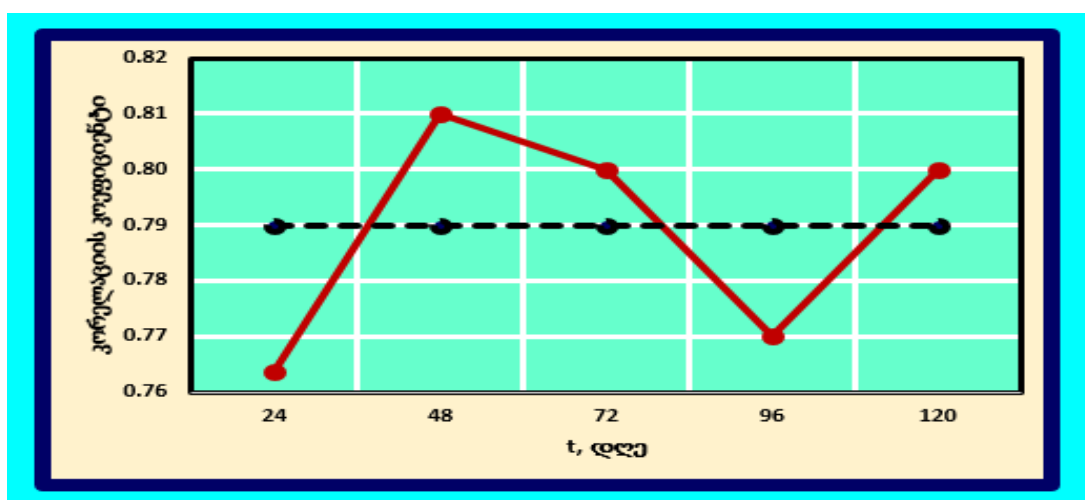
დიფერენციალური ფუნქციის საშუალო გადახრა, σ_v , ატ	0.69
წნევის დონე, $= 1,25p_{Max}$, ატ	14.4
ამოვარდნების რიცხვი, $n(C)$	0.000335
ამოვარდნების დროის მომენტები, T	119 დღე \approx 5 დღე

ნორმირების შემდეგ, ვლემულობთ შიგა წნევის ამოვარდნების რაოდენობა $n(C)$ სხვადასხვა ბიჯისათვის (ცხრილი 19).

ცხრილი 19. შიგა წნევის ამოვარდნების რაოდენობა $n(C)$ სხვადასხვა ბიჯისათვის

დიფერენციალური ფუნქციის საშუალო გადახრა, σ_v , ატ	რელეის პარამეტრი, B	ამოვარდნების რიცხვი,	ამოვარდნების დროის მომენტები, T , სთ	ამოვარდნების დროის მომენტები, T თვე
1	9.1700	0.00033	2995	4.160
0.764	7.0059	0.00031	3216	4.466
0.413	3.7872	0.00271	368	0.512
0.467	4.2824	0.00144	695	0.965
0.817	7.4919	0.00025	3955	5.493

შესაბამისად, ნახ. 53-ზე მოყვანილია ამოვარდნების დროის T მომენტების დინამიკა.



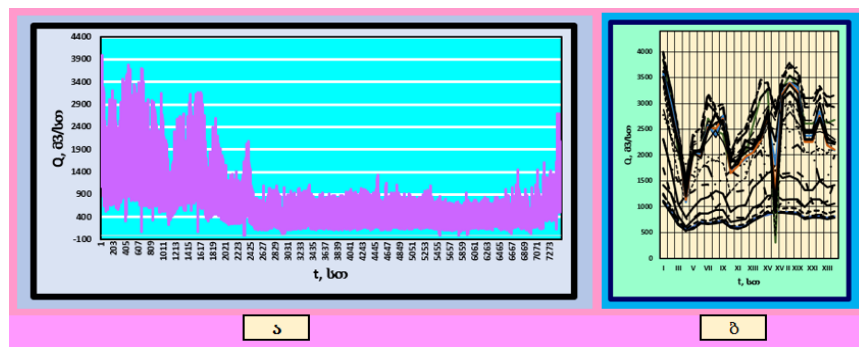
ნახ. 53. ამოვარდნების დროის T მომენტების დინამიკა ($\mu = 3,12$ თვე)

4.3. აჭარის მაგისტრალურ გაზსადენში ბუნებრივი გაზის ხარჯის დინამიკური მწკრივის სტოქასტიკური მახასიათებლების დადგენა

ჩვენს მოვიძიეთ მონაცემები ბუნებრივი გაზის მწკრივის საათური პარამეტრები, კერძოდ ხარჯი ($\text{მ}^3/\text{სთ}$) (ნახ. 54).

განვიხილოთ გაზსადენის ხარჯის სტოქასტიკური მწკრივის სტოქასტიკური მახასიათებლები. ერთი თვის განმავლობაში. ნახ. 55-ზე მოყვანილია საათობრივი ხარჯის გრაფიკები. დღიური ბუნებრივი გაზის მოხმარები საათების მიხედვით ტიპურია.

სტატისტიკური ანალიზის შემდეგ მიღებულია ბუნებრივი გაზის ხარჯის მწკრივის ჰისტოგრამა და შესაბამისი ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია, კერძოდ რელეის განაწილება (ცხრილი 20 და 21, ნახ. 55): ამგვარად, მიღებულია რელეის განაწილების **B** პარამეტრი და ამავე განაწილების საშუალოკვადრატული გადახრა σ_R



ნახ. 54. ა. ბუნებრივი გაზის მწკრივის ხარჯი ($\text{მ}^3/\text{სთ}$) დინამიკა; ბ. დღიური ბუნებრივი გაზის მოხმარები საათების მიხედვით ტიპური გრაფიკები

ცხრილი 20. ბუნებრივი გაზის ხარჯის მწკრივის სტატისტიკური მახასიათებლები

ამონაკრების ოდენობა, N	6912
მათემატიკური მოლოდინი, μ	903
საშუალოკვადრატული გადახრა σ_V	697
μ_{Min}	0
μ_{Max}	4 000
რელეის განაწილების პარამეტრი B	722,4
რელეის განაწილების პარამეტრი σ_R	839,4

ცხრილი 21. მაგისტრალურ გაზსადენში ბუნებრივი გაზის ხარჯის მწკრივის ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია

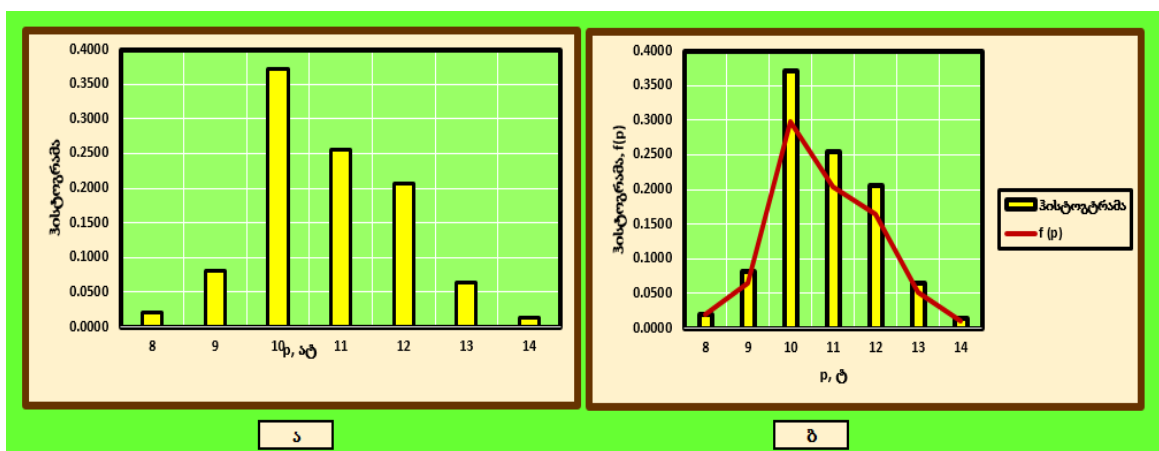
ხარჯი Q, მ ³ /სთ	ჰისტოგრამა	f(Q)
200	0.2089	0.1476
600	0.3845	0.3256
1000	0.2053	0.294
1400	0.0551	0.164
1800	0.044	0.062
2000	0.0443	0.0332
2600	0.0282	0.0032
3000	0.0179	0.0004
3400	0.0094	0
3800	0.0023	0

ბუნებრივი გაზის ხარჯის მწკრივის ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია - რელეის კანონია:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{x}{B^2} e^{-\frac{x^2}{2B^2}}, & x \geq 0 \end{cases} \quad (79)$$

სადაც **B** არის რელეის განაწილების პარამეტრი.

განსაზღვროთ რელეის განაწილების მათემატიკური მოლოდონი, მართლაც (ნახ. 55) :



ნახ. 55. ბუნებრივი გაზის ხარჯის მწკრივის ჰისტოგრამა და შესაბამისი ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქცია

$$\begin{aligned} \mu &= \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{x} f(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \int_0^{\infty} \mathbf{x} \frac{\mathbf{x}}{\mathbf{B}^2} e^{-\frac{\mathbf{x}^2}{\mathbf{B}^2}} d\mathbf{x} = \int_0^{\infty} \frac{\mathbf{x}^2}{\mathbf{B}^2} e^{-\frac{\mathbf{x}^2}{\mathbf{B}^2}} d\mathbf{x} = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{u} = \frac{\mathbf{x}}{\mathbf{B}} \Rightarrow \mathbf{x} = \mathbf{B}\mathbf{u}; \\ d\mathbf{u} = \frac{d\mathbf{x}}{\mathbf{B}} \Rightarrow d\mathbf{x} = \mathbf{B}d\mathbf{u}; \\ \mathbf{u}(0) = 0, \mathbf{u}(\infty) = \infty \end{array} \right\} = \int_0^{\infty} \mathbf{u}^2 e^{-\frac{\mathbf{u}^2}{2}} \mathbf{B} d\mathbf{u} = \\ &= \sqrt{2\pi\mathbf{B}} \int_0^{\infty} \mathbf{u}^2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\mathbf{u}^2}{2}} d\mathbf{u} = \sqrt{2\pi\mathbf{B}} \int_0^{\infty} \mathbf{u}^2 \varphi(\mathbf{u}) d\mathbf{u} = \sqrt{2\pi\mathbf{B}} \frac{1}{2} = \frac{\sqrt{2\pi}}{2} \mathbf{B} \Rightarrow \mu. \end{aligned} \quad (80)$$

განაწილების დისპერსია ტოლია:

$$\begin{aligned} D(\mathbf{x}) &= \int_{-\infty}^{\infty} (\mathbf{x} - \mu)^2 f(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \int_0^{\infty} \left(\mathbf{x} - \frac{\sigma\sqrt{2\pi}}{2} \right)^2 \frac{\mathbf{x}}{\sigma^2} e^{-\frac{\mathbf{x}^2}{2\sigma^2}} d\mathbf{x} = \lim_{b \rightarrow \infty} \int_0^b \left(\mathbf{x} - \frac{\sigma\sqrt{2\pi}}{2} \right)^2 \frac{\mathbf{x}}{\sigma^2} e^{-\frac{\mathbf{x}^2}{2\sigma^2}} d\mathbf{x} = \\ &= \left| \begin{array}{l} \mathbf{u} = \left(\mathbf{x} - \frac{\sigma\sqrt{2\pi}}{2} \right)^2 \Rightarrow d\mathbf{u} = 2 \left(\mathbf{x} - \frac{\sigma\sqrt{2\pi}}{2} \right) d\mathbf{x}; \\ d\mathbf{v} = \frac{\mathbf{x}}{\sigma^2} e^{-\frac{\mathbf{x}^2}{2\sigma^2}} d\mathbf{x} \Rightarrow \mathbf{v} = -e^{-\frac{\mathbf{x}^2}{2\sigma^2}} \\ \int_0^b \mathbf{u} d\mathbf{v} = \mathbf{u}\mathbf{v} \Big|_0^b - \int_0^b \mathbf{v} d\mathbf{u} \end{array} \right| = \lim_{b \rightarrow \infty} \left[- \left(\mathbf{x} - \frac{\sigma\sqrt{2\pi}}{2} \right)^2 e^{-\frac{\mathbf{x}^2}{2\sigma^2}} \Big|_0^b + \int_0^b e^{-\frac{\mathbf{x}^2}{2\sigma^2}} 2 \left(\mathbf{x} - \frac{\sigma\sqrt{2\pi}}{2} \right) d\mathbf{x} \right] = \\ &= - \lim_{b \rightarrow \infty} \left[\left(\mathbf{x} - \frac{\sigma\sqrt{2\pi}}{2} \right)^2 e^{-\frac{\mathbf{x}^2}{2\sigma^2}} \Big|_0^b \right] + 2 \lim_{b \rightarrow \infty} \int_0^b \mathbf{x} e^{-\frac{\mathbf{x}^2}{2\sigma^2}} d\mathbf{x} - \sigma\sqrt{2\pi} \lim_{b \rightarrow \infty} \int_0^b e^{-\frac{\mathbf{x}^2}{2\sigma^2}} d\mathbf{x} = - \lim_{b \rightarrow \infty} \frac{\left(\frac{b - \sigma\sqrt{2\pi}}{2} \right)^2}{e^{\frac{b^2}{2\sigma^2}}} + \\ &+ \left(0 - \frac{\sigma\sqrt{2\pi}}{2} \right)^2 e^{-\frac{0^2}{2\sigma^2}} + 2 \int_0^{\infty} \mathbf{x} e^{-\frac{\mathbf{x}^2}{2\sigma^2}} d\mathbf{x} - \sigma\sqrt{2\pi} \int_0^{\infty} e^{-\frac{\mathbf{x}^2}{2\sigma^2}} d\mathbf{x} = - \lim_{b \rightarrow \infty} \frac{\left[\left(\frac{b - \sigma\sqrt{2\pi}}{2} \right)^2 \right]_b^1}{\left(e^{\frac{b^2}{2\sigma^2}} \right)_b} + \frac{\pi}{2} \sigma^2 + \\ &+ 2\sigma^2 \int_0^{\infty} \frac{\mathbf{x}}{\sigma^2} e^{-\frac{\mathbf{x}^2}{2\sigma^2}} d\mathbf{x} - 2\pi\sigma^2 \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\mathbf{x}^2}{2\sigma^2}} d\mathbf{x} = - \lim_{b \rightarrow \infty} \frac{2 \left(\frac{b - \sigma\sqrt{2\pi}}{2} \right)}{\frac{b}{\sigma^2} e^{\frac{b^2}{2\sigma^2}}} + \frac{\pi}{2} \sigma^2 + 2\sigma^2 \cdot 1 - 2\pi\sigma^2 \cdot \frac{1}{2} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -2\sigma^2 \lim_{b \rightarrow \infty} \frac{1 - \frac{\sigma\sqrt{2\pi}}{2b}}{\frac{b^2}{e^{2\sigma^2}}} + \frac{\pi}{2}\sigma^2 + 2\sigma^2 - \pi\sigma^2 = 2\sigma^2 \frac{1 - \frac{\sigma\sqrt{2\pi}}{2 \cdot \infty}}{\frac{\infty^2}{e^{2\sigma^2}}} + \frac{4 - \pi}{2}\sigma^2 = 2\sigma^2 \frac{1 - 0}{\infty} + \frac{4 - \pi}{2}\sigma^2 \\
&= 2\sigma^2 \cdot 0 + \frac{4 - \pi}{2}\sigma^2 = \frac{4 - \pi}{2}\sigma^2 \Rightarrow \mathbf{D} = \frac{4 - \pi}{2}\sigma^2
\end{aligned}
\tag{81}$$

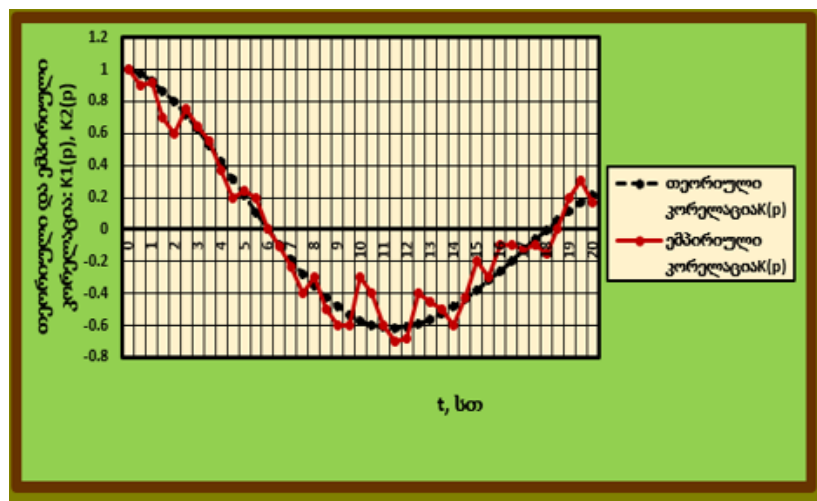
ამგვარად, საბოლოოდ გვექნება:

$$\left\{ \begin{aligned}
&\mu = \frac{\sqrt{2\pi}}{2} \mathbf{B}; \\
&\mathbf{D} = \frac{4 - \pi}{2} \mathbf{B}^2 \left(\sigma = \sqrt{\frac{4 - \pi}{2}} \mathbf{B} \right); \\
&\mathbf{B} = \frac{\sqrt{8 - 2\pi}}{2} \sigma
\end{aligned} \right.
\tag{82}$$

პარაგრაფის ბოლოს, ნახ. 56-ზე ნაჩვენებია ბუნებრივი ხარჯის მწკრივის ავტოკორელაციის ფუნქცია, თავისი კოეფიციენტები თვეების მიხედვით (ცხრილი 22).

ცხრილი 22. ბუნებრივი ხარჯის კორელაციის კოეფიციენტები, თვეების მიხედვით

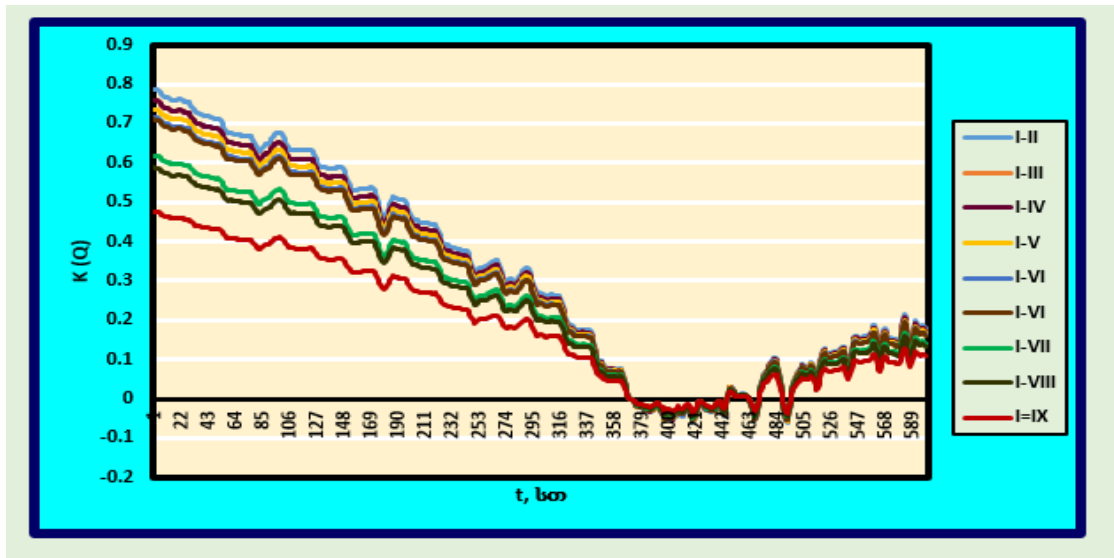
I-II	I-III	I-IV	I-V	I-VI	I-VI	I-VII	I-VIII	I-IX	I-X
0.7101	0.4762	0.5878	0.7167	0.7869	0.7585	0.7585	0.6183	0.7366	0.6943



ნახ. 56. ხარჯის მწკრივის ავტოკორელაცია

ცხადია, რომ კორელაციის კოეფიციენტის დიაპაზონია 0,45 ÷ 0,8 და საშუალოა 0,6833.

ნახ. 57-ზე მოყვანილია კორელაციური ფუნქციების ანსამბლი, თვეების მიხედვით:



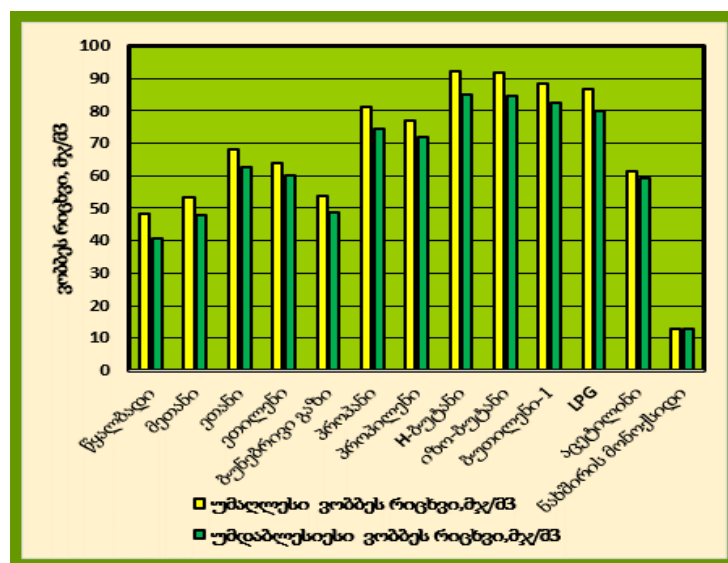
ნახ. 57. კორელაციური ფუნქციების ანსამბლი, თვეების მიხედვით

თავი 5. საქართველოში შემოსული ბუნებრივი გაზის ჩანცვლადობის ანალიზი და ვობბეს რიცხვის თვისებრივი დიაგრამის დადგენა

5.1. ზოგადი საწვავი აირების უმაღლესი და უმდაბლესი ვობბეს რიცხვების დადგენა

ცხრილ 23-ში და ნახ. 58-ზე ნაჩვენებია ზოგადი საწვავი აირების უმაღლესი და უმდაბლესი ვობბეს რიცხვების დიაგრამა.

გაზების ურთიერთჩანაცვლადობა არის თბურ მოწყობილობებში და ხელსაწყოებში მათი მდგრადი წვის შესაძლებლობა, გაზმოწყობილობების კონსტრუქციის ცვლილების გარეშე, ნომინალური თერმული ენერჯის შენარჩუნებისას. გაზგამომყენებელი მოწყობილობების მდგრადი მუშა რეჟიმი ხასიათდება სანთურების ცეცხლის ალის მოწყვეტისა და გადახტომის გარეშე მუშაობით, სრული წვისას, 100%-თან ახლოს. სანთურების ეს მუშაობა მიიღწევა თბოუნარიანობის მნიშვნელობის (დაწვის სითბოს) მუდმივობის შენარჩუნებით, ალის სიჩქარის გავრცელებისა და საწვავი გაზების სხვა მახასიათებლების შენარჩუნებისას.



ნახ. 58. ზოგადი საწვავი აირების უმაღლესი და უმდაბლესი ვობბეს რიცხვების დიაგრამა

ცხრილი 23. ზოგადი საწვავი აირების ვობბეს რიცხვი

კომპონენტი	უმალესი ვობბეს რიცხვი,მჯ/მ ³	უმდაბლესი ვობბეს რიცხვი,მჯ/მ ³
წყალბადი	48.23	40.65
მეთანი	53.28	47.91
ეთანი	68.19	62.47
ეთილენი	63.82	60.01
ბუნებრივი გაზი	53.71	48.52
პროპანი	81.07	74.54
პროპილენი	77.04	71.88
H-ბუტანი	92.32	85.08
იზო-ბუტანი	91.96	84.71
ბუთილენი-1	88.46	82.54
LPG	86.84	79.94
აცეტილენი	61.32	59.16
ნახშირის მონოქსიდი	12.8	12.8

როგორც პრაქტიკამ აჩვენა, საწვავი გაზების ურთიერთ ჩანაცვლებისას გაზომომხმარებელი ხელსაწყოებისა და დანადგარების ნორმალური მუშა რეჟიმის ძირეული დარღვევების გარეშე შენარჩუნება მიიღწევა ვობბის რიცხვის ნომინალური მნიშვნელობის 5-7% ცდომილების ფარგლებში.

საწვავი გაზების წარმოშობის მიხედვით შეიძლება დაიყოს ბუნებრივ, ხელოვნურ, გათხევადებულ ნახშირწყალბადოვან გაზებად და ბიოგაზად. გაზების ენერგეტიკული და ფიზიკურ-ქიმიური მახასიათებლები განისაზღვრება წვის კომპონენტების შემადგენლობით, არასაწვავი კომპონენტების არსებობით - ბალასტური და მავნე მინარევებით.

ტექნიკური მოთხოვნებით, ბუნებრივ გაზში მერკაპტანული გოგირდის GOCT 5542-87-ის მიხედვით უნდა იყოს არაუმეტეს 0.036 გ/მ³-ზე, წყალბადის სულფიდი არაუმეტეს 0.02 გ/მ³, მექანიკური მინარევებისა არაუმეტეს 0.001 გ/მ³. ჟანგბადის მოცულობის რაოდენობა უნდა იყოს არაუმეტეს 0.05%. სუნის

ინტენსივობა უნდა იყოს მინიმუმ 3 ქულა (5 – ქულიანი შეფასებით). ვობბეს რიცხვის გადახრა არ უნდა იყოს უმეტესად ნომინალური მნიშვნელობიდან $\pm 5\%$ -ით.

ტექნიკური რეგლამენტი შექმნილია ევროპის ეკონომიკური კავშირის ერთიანი ტერიტორიაზე დასადგენად. სავალდებულოა ევროკავშირის ეკონომიკური კავშირის წევრი სახელმწიფოების ტერიტორიაზე მიმოქცევაში მყოფი ბუნებრივი გაზის წვის მოთხოვნების გამოყენებისა და აღსრულებისთვის [76].

ბუნებრივი გაზი - სხვადასხვა საბადოებიდან ნახშირწყალბადების ნედლეულისგან წარმოქმნილი აირისებრი ნარევი, რომელიც ძირითადად შედგება მეთანისგან და შეიცავს უფრო მძიმე ნახშირწყალბადებს, აზოტს, ნახშირის დიოქსიდის, წყლის ორთქლს, რომელიც შეიცავს ნაერთებს, ინერტული აირებს, ისევე როგორც სხვა კომპონენტების ნაკვალეხს (ცხრილი 24).

C_{5+} ნახშირწყალბადების მასური კონცენტრაცია (გ/მ³) გაანგარიშდება კომპონენტური შემადგენლობის საფუძვალზე შემდეგი ფორმულით:

$$C_{5+} = 10 \left(\frac{72,15}{24,05} X_{\Sigma C_5} + \frac{86,18}{24,05} X_{\Sigma C_6} + \frac{100,21}{24,05} X_{\Sigma C_7} + \frac{114,24}{24,05} X_{\Sigma C_8} \right). \quad (83)$$

სადაც $X_{\Sigma C_5}$ არის გამოსაკვლელ გაზში პენტანების მოლური წილების ჯამი, %;

$X_{\Sigma C_6}$ - გამოსაკვლელ გაზში გექსანების მოლური წილების ჯამი, %;

$X_{\Sigma C_7}$ - გამოსაკვლელ გაზში გეპტანების მოლური წილების ჯამი, %;

$X_{\Sigma C_8}$ - გამოსაკვლელ გაზში ოქტანების მოლური წილების ჯამი, %;

გარდა ამისა საჭიროა: კუთრი თბოუნარიანობა (31,80 მჯ/მ³), უმაღლესი ვობბეს რიცხვი (მინიმალური - 41,20 მჯ/მ³; მაქსიმალური - 54,50 მჯ/მ³).

ვობბეს რიცხვი W_0 არის ინდიკატორი, რომელიც ასევე ახასიათებს აირის თერმული თვისებების გამოვლენას მისი ფარდობით სიმკვრივესთან, რაც განისაზღვრება ფორმულით:

$$\begin{cases} W_D = \frac{Q_D}{\sqrt{\rho}}; \\ W_M = \frac{Q_M}{\sqrt{\rho}} \end{cases}, \quad (84)$$

ცხრილი 24. წვის ბუნებრივი გაზი ისეთი მოთხოვნები, რომელიც დამზადებულია მაგისტრალური გაზსადენებით ტრანსპორტირებისთვის

№	მახასიათებლის დასახელება	გაზომვი ერთეული	ნორმა	
			მინიმალური	მაქსიმალური
1	კომპონენტების მოლური წილი	%	არ ნორმირდება, დადგენა აუცილებელია	
2	ჟანგბადის მოლური წილი	%	-	0,20
3	ნახშირის დიოქსიდის მოლური წილი	%	-	2,5
4	გოგირდწყალბადის მასური კონცენტრაცია	გ/მ ³	-	0,007
5	მერკაპანტური გოგირდის მასური კონცენტრაცია	გ/მ ³	-	0,016
6	ზოგადი გოგირდის მასური კონცენტრაცია	გ/მ ³	-	0,030
7	წვის მოცულობითი უდაბლესი სითბო	მჯ/მ ³		
8	სიმკვრივე	კგ/მ ³	არ ნორმირდება, დადგენა აუცილებელია	
9	ნამის წერტილი წყლის მიმართ -ზაფხული -ზამთარი	°C	-	-10,0 (-5,0) -20
10	ნამის წერტილი ნახშირწყალბედის მიმართ -ზაფხული -ზამთარი	°C	-	-2,0 -10,0
11	მექანიკური მინარევის მასური კონცენტრაცია	გ/მ ³	-	0,001

სადაც W_D და W_M - შესაბამისად არის ვობბეს რიცხვის უმაღლესი და უმდაბლესი მნიშვნელობები, მჯ/მ³; Q_D და Q_M - შესაბამისად თბოუნარიანობის უმაღლესი და უმდაბლესი მნიშვნელობები, მჯ/მ³; ρ - ფარდობითი სიმკვრივე, კგ/მ³.

ვობბეს რიცხვების ტოლობა $W_D = \frac{Q_{D1}}{\sqrt{\rho}} = \frac{Q_{D2}}{\sqrt{\rho}}$ მიუთითებს გაზების

ურთიერთჩანაცვლადობას, ე.ი., ერთ ერთ სანთურის მოწყობილობაში მათი გამოყენების შესაძლებლობას ამ უკანასკნელის კონსტრუქციის ცვლლების გარეშე.

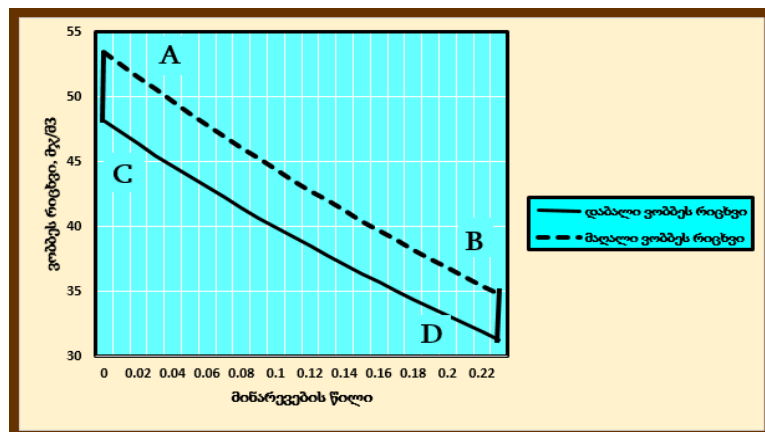
პრაქტიკულად ითვლება, რომ გაზების ურთიერთჩანაცვლადობა გაზქურის მოწყობილობის ნორმალური მოქმედების შეფერხების გარეშე შესაძლებელია ვობბეს რიცხვების რხევებით, ნომინალური მნიშვნელობების $\pm 5\%$ -ით და ალის სიჩქარეების გავრცელების ტოლობით, ბუნებრივ და გათხევებული გაზებისათვის დაახლოებით ტოლია 0.36–0,37 მ/წმ. ხელოვნური და ბიოგაზების ალის გავრცელების სიჩქარე მნიშვნელოვნად განსხვავდება, მათში დიდი რაოდენობით ბალასტური გაზების და წყალბადის არსებობის გამო [77].

შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ ყველა ბიოგაზში შედის მხოლოდ მეთანის გაზი, ნახშირორჟანგისა და ჰაერის ბალასტი. ბიოგაზის ვობბეს რიცხვების უმდაბლესი და უმაღლესი მნიშვნელობები განისაზღვრება შემდეგი ფორმულებით:

$$\begin{cases} W_D = \frac{35,8(1-x)}{\sqrt{0,554 + 0,97x}}; \\ W_M = \frac{39,8(1-x)}{\sqrt{0,554 - 0,97x}}. \end{cases} \quad (85)$$

სადაც x არის ბალასტის მოცულობითი რაოდენობა.

ნახ. 59-ზე ნაჩვენებია უმდაბლესი და უმაღლესი ვობბეს რიცხვების მნიშვნელობები, კერძოდ ABCD ფიგურა, პირველ მიახლოებაში ურთიერთჩანაცვლადობის დიაგრამას წარმოადგენს.



ნახ. 59. პირველ მიახლოებაში უმდაბლესი და უმაღლესი ვობბეს რიცხვების ურთიერთჩანაცვლადობის დიაგრამა

5.2. საქართველოში აზერბაიჯანიდან და რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვობბეს რიცხვის სტოქასტიკური მახასიათლებების ანალიზი და თვისებრივი კრიტერიუმების დადგენა

ენერჯის ღირებულების ზრდამ და სხვადასხვა თვისებების აირების არსებობამ განაპირობა, რომ გაანგარიშებები გაზის ინდუსტრიაში დღეისათვის ხდება თერმული ენერჯის (თბური ენერჯის) გაზომვით. თავის მხრივ, წვის სითბოს დადგენის გაზომვების ან გამოთვლების გამოყენამ განაპირობა შესაბამისი განსაზღვრის მეთოდები. ამასთან, პროცედურები, რომლების საშუალებით ხდება წვის სითბოს მონაცემების და ბუნებრივი გაზის მოცემულ მოცულობაში ენერჯის ოდენობის განსაზღვრა - არასაკმარისად სტანდარტიზებულია. ენერჯის განსაზღვრა (დამოუკიდებლად იმისა თუ სად ხდება დროში და ადგილზე) და ბუნებრივი გაზის პარამეტრების გაზომვები (დაწყებული წარმოებისა და გადამამუშავებელი ოპერაციებით) - უნდა მოხდეს საბოლოო მომხმარებლის მიერ გაზის მოხმარებამდე. მოპოვების, ტრანსპორტირებისა და განაწილების პრობლემების მოსაგვარებლად, ბუნებრივი გაზი ბოლო მომხმარებლამდე ბუნებრივი გაზის ენერჯის გაზომვის სტანდარტიზებული მეთოდები - აქტუალური საკითხია.

ისტორიულად, ნავთობისა და გაზის გლობალურ ინდუსტრიაში გამოყენებულია ორი გაზომვის სისტემა: SI ერთეულის სისტემა (ან მეტრული სისტემა) და ე.წ. "ნავთობის საბადოს" ერთეულების სისტემა, რომელიც შეიქმნა აშშ-ს ნავთობისა და გაზის ინდუსტრიის განვითარებისას და დაფუძნებულია ბრიტანული ერთეულის სისტემაზე [77]. ამასთან, განსხვავებული წნევისას, თანაბარი მოცულობა შეიცავს ბუნებრივი გაზის სხვადასხვა მასას, რომელიც შეიცავს სხვადასხვა თერმულ ენერჯიას. აქედან გამომდინარე, ბუნებრივი გაზის რაოდენობას ზომავენ ე.წ. ნორმალურ მ³-ში, ანუ დაყვანილ ნორმალურ პირობებში (ტენიანობის ნაკლებობა, ტემპერატურა 0 ° C და წნევა 1 ატმოსფერო) [78]. იმის გამო, რომ ბუნებრივი გაზი სხვადასხვა საბადოებში (ან სხვადასხვა ჭაბურღილებიც) ყოველთვის განსხვავებულია შემადგენლობით, ხოლო მოწყობილობა, რომლებიც გამოიყენება გაზის წვისთვის, წარმოებულია წვის სითბოსა და ინტენსივობის გარკვეული სტანდარტების მიხედვით, მნიშვნელოვან

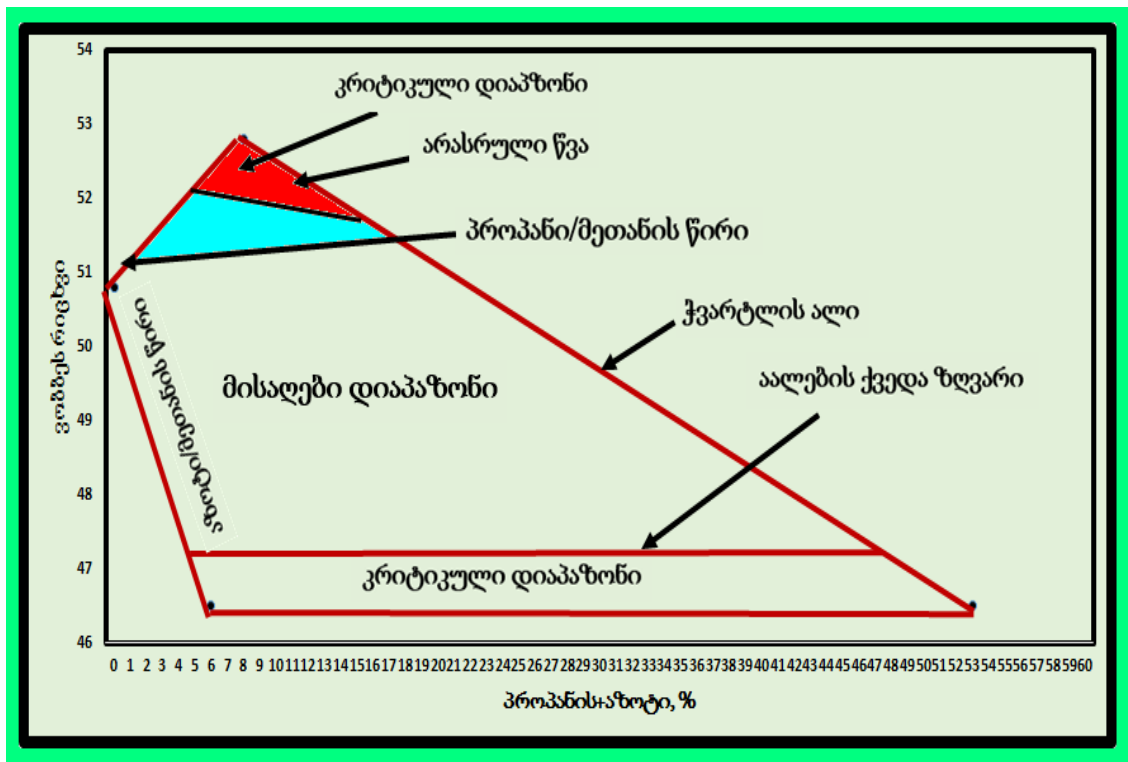
ფაქტორს წარმოადგენს სხვადასხვა ბუნებრივი გაზის ერთი სტანდარტით „გათანაბრება“ [79].

გაზის ინდუსტრიაში არის ასეთი მცნება, როგორც გაზის ურთიერთ ჩანაცვლება, რომელიც ხასიათდება რამოდენიმე პარამეტრით. მთავარი პარამეტრს წარმოადგენს ვოლუმის რიცხვი.

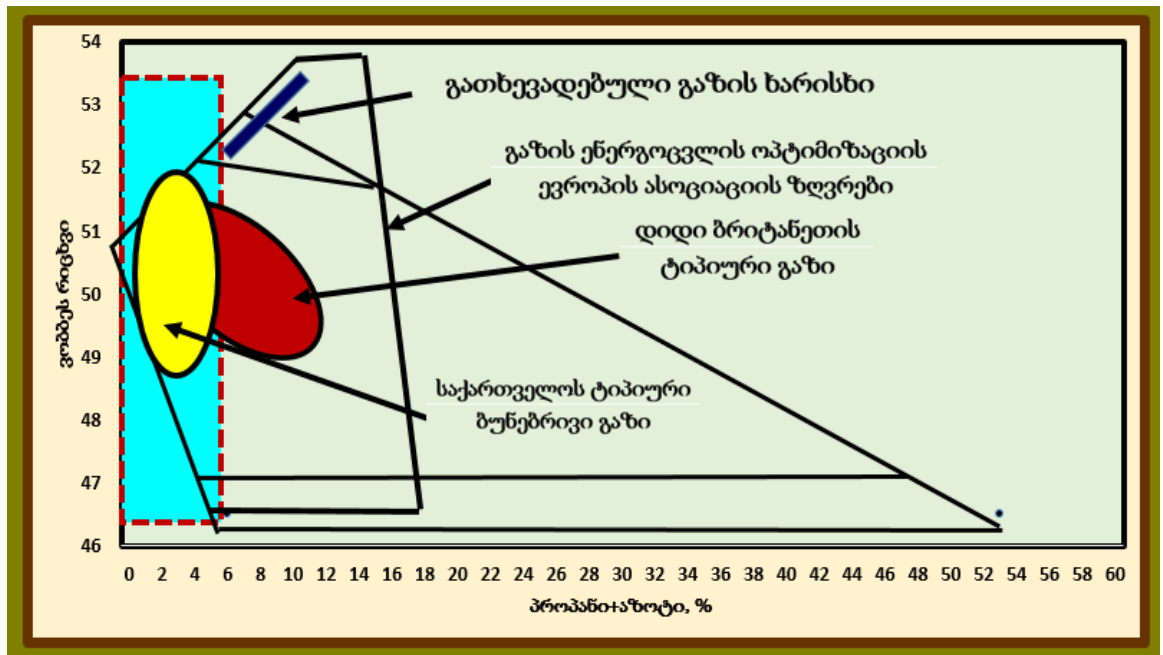
დიდ ბრიტანეთში, ვიზუალიზაციის გამო, აირების ურთიერთჩანაცვლების თვალსაზრისით გამოიყენება შემდეგი დიაგრამა (ნახ. 60). რიცხვის ვოლუმე განლაგებულია ორდინატების ღერძის გასწვრივ, ხოლო პროპანისა და აზოტის ეკვივალენტა ჯამის წილი აბსცისის ღერძზე [79,80].

გაზის ხარისხი უნდა კონტროლდებოდეს, წინააღმდეგ შემთხვევაში მილსადენში გაზის საერთო ხარისხი შეიძლება გაუარესდეს, არაკეთილსინდისიერი მომწოდებლების გამო.

თუ საწარმო იყენებს დაბალ ან მაღალკალორიულ გაზს, რომელიც არ შეესაბამება საწვავი მოწყობილობის სითბოს წვას, მაშინ საჭიროა შესაბამისი ხარისხის გაზის ნარევის მომზადება.



ნახ. 60. ბუნებრივი გაზის ურთიერთჩანაცვლების დიაგრამა



ნახ. 61. ბუნებრივი გაზის ტიპური ხარისხის დიაგრამა

გაზის ინდუსტრიაში არსებობს ე.წ. გაზის ურთიერთჩანაცვლება, რომელსაც აკონტროლებს რამდენიმე პარამეტრი. მათგან ყველაზე მნიშვნელოვანია ვობბეს რიცხვი.

ვობბეს რიცხვი არის მოცულობითი წვის სითბო (ე.ი. რამდენ ჯოულსაც გამოიმუშავენს ერთი კუბური მეტრი გაზი) შეფარდებული გაზის ფარდობითი სიმკვრივის კვადრატულ ფესვზე.

$$W = \frac{Q}{\sqrt{\rho}} \quad (87)$$

ამ ინდექსის ფიზიკური მნიშვნელობა ის არის, რომ თანაბარი წნევის დროს ერთნაირი ვობის რიცხვის მქონე საწვავი გაზები იძლევიან ერთნაირ ენერგიას, განზომილება - მჯ/მ³ (ე.ი. მრიცხველი განზომილებიანია).

ამგვარად საჭიროა სითბოს მწარმოებლობა (ვობბეს რიცხვი), მუშა წნევების დონეები, ალის მოწყვეტისა და გავარდნის ზღვრები, ქიმიური და მექანიკური ცეცხლის პროდუქტების ფორმირება. ზოგჯერ ვობბეს რიცხვი მოცემულია სახელმძღვანელო მითითებში, როგორც ურთიერთჩანაცვლების დამოუკიდებელი ზომა.

იმის გამო, რომ სხვადასხვა საბადოდან მიღებული და შესაძლოა სხვადასხვა ჭაბურღილებიდანაც კი, მიღებული ბუნებრივი გაზი ყოველთვის განსხვავებულია

შემადგენლობით, ხოლო მოწყობილობა, რომელსაც საბოლოოდ სჭირდება გაზის დაწვა, დაფუძნებულია კალორიული წვის სითბოს და სისუფთობის გარკვეულ სტანდარტებზე, ამიტომ მეტად მნიშვნელოვანია მრავალფეროვანი ბუნებრივი გაზის გათანაბრება ერთ სტანდარტთან. [79]

საბადოები განსხვავდება მეთანის შემცველობით, მეთანის ჰომოლოგებით და არაჰიდროწყალბადური მინარევებით. ბუნებრივი გაზის შემადგენლობა იყოფა ოთხ ჯგუფად: პირველი ჯგუფი არის მეთანი (CH_4), რომელსაც უწოდებენ "მშრალ" გაზს“. მეორე ჯგუფია გაზის კონდენსატები, ხოლო მესამე ჯგუფია უფრო მაღალი რიგის შენაერთების კონდენსატები ე.ი. პენტანი. მეოთხე ჯგუფი შედგება არაჰიდროწყალბადური მინარევებისაგან (ძირითადად აზოტი და ნახშირორჟანგი), რომლის არსებობა ამცირებს ბუნებრივი აირის წვის სპეციფიკურ თბოუნარიანობას. ოთხივე ჯგუფი ვარირდება გაზში, ასე რომ, გაზის ინდუსტრიაში არსებობს ისეთი რამ, როგორცაა გაზის ურთიერთჩანაცვლება, რომელსაც აკონტროლებს რამდენიმე პარამეტრი. მათგან ყველაზე მნიშვნელოვანია ვობეს რიცხვი.

ამ ინდექსის ფიზიკური მნიშვნელობა არის ის, რომ თანაბარი წნევისას აირები იგივე ვობბეს რიცხვებით იძლევა იმავე ენერჯის შემოდინებას.

სიდიდეების მნიშვნელობების სავარაუდო გაგებისთვის, განვიხილოთ საშუალოდ "ტიპიური" ბუნებრივი გაზის ცხრილი 25:

ცხრილი 25. ბუნებრივი გაზის ტიპიური შემადგენლობა

ბუნებრივი გაზის შემადგენლები	%
მეთანი, CH_4	88,860
ეთანი C_2H_6	4,240
პროპანი, C_3H_8	1,140
H -ბუტანი, C_4H_{10}	0,424
პენტანი, C_5H_{12}	0,126
ჰექსანი, C_6H_{14}	0,081
აზოტი, N_2	4,006
ნახშირორჟანგი, CO_2	1,096
წყალი, H_2O	0,01
ვობეს რიცხვი, W , მჯ/მ ³	48,53

ცხრილ 26-ში ნაჩვენებია მშრალი ბუნებრივი გაზის წვის სითბოსა და ფარდობითი სიმკვრივის სიდიდეები ($0^{\circ}C$ და 101,325 კპა).

ცხრილი 26. მშრალი ბუნებრივი გაზის წვის სითბოსა და ფარდობითი სიმკვრივის სიდიდეები ($0^{\circ}C$ და 101,325 კპა). (აირისებრი საწვავის წვის სითბო, რომელიც წარმოადგენს საწვავი გაზების ნარევის წვის სითბოს სიდიდეების ჯამი, თვითიული კომპონენტის წილით)

კომპონენტი	წვის სითბო, მჯ/მ ³		ფარდობითი სიმკვრივე, β
	მაღალი	დაბალი	
მეთანი, CH_4	39,82	35,85	0,5548
ეთანი C_2H_6	70,31	64,36	1,048
პროპანი, C_3H_8	101,21	93,18	1,554
H -ბუტანი, C_4H_{10}	133,80	123,57	2,090
იზობუტანი, C_4H_{10}	132,96	122,78	2,081
ბენზოლი, C_6H_6	169,27	156,63	2,671
ტოლუოლი, C_7H_8	176,26	168,18	3,18
წყალბადი, H_2	12,75	10,79	0,0698
ნახშირის ოქსიდი, CO	12,64	12,64	0,9671
ნახშირის დიოქსიდი CO_2	-	-	1,529
აზოტი, N_2	-	-	0,967
ჟანგბადი, O_2	-	-	1,05
ჰელიუმი, He	-	-	0,138

ცხრილი 27. ბუნებრივი გაზის ტექნიკური მოთხოვნები

ვობბეს რიცხვი, კჯ/მ ³	39 000- 52 000 (9 850 – 13 000)
ვობბეს რიცხვის დასაშვები გადახრა ნომინალურიდან, %	± 5
მერკაპტანული გოგირდის მასა 1 მ ³ -ში, არა უმეტესიმ გ	0,036
გოგირდწყალბოდის მასა 1 მ ³ -ში, არა უმეტესი, გ	0,02
მექანიკური მინარევების 1 მ ³ -ში, არა უმეტესი, გ	0,001
ჟანგბადის მოცულობითი წილი, არა უმეტესი, %	1

გაზქურის მოწყობილობებში სანთურების ნორმალური მუშაობა დამოკიდებულია გაზის შემადგენლობის და მავნე მინარევების ოდენობის მუდმივობაზე, რომელიც შედის მაგისტრალურ და განაწილების მილსადენებში.

საყოფაცხოვრებო მიზნებისათვის გამოყენებული ბუნებრივი გაზების ფიზიკო-ქიმიური პარამეტრები უნდა შეესაბამებოდეს მოყვანილ ცხრილ 27-ში, მოცემული ტექნიკურ მოთხოვნების შესაბამისად [78-81].

5.3. ურთიერთჩანაცვლადობის კრიტერიუმების (ვობეს რიცხვი, სიმკვრივე და ა.შ.) დიაგრამის ალგორითმის შემუშავება

განვიხილოთ ვობეს რიცხვის არეს დიაგრამის შემუშავებელი ალგორითმი:

1. ვიხილავთ ვობეს რიცხვს $W = \frac{Q}{\sqrt{p}}$ -ს, როგორც სტოქასტიკურ სიდიდეს, რადგანაც სიდიდეები გაზის Q თბოუნარიანობა და გაზის p სიმკვრივე - სტოქასტიკურია;

2. დავადგინოთ გაზის Q თბოუნარიანობისა და გაზის p სიმკვრივეს სიდიდეების მწკრივების ალბათური მახასიათებლები, კერძოდ ამ სიდიდეების მათემატიკური მოლოდინი და დისპერსიები ($\mu_Q, \mu_p, \sigma_Q, \sigma_p$) და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციების კანონები $f_1(Q)$ და $f_2(p)$. სტატისტიკური მწკრივების მოიძიება შესაძლოა შპს „საქართველოს გაზის ტრანსპორტირების კომპანიას“ საიტზე მოყვანილი ლაბორატორიის მიერ შექმნილი მონაცემები (<http://e-platform.ggtc.ge/gasanalysis.aspx>)

3. დავადგინოთ W ვობეს რიცხვის ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციის კანონი - $g(W)$, რომელიც განისაზღვრება შემდეგი დამოკიდებულებით [82]:

$$g(W) = \int_0^{\infty} f[Q(z); z] \frac{\partial(Q, p)}{\partial(W, z)}, \quad (88)$$

სადაც $f(Q, p) = f_1(Q)f_2(p)$, ხოლო იაკობი მატრიცა (იაკობიანი) შემდეგია:

$$\frac{\partial(Q, p)}{\partial(W, z)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial Q}{\partial W} & \frac{\partial p}{\partial W} \\ \frac{\partial Q}{\partial z} & \frac{\partial p}{\partial z} \end{vmatrix}. \quad (89)$$

4. თუ შესაძლოა $g(W)$ ფუნქციის ანალიზური გამოსახულებისა და შესაბამისი ამ სიდიდეების მათემატიკური მოლოდინისა და საშუალოკვადრატული გადახრების (μ_W, σ_W) დადგენა, ალგორითმი მთავრდება.

5. თუ ფუნქცია $g(W)$ ძალიან რთულია (ან ინტეგრალი არ იხსნება ანალიზურად) და შესაბამისი მათემატიკური მოლოდინისა და საშუალოკვადრატული გადახრების (μ_W, σ_W) დადგენა ასევე ანალიზურად, მაშინ გადავდივართ შემდეგ ბიჯზე;

6. იგივე აღნიშნული საიტის მიხედვით ვიღებთ Q თბოუნარიანობისა და გაზის ρ სიმკვრივეს სიდიდეების მწკრივებს $Q_i \{Q_1, Q_2, \dots, Q_N\}$ და $\rho_i \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N\}$.

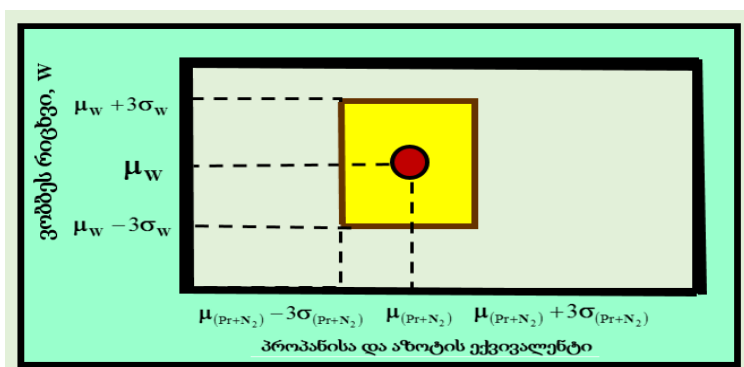
შესაბამისად ვანგარიშებთ ახალ მწკრივს $W_i \left\{ \frac{Q_1}{\sqrt{\rho_1}}, \frac{Q_2}{\sqrt{\rho_2}}, \dots, \frac{Q_N}{\sqrt{\rho_N}} \right\}$. შემდეგ

ვაკეთებთ სტატისტიკურ დამუშავებას და შესაბამისად ვპოულობთ ფუნქცია $g(W)$ -ს და მისი მათემატიკური მოლოდინისა და საშუალოკვადრატული გადახრების (μ_W, σ_W) სიდიდეებს.

7. იგივე აღნიშნული საიტის მიხედვით, ვიხილავთ ბუნებრივი გაზის პროპანისა და აზოტის ექვივალენტობის ჯამური ოდენობის მწკრივს და ვადგენთ ამ სიდიდის ექვივალენტის რიცხვის $(Pr+N_2)\%$ სტატისტიკურ მახასიათებლებს:

$$h(N_{Pr+N_2}), \mu_{N_{Pr+N_2}}, \sigma_{N_{Pr+N_2}}.$$

8. ავაგოთ დიაგრამა, რომლის აბსცისზე არის N_{Pr+N_2} , ხოლო ორდინატზე ვიხილავთ რიცხვი W . მართკუთხედის (ან სხვა ფორმის) არე წარმოადგენს ბუნებრივი გაზის ენერგეტიკულ დიაგრამას (ნახ. 62)[83].



ნახ. 62. ვობბეს რიცხვის დიაგრამის აგების ილუსტრაცია

ვობეს რიცხვის ფორმულაში შედის სიდიდეები თბოუნარიანობა Q და სიმკვრივე ρ , რომლებიც შემთხვევითი სიდიდეები და მათ გააჩნიათ ნორმალური კანონი:ხვევითი სიდიდეები და მათ გააჩნიათ ნორმალური კანონი [84]:

$$\begin{cases} f_1(Q) = \frac{1}{\sigma_Q \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Q-\mu_Q)^2}{2\sigma_Q^2}}; \\ f_2(\rho) = \frac{1}{\sigma_\rho \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\rho-\mu_\rho)^2}{2\sigma_\rho^2}}. \end{cases} \quad (90)$$

ცხადია, რომ W ვობეს რიცხვი სტოქასტიკურია და განვსაზღვროთ ამ სიდიდის ალბათობის განაწილების სიმკვრივეს ფუნქცია. ცნობილია, რომ W ვობეს რიცხვი ტოლია $W = \frac{Q}{\sqrt{\rho}}$, ამიტომ გვექნება:

$$f(Q, \rho) = f_1(Q)f_2(\rho). \quad (91)$$

ანდა

$$f(Q, \rho) = \frac{1}{\sigma_Q \sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sigma_\rho \sqrt{2\pi}} \left[e^{-\frac{(Q-\mu_Q)^2}{2\sigma_Q^2}} \cdot e^{-\frac{(\rho-\mu_\rho)^2}{2\sigma_\rho^2}} \right] = \frac{1}{2\pi\sigma_Q\sigma_\rho} e^{-\frac{(Q-\mu_Q)^2}{2\sigma_Q^2} - \frac{(\rho-\mu_\rho)^2}{2\sigma_\rho^2}}. \quad (92)$$

ამ შემთხვევაში W სიდიდის ალბათობის განაწილების სიმკვრივეს ფუნქცია, განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$g(W) = \int_0^\infty f[Q(z); z] \frac{\partial(Q, \rho)}{\partial(W, z)}. \quad (93)$$

რადგანაც $W = \frac{Q}{\sqrt{\rho}}$, ამიტომ $Q(z) = W\sqrt{\rho}$, რაც მიიღება ვობბეს რიცხვის

გამოსახულებიდან, ხოლო იაკობის მატრიცა (იაკობიანი, [84]) ტოლია:

$$\frac{\partial(Q, \rho)}{\partial(W, z)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial Q}{\partial W} & \frac{\partial \rho}{\partial W} \\ \frac{\partial Q}{\partial z} & \frac{\partial \rho}{\partial z} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sqrt{z} & 0 \\ -\frac{W}{2\sqrt{z}} & 1 \end{vmatrix} = \sqrt{z}. \quad (94)$$

ამგვარად, (93)-დან მივიღებთ:

$$\begin{aligned} g(W) &= \int_0^\infty f[Q(z); z] \frac{\partial(Q, \rho)}{\partial(W, z)} = \frac{1}{2\pi\sigma_Q\sigma_\rho} \int_0^\infty \sqrt{z} e^{-\frac{(\sqrt{z}-\mu_Q)^2}{2\sigma_Q^2} - \frac{(z-\mu_\rho)^2}{2\sigma_\rho^2}} dz = \\ &= \frac{1}{2\pi\sigma_Q\sigma_\rho} \int_0^\infty \sqrt{z} e^{-\frac{(\sqrt{z}-\mu_Q)^2}{2\sigma_Q^2}} dz + \frac{1}{2\pi\sigma_Q\sigma_\rho} \int_0^\infty e^{-\frac{(z-\mu_\rho)^2}{2\sigma_\rho^2}} dz = I_1 + I_2 \end{aligned} \quad (95)$$

$$\begin{cases} \mathbf{I}_1 = \frac{1}{2\pi\sigma_Q\sigma_p} \int_0^\infty \sqrt{z} e^{-\frac{(\sqrt{z}-\mu_Q)^2}{2\sigma_Q^2}} dz; \\ \mathbf{I}_2 = \frac{1}{2\pi\sigma_Q\sigma_p} \int_0^\infty e^{-\frac{(z-\mu_p)^2}{2\sigma_p^2}} dz. \end{cases} \quad (96)$$

ინტეგრალი \mathbf{I}_2 მარტივად იხსნება. მართლაც:

$$(z - \mu_p) / 2\sigma_p^2 = \omega; \quad dz = 2\sigma_p^2 d\omega; \quad \omega_1 = -\frac{\mu_p}{2\sigma_p^2}; \quad \omega_2 = \infty. \quad (97)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_2 &= \frac{1}{2\pi\sigma_Q\sigma_p} \int_0^\infty e^{-\frac{(z-\mu_p)^2}{2\sigma_p^2}} dz = \frac{2\sigma_p^2}{2\pi\sigma_Q\sigma_p} \int_{-\mu_p/2\sigma_p^2}^\infty e^{-\omega^2} d\omega = \frac{1}{2\pi\sigma_p} \int_{-\mu_p/2\sigma_p^2}^\infty e^{-\omega^2} d\omega = \\ &= \frac{\sigma_p}{2\pi\sigma_Q} \int_0^\infty e^{-\omega^2} d\omega + \frac{\sigma_p}{2\pi\sigma_Q} \int_0^{\mu_p/2\sigma_p^2} e^{-\omega^2} d\omega = \frac{\sigma_p}{2\pi\sigma_Q} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{a}} + \Phi\left(\frac{\mu_p}{2\sigma_p^2}\right) = \\ &= \frac{1}{4\pi\sigma_Q} \left[\sqrt{\frac{\pi}{a}} + \Phi\left(\frac{\mu_p}{2\sigma_p^2}\right) \right] \end{aligned} \quad (98)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_1 &= \frac{1}{2\pi\sigma_Q\sigma_p} \int_0^\infty \sqrt{z} e^{-\frac{(\sqrt{z}-\mu_Q)^2}{2\sigma_Q^2}} dz = \left| \begin{array}{l} \sqrt{z} = \omega \\ dz = 2\sqrt{z}d\omega \end{array} \right| \frac{d\omega}{2\sqrt{z}} = d\omega \quad \left| \begin{array}{l} \omega_1 = 0; \omega_2 = \infty \end{array} \right| = \frac{1}{2\pi\sigma_Q\sigma_p} \int_0^\infty \sqrt{z} e^{-\frac{(\omega-\mu_Q)^2}{2\sigma_Q^2}} 2\sqrt{z}d\omega = \\ &= \frac{1}{\pi\sigma_Q\sigma_p} \int_0^\infty \omega^2 e^{-\frac{(\omega-\mu_Q)^2}{2\sigma_Q^2}} d\omega \end{aligned} \quad (99)$$

განვიხილოთ აზერბაიჯანიდან და რუსეთიდან (ნახ. 63) შემოსული ბუნებრივი გაზის ვობეს რიცხვის სტატისტიკური მწკრივები. რადგანაც ცნობილია Q თბოუნარიანების და ρ სიმკვრივის მწკრივები, მაშინ ფორმულით შეიძლება ვიპოვოთ ვობეს $W = Q/\sqrt{\rho}$ რიცხვის მწკრივი. ამის შემდეგ ხდება ამ მწკრივის სტატისტიკური დამუშავება. ცხრილ 28 და 29-ში მოყვანილია მწკრივის პარამეტრები.

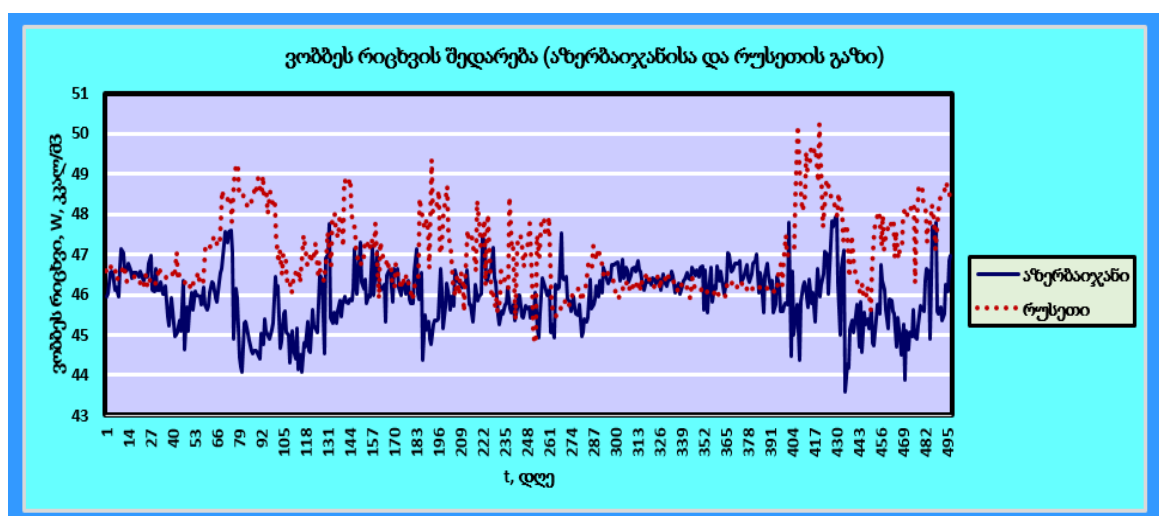
ცხრილი 28. აზერბაიჯანიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვობეს რიცხვის სტატისტიკური პარამეტრები

ამონაკრების რაიდენობა N	1311
მწკრივი მინიმალური მნიშვნელობა W_{Min}	43,6
მწკრივი მაქსიმალური მნიშვნელობა W_{Max}	49,98
მათემატიკური მოლოდინი μ	46,06
სასუალოკვადრატული გადახრა σ	0,79

ცხრილი 29. რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვობეს რიცხვის სტატისტიკური პარამეტრები

ამონაკრების რაიდენობა N	497
მწკრივი მინიმალური მნიშვნელობა W_{Min}	46,99
მწკრივი მაქსიმალური მნიშვნელობა W_{Max}	50,22
მათემატიკური მოლოდინი μ	44,79
სასუალოკვადრატული გადახრა σ	0,98

აზერბაიჯანიდან და რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვობეს რიცხვის დინამიკური ის შემდეგ აგებულია ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები მოყვანილია ცხრილებში 30 და 31, ნახ. 64 და 65.



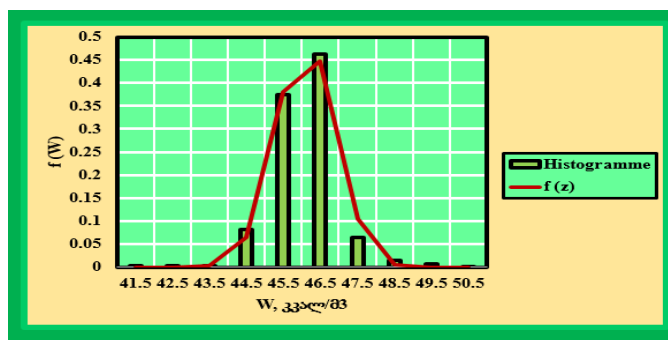
ნახ. 63. აზერბაიჯანიდან და რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვობეს რიცხვის დინამიკური მწკრივები

ცხრილი 30. აზერბაიჯანიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვიზის რიცხვის დინამიკური მწკრივების ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები

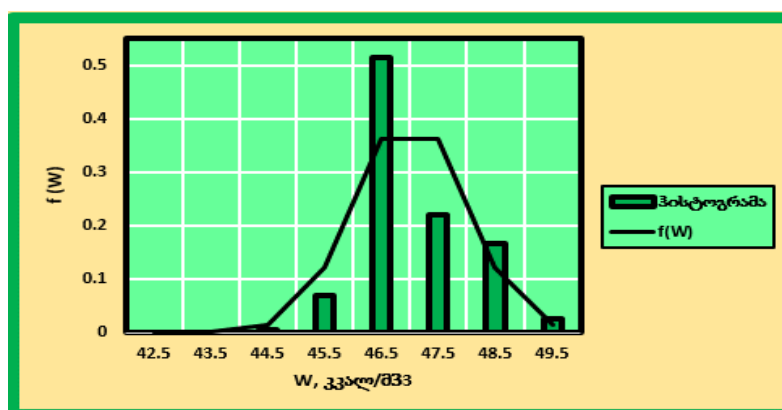
ინტერვალი	ინტერვალის ცენტრი	ჰისტოგრამა	$f(w)$
41-42	41.5	0.0038	1.762E-08
42-43	42.5	0.0038	1.3E-05
43-44	43.5	0.0038	0,021
44-45	44.5	0.0809	0,063
45-46	45.5	0.3738	0,3796
46-47	46.5	0.4630	0,4465
47-48	47.5	0.0648	0,1036
48-49	48.5	0.0145	0,0047
49-50	49.5	0.0061	4.2E-05
50-51	50.5	0.0008	7.6E-08

ცხრილი 31. რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვიზის რიცხვის დინამიკური მწკრივების შემდეგ აგებულია ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები

ინტერვალი	ინტერვალის ცენტრი	n	ჰისტოგრამა n_i / N	$f(w)$
42-43	42.5	0	0	7.01E-06
43-44	43.5	0	0	0.0005
44-45	44.5	2	0.0040	0.0140
45-46	45.5	34	0.0684	0.1222
46-47	46.5	256	0.5151	0.3618
47-48	47.5	109	0.2193	0.3618
48-49	48.5	83	0.1670	0.1222
49-50	49.5	13	0.0262	0.0140

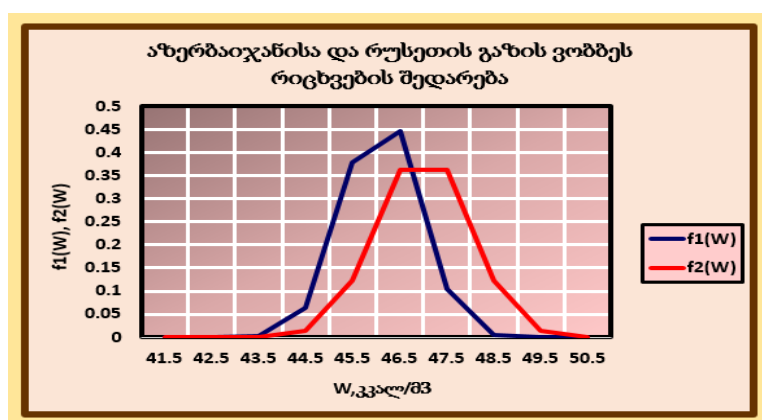


ნახ. 64. აზერბაიჯანიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვობეს რიცხვის დინამიკური მწკრივების ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები



ნახ. 65. რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვობეს რიცხვის დინამიკური მწკრივების ჰისტოგრამა და ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციები

ჩავატაროთ აზერბაიჯანიდან და რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვობეს რიცხვის დინამიკური მწკრივების ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციების შედარება და მათი ანალიზი (ნახ. 66).



ნახ. 66. აზერბაიჯანიდან და რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვობეს რიცხვის დინამიკური მწკრივების ალბათობის განაწილების სიმკვრივის ფუნქციების შედარება

განვსაზღვროთ სტატისტიკური მახასიათებლები, კეროდ მესამე მომენტი m_3 და ასიმეტრიის K_{Assim} კოეფიციენტი

$$m_3 = \frac{\sum_{j=1}^k (x_j - \mu)^3 n_j}{n} \quad (100)$$

$$K_{Assim} = \frac{m_3}{\sigma^3} \quad (101)$$

ჩათვლილია, რომ თუ ასიმეტრიის K_{Assim} კოეფიციენტი ნაკლებია 0,25-ზე, მაშინ ასიმეტრია უგულბეყოფილია, ხოლო თუ მეტია 0,5-ზე, მაშინ ასიმეტრია მნიშვნელოვანია. ე.ი. აზერბაიჯანიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვობეს რიცხვის ალბათობის განაწილების ასიმეტრია ($K_{Assim} \approx 0,2$) - უმნიშვნელოა, ხოლო რუსეთიდან შემოსული ბუნებრივი გაზის ვობეს რიცხვის ალბათობის განაწილება ($K_{Assim} \approx 0,76$) - მნიშვნელოვანია [85-88].

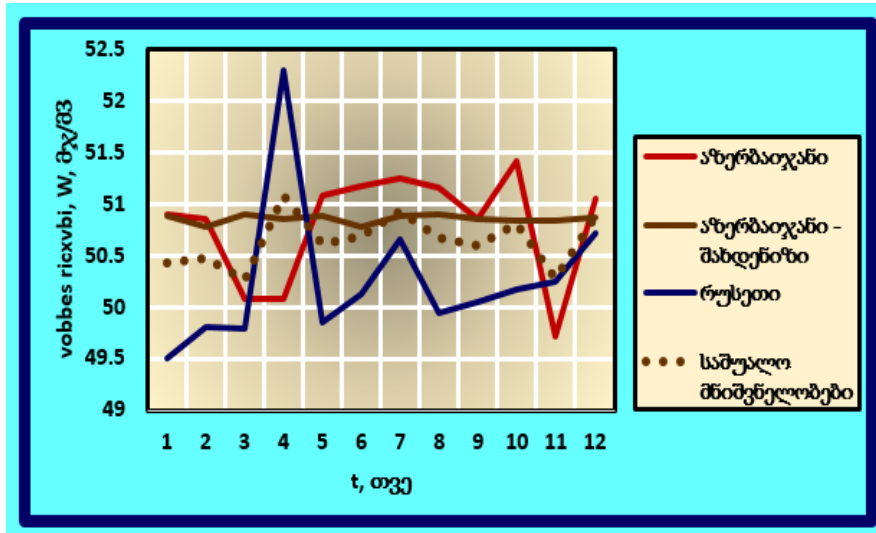
ცხრილი 32. საქართველოს ნავთობისა და გაზის კორპორაციის მიერ არსებული ბუნებრივი გაზის ვობეს პარამეტრები

თვეები	აზერბაიჯანი	აზერბაიჯანი - შაკ-დენიზი	რუსეთი	საშუალო მნიშვნელობები
1	50.9	50.89	49.5	50.43
2	50.86	50.77	49.8	50.48
3	50.08	50.9	49.79	50.26
4	50.08	50.86	52.29	51.08
5	51.08	50.88	49.85	50.60
6	51.17	50.77	50.13	50.69
7	51.25	50.89	50.66	50.93
8	51.15	50.9	49.94	50.66
9	50.86	50.86	50.05	50.59
10	51.41	50.83	50.17	50.80
11	49.72	50.84	50.25	50.27
12	51.05	50.87	50.72	50.88

თუმცა, ხინჩინ-გრიგოლიონუსის თეორემის თანახმად, სხვადასხვა სიდიდეების სუპერზიციისას - ზღვარი მიისწრაფვის ნორმალური კანონისაკენ. ამგვარად, თუმცა ჩვენ შემთხვევაში გვაქვს მხოლოდ ორი სიდიდე (Q და ρ),

ამიტომ, გარკვეული ასიმეტრიისას შესაძლებელია ჩავთვალოთ მარტივი ხერხი - მივიღოთ ნორმალური კანონი.

სრული სურათის მისაღებად, კიდევ განვიხილოთ საქართველოს ნავთობისა და გაზის კორპორაციის მიერ გამოქვეყნებული ბუნებრივი გაზის პარამეტრები (ცხრილი 32, ნახ. 67):



ნახ. 67. ვობეს რიცხვის დინამიკა - 2019 წ (საქართველოს ნავთობისა და გაზის კორპორაცია)

ამგვარად, როგორც გამოთვლილი, ასევე ნატურული მონაცემები მოყვანილია კრებსით ცხრილებში 33 და 34.

ცხრილი 33. გამოთვლილი ვობეს რიცხვის მნიშვნელობები

ვობეს რიცხვის მნიშვნელობები, W, მგ/მ ³				
	აზერბაიჯანიდან შემოსული გაზი (გამოთვლილი მახასიათებლები)		რუსეთიდან შემოსული გაზი (გამოთვლილი მახასიათებლები)	
		მოლური მასა, $(M_{Pr+N_2}), \%$		მოლური მასა $(M_{Pr+N_2}), \%$
მათემატიკური მოლოდინი, μ	46,662	21,822	46,934	23,883
საშუალო კვადრატული გადახრა σ	0,7848		0,9632	
$\mu - 3\sigma$	43,019	0,1	43,971	0,6969
$\mu + 3\sigma$	48,106	50,442	50,897	50,442

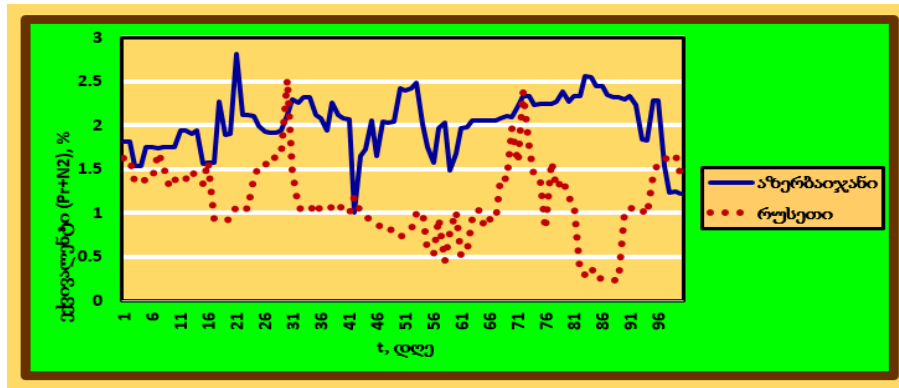
ცხრილი 34. ვობეს რიცხვის მნიშვნელობები (საქართველოს ნავთობისა და გაზის კორპორაცია)

ვობეს რიცხვის მნიშვნელობები, W, მკგ/მ ³						
	აზერბაიჯანიდან შემოსული გაზი		აზერბაიჯანიდან შემოსული გაზი (შაჰ-დენიზი)		რუსეთიდან შემოსული გაზი (გამოთვლილი მახასიათებლები)	
	მოლური მასა, (M _{Pr+N₂}), %			მოლური მასა, (M _{Pr+N₂}), %		მოლური მასა, (M _{Pr+N₂}), %
მათემატიკური მოლოდინი, μ	50,855	2,5	50,51	2,5	50,873	2,5
საშუალო კვადრატული გადახრა, σ	0,5455		0,55		0,6978	
$\mu - 3\sigma$	49,14	2,5	50,25	2,5	48,691	2,5
$\mu + 3\sigma$	52,87	2,5	50,86	2,5	52,559	2,5

საბოლოოდ ავაგოთ ხარისხის დიაგრამა, ამიტომ განვიხილოთ ბუნებრივი გაზის ქიმიური შემადგენლობის ელემენტების ნაწილი, კერძოდ პროპანისა და აზოტის ექვავიკლენტობის ჯამური ოდენობა. ანალიზი დაახლოებითია, რადგანაც ვიღებთ 100 რაოდენობის დინამიკურ მწკრივებს, კერძოდ, ექვავილენტს, როგორც აზერბაიჯანის, ასევე რუსეთის გაზი. სტატისტიკური ანალიზის ვლებულობით (ცხრილი 35, ნახ. 68):

ცხრილი 35. დინამიკური მწკრივების პროპანისა და აზოტის ექვავიკლენტობის ჯამური ოდენობის პარამეტრები

მათემატიკური მოლოდინი (აზერბაიჯანი), μ_A , %	2,1822
მათემატიკური მოლოდინი (რუსეთი), μ_R , %	0,3017
საშუალოკვადრატული გადახრა (აზერბაიჯანი), σ_A , %	2,3883
საშუალოკვადრატული გადახრა (რუსეთი), μ_R , %	0,3344

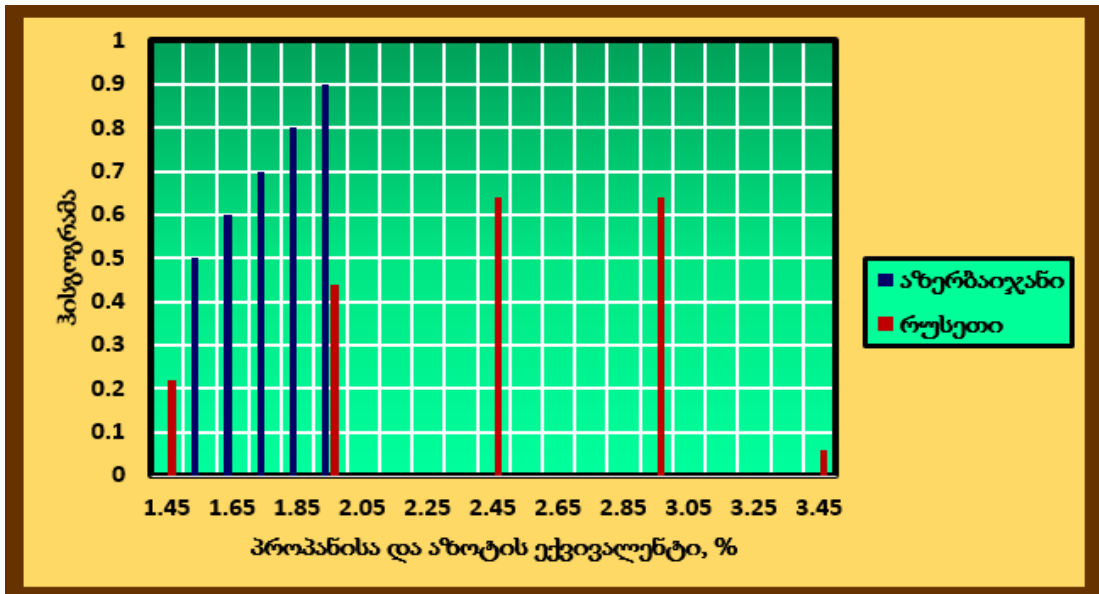


ნახ. 68. პროპანისა და აზოტის ექვივალენტობის ჯამური ოდენობის დინამიკური მწკრივები

პროპანისა და აზოტის ექვივალენტობის ჯამური ოდენობის დინამიკური მწკრივების სტატისტიკური დამუშავების შემდეგ ვლელობით შესაბამის ჰისტოგრამებს (ცხრილი 36, ნახ. 69)

ცხრილი 36. პროპანისა და აზოტის ექვივალენტობის ჯამური ოდენობის დინამიკური მწკრივების ჰისტოგრამები

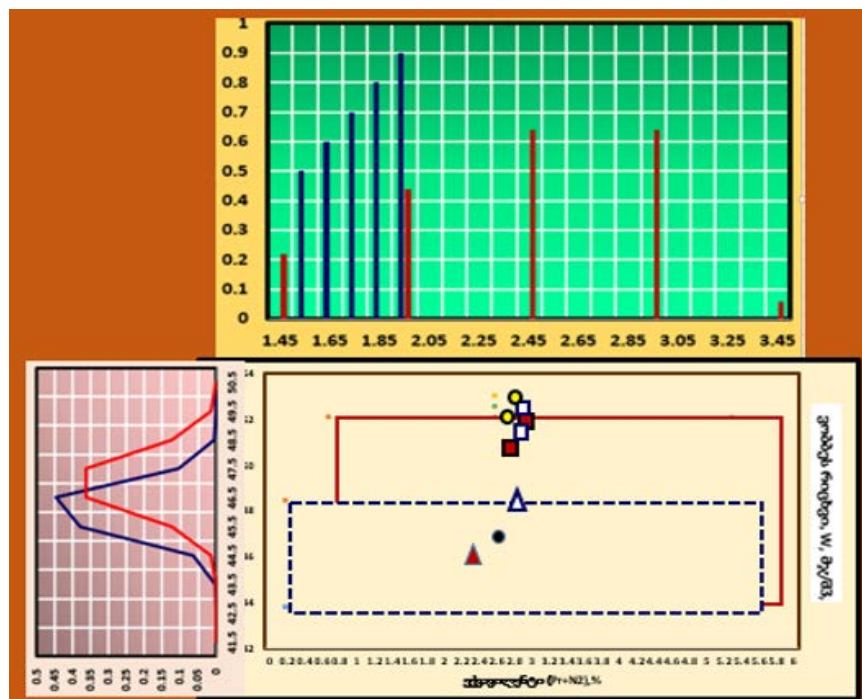
ექვივალენტი (Pr+ N),%	ჰისტოგრამა	
	აზერბაიჯანი	რუსეთი
1.45		0.22
1.55	0.5	
1.65	0.6	
1.75	0.7	
1.85	0.8	
1.95	0.9	0.44
2.05		
2.15		
2.25		
2.35		
2.45		0.64
2.55		
2.65		
2.75		
2.85		
2.95		0.64
3.05		
3.15		
3.25		
3.35		
3.45		0.06



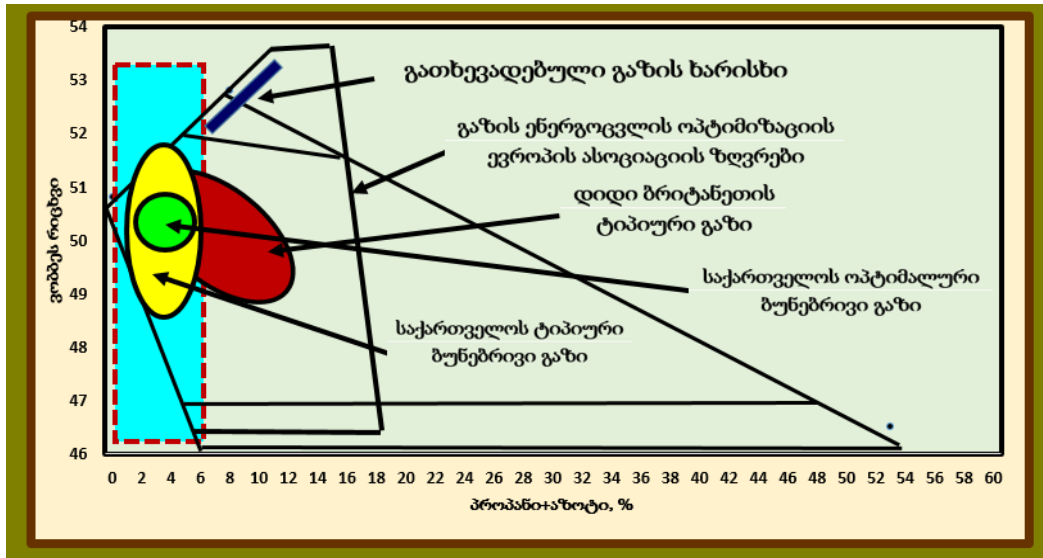
ნახ. 69. პროპანისა და აზოტის ექვივალენტობის ჯამური ოდენობის დინამიკური მწკრივების ჰისტოგრამები (აზერბაიჯანი და რუსეთი)

საბოლოოდ, ყველა აღნიშნული მონაცემის სრული სურათის მისაღებად, მოყვანილია ნახ. 70-ზე, ვობეს რიცხვის დიაგრამა.

პირველ რიგში, მოვახდინოთ ჩვენს მიერ აღნიშნული თბოუნარიანობისა და სიმკვრივის დინამიკური მწკრივების სტატისტიკური დამუშავება. მიღებული ცხრილების თანახმად, ვლებულობთ აღნიშნულ დიაგრამას (ნახ. 71).



ნახ. 70. ვობეს რიცხვის დიაგრამა



ნახ. 71. გაზის კრებსითი დიაგრამის შედარება დიდი ბრიტანეთისათვის და საქართველოსათვის

თავი 6. საქართველოში ბუნებრივი გაზის ტარიფის მსოფლიო გამოცდილება და რეკომენდაციები, ვობზეს რიცხვის გათვალისწინებით

ეკონომიკური თანამშრომლობისა და განვითარების ორგანიზაციის - OEEC (Organisation for European Economic Cooperation) ავტონომიური საერთაშორისო ორგანო ენერგეტიკულ უსაფრთხოებას განმარტავს, როგორც „ენერჯის წყაროების შეუფერხებელ ხელმისაწვდომობას ხელმისაწვდომ ფასად“. ენერგოუსაფრთხოებას მრავალი ასპექტი აქვს: გრძელვადიანი ენერგეტიკული უსაფრთხოება ძირითადად ეხება დროულ ინვესტიციებს ენერჯის მიწოდების მიზნით, ეკონომიკური ცვლილებებისა და მდგრადი გარემოსდაცვითი საჭიროებების შესაბამისად. მოკლევადიანი ენერგეტიკული უსაფრთხოება ფოკუსირებულია ენერგოსისტემის უნარზე სწრაფად მოახდინოს რეაგირება მოთხოვნისა და მიწოდების ბალანსის უეცარ ცვლილებებზე. ამრიგად, ენერგოუსაფრთხოების არარსებობა დაკავშირებულია ნეგატიურ ეკონომიკურ და სოციალურ შედეგებთან ფიზიკური მიუწვდომლობის, არაკონკურენტული ფასების ან ზედმეტად არასტაბილური ფასების გამო [89].

ბოლო დროს, იზრდება მსოფლიო ენერგეტიკული ბაზრის უმსხვილეს წარმომადგენლებს შორის წინააღმდეგობები მისი განვითარების მთავარ საკითხებზე, კერძოდ, ისეთ საკითხებზე როგორც ნახშირწყალბადების ტრანსპორტირების ახალი მარშრუტების გაყვანის მიმართულებები, ნახშირწყალბადების მარაგების მიმართულებები და მოცულობები, ტრანსნაციონალური კომპანიების ბაზარზე დაშვების პირობები და მრავალი სხვა. უფრო მეტიც, ხშირად ეს პრობლემები გარდაიქმნება კორპორატიულ სიბრტყეში, სახელმწიფოთაშორისი პრობლემების კატეგორიაში, მსოფლიო ეკონომიკისთვის მთელი თავისი უარყოფითი შედეგებით. ამ დრომდე, მსოფლიო საზოგადოებამ ვერ იპოვა ენერგეტიკის სექტორში საერთაშორისო დავების გადაწყვეტის ერთიანი დაეფექტური მექანიზმი.

ენერჯის საფასურის ზრდამ და სხვადასხვა ხარისხის გაზების გამოჩენამ განაპირობა ის, რომ გაზის ინდუსტრიაში გაანგარიშებები ხდება თბური ენერჯის

გაზომვით. თავის მხრივ, წვის სითბოს გაზომვის მოთხოვნამ განაპირობა არაერთი შესაბამისი მეთოდის გაჩენა. თუმცა, პროცედურები, რომლების საშუალებით ხდება წვის სითბოს მონაცემების და ბუნებრივი გაზის მოცემულ მოცულობაში ენერჯის ოდენობის განსაზღვრა, არ არის საკმარისად სტანდარტიზებული.

ენერჯის განსაზღვრის წინაპირობაა ბუნებრივი გაზის პარამეტრების გაზომვები, დაწყებული მოპოვებისა და გადამუშავების ოპერაციებიდან - საბოლოო მომხმარებლის მიერ გაზის მოხმარებამდე. გაზის მოპოვებასთან, ტრანსპორტირებასთან და განაწილებასთან დაკავშირებული პრობლემების გადასაჭრელად აქტუალური რჩება, ბუნებრივი გაზის ენერჯის გაზომვის სტანდარტიზებული მეთოდის შემუშავების პრობლემა [90,91].

ისტორიულად, მსოფლიო ნავთობისა და გაზის ინდუსტრიაში გამოყენებულია ორი გაზომვის სისტემა: SI ერთეულის სისტემა (ან მეტრული სისტემა) და ე.წ. "ნავთობის საბადოს" ერთეულების სისტემა, რომელიც შეიქმნა აშშ-ს ნავთობისა და გაზის ინდუსტრიის განვითარებისას და დაფუძნებულია ბრიტანული ერთეულის სისტემაზე [92].

აუცილებელია აღინიშნოს ბუნებრივი გაზის რაოდენობის საზომი ერთეულების თავისებურებები. ამ მიზნით, თითქოს უმარტივესი გზაა მასის ერთეულების (კგ ან ტ) გამოყენება. თუმცა, ისტორიულმა და ტექნიკურმა მიზეზებმა განაპირობა ის, რომ ბუნებრივი გაზის რაოდენობა იზომება მოცულობის ერთეულებში (m^3) [92].

XIX საუკუნის დასაწყისიდან, ჯერ განათების, ხოლო შემდეგ ბუნებრივი გაზის ყიდვა-გაყიდვის გაზომვა პრაქტიკულად ხდებოდა გაზის მოცულობით. აქედან გამომდინარე, დიდი დრო და ძალისხმევა დაიხარჯა გაზის მოცულობითი ხარჯის გაზომვის მეთოდების შემუშავებაზე.

თუმცა, სხვადასხვა წნევის დროს თანაბარი მოცულობები შეიცავს ბუნებრივი გაზის სხვადასხვა მასას, რომელიც შეიცავს სხვადასხვა თბურ ენერჯიას. ამიტომ დაიწყო ბუნებრივი გაზის რაოდენობის გაზომვა ე. წ. ნორმალურ კუბურ მეტრებში, ანუ ნორმალურ პირობებში მიყვანა (ტენიანობის ნაკლებობა, ტემპერატურა $0^{\circ} C$ და წნევა 1 ატმ). უმეტეს შემთხვევაში კუბური მეტრის წინ სიტყვა „ნორმალური“ გამოტოვებულია, მაგრამ შესრულებისას და გაანგარიშებისას ყოველთვის უნდა გახსოვდეთ, რომ მათზეა საუბარი [92].

იმის გამო, რომ ბუნებრივი გაზი სხვადასხვა საბადოებში (ან სხვადასხვა ჭაბურღილებიც) ყოველთვის განსხვავდება შემადგენლობით, ხოლო მოწყობილობა, რომლებიც გამოიყენება გაზის წვისთვის, წარმოებულია წვის სითბოსა და ინტენსივობის გარკვეული სტანდარტების მიხედვით, ძალიან მნიშვნელოვანი ფაქტორი ხდება სხვადასხვა ბუნებრივი გაზის „გათანაბრება“ ერთ სტანდარტზე.

British Petroleum-ის (BP) სტატისტიკურ მიმოხილვებში, გაზის მოცულობები მიყვანილია წვის სითბოს 37,97 მჯ/მ³-მდე, ჰოლანდია იყენებს გაზს წვის სითბოთი 35,17 მჯ/მ³, ე.წ. გრონინგენის ეკვივალენტს. გერმანიაში, მაგალითად, გაზი ითვლიან კვტ-ში, დიდ ბრიტანეთში - თერმით. მომხმარებელი იხდის არა კუბურ მეტრები, არამედ ენერჯის იმ რაოდენობას, რომელსაც იღებს (ცხრილი 37) [91].

ცხრილი 37. ბუნებრივი გაზის მოცულობების ეკვივალენტური მახასიათებლები

წყარო		1000 მ ³ გაზის ეკვივალენტი				
		მვტ/სთ	ათ.მჯ	ათ.კვალ	მლნ.Btu	თერმი
BP	დიდი ბრიტანეთი	10,55	37,97	9069	35,99	359,86
Gasunie	ჰოლანდია	9,77	35,17	8400	33,33	333,33
Statiol	ნორვეგია	11,11	40,00	9554	37,91	379,11
Газпром	რუსეთი	10,29	37,04	8848	35,11	351,09

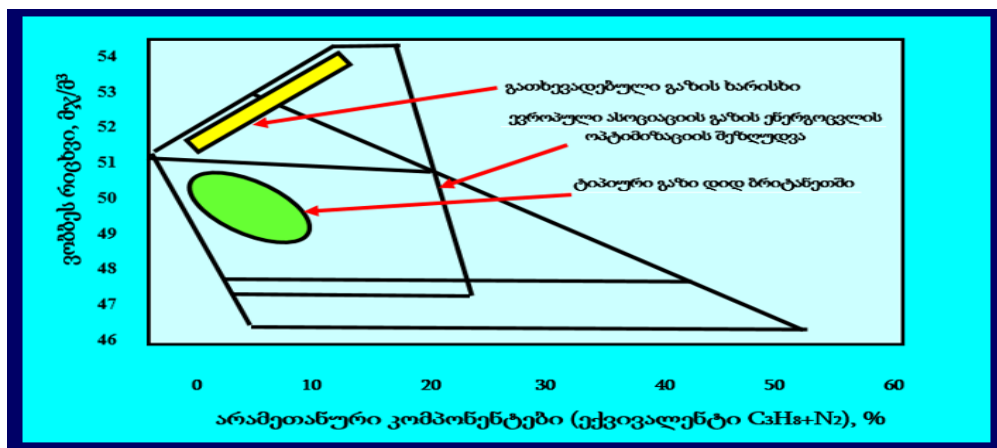
არსებული საწვავი გაზების თვისებები მნიშვნელოვნად განსხვავდება. საწვავი გაზების უმეტესობა წარმოადგენს წვადი და არაწვადი გაზების ნარევის, წვის კომპონენტების უპირატესობით: ნახშირწყალბადი, წყალბადი და ნაკლებად ნახშირბადის მონოქსიდი.

ბუნებრივი გაზი, ნავთობის (თანმდევი) გაზი და ტექნიკური პროცესების ნარჩენი აირები, მაგალითად, კოქსის გაზი, აფეთქების ღუმლის გაზი და ა.შ. ჩვეულებრივ გამოიყენება აირისებრ საწვავად.

არანახშირწყალბადის მინარევები (ძირითადად აზოტი და ნახშირორჟანგი) ამცირებს გაზის წვის კუთრ სითბოს, ამიტომ გაზის ინდუსტრიაში არსებობს ისეთი კონცეფცია, როგორცაა გაზების ურთიერთჩანაცვლება, რომელიც

კონტროლდება რამდენიმე პარამეტრით. მათგან ყველაზე მნიშვნელოვანი არის ვობბეს რიცხვი. ამ ინდექსის ფიზიკური მნიშვნელობა იმაში მდგომარეობს, რომ თანაბარი წნევის პირობებში ერთნაირი ვობის რიცხვის მქონე საწვავი გაზები იძლევიან ერთნაირ ენერგიას (ენერგიის ნაკადს).

დიდ ბრიტანეთში, აირების ურთიერთჩანაცვლების თვალსაზრისით გამოიყენება შემდეგი დიაგრამა, კერძოდ გავიხსენოთ ნახ. 60-ზე მოყვანილი დიაგრამა. ორდინატზე არის ვობის რიცხვი, ხოლო აბსცისა არის პროპანისა და აზოტის ეკვივალენტების ჯამი [93].



ნახ. 72. ტიპიური გაზის ხარისხი

როგორც ხედავთ, ნებადართული გაზის პარამეტრების ცვალებადობა საკმაოდ დიდია (არეალი „მისაღები დიაპაზონი“) (ნახ. 72). ვობბეს რიცხვი 46,5-დან 51 მჯ/მ³-მდეა, ხოლო პროპანისა და აზოტის ეკვივალენტური რაოდენობა 0%-დან 45%-მდე. აზოტის მაღალი შემცველობის გაზი აუცილებელ ჩარჩოებში რჩება მძიმე ნახშირწყალბადების გამო, რომელსაც გააჩნია მაღალი წვის სითბო. გაზი, რომელიც არ აკმაყოფილებს ამ პარამეტრებს, მუშავდება და იწმინდება საჭირო დონეზე. გაზის გაწმენდა ხდება საბადოებში და საჭირო ხარისხის გაზი მიეწოდება მაგისტრალურ გაზსადენებში.

რეალურად, გაზის ხარისხი იცვლება უფრო მოკრძალებულად დიაპაზონში. მწვანე ლაქა მოცემულ დიაგრამაზე მიუთითებს დიდი ბრიტანეთის გაზის ტიპიურ ხარისხზე. გრაფიკიდან ჩანს, რომ ფარგლები შესაძლოა იყოს პროპანის და აზოტის 15% ჯამური ეკვივალენტისა, საიდანაც აზოტი არის დაახლოებით 4%. გათხევადული ბუნებრივი გაზი მონიშნულია ყვითელი ზოლით, რომლის

თბოუნარიანობა, როგორც ჩანს, გაცილებით მაღალია, ვიდრე დასაშვებია დიდ ბრიტანეთში, ამიტომ, ჩვეულებრივ, მას აზავებენ აზოტით, 2-5% ოდენობით, უშუალოდ რეგაზიფიკაციის ტერმინალში. ისე რომ ნარევი იყოს პროცესის ფარგლებში (საჭირო დიაპაზონში).

რუსეთში გაზის მიწოდება იზომება კუბურ მეტრში, ამიტომ გაზის კომპანიებს ძალიან ხშირად სჭირდებათ წვის სითბოს მნიშვნელობის მოცულობაზე გადასაანგარიშებელი კოეფიციენტის გამოყენება.

მაგალითისთვის, ქვეყნის უზარმაზარ ტერიტორიაზე მიმოფანტული სხვადასხვა საბადოებში რუსული ნავთობი სრულიად განსხვავებული ხარისხისაა. ყველაზე ძვირი ეგრეთ წოდებული „მსუბუქი“ იწარმოება დასავლეთ ციმბირში - გოგირდის მინიმალური შემცველობით, ხოლო ურალისა და ვოლგის რეგიონი, ძირითადად არის "მძიმე" სორტები ჭარბი გოგირდით, რომლებიც ბაზარზე გაცილებით ნაკლებად ღირებულია. ნავთობსადენებში (მათ შორის გადასატუმბი ნედლეულის ექსპორტისთვის) ყველა სორტის ნავთობი შერეულია და გამომავალი არის ურალის ე.წ. "ყოველრუსული" ნარევი. ამრიგად, ნებისმიერი ხარისხის ნავთობის ბარელზე რუსული კომპანიები იღებენ იგივე ფასს - ბარელი Urals ნარევის ფასს.

რუსეთში ნავთობის ხარისხის ბანკის შექმნის კონცეფცია, ფაქტობრივად, ნავთობის მწარმოებელი კომპანიებისთვის ჯარიმებისა და კომპენსაციის გადახდის მექანიზმია, რაც დამოკიდებულია ნავთობსადენის სისტემაში მიწოდებული ნავთობის ხარისხზე. აშკარაა, რომ ნებისმიერი პროდუქტი ღირს იმდენი, რამდენიც ღირს. ამიტომ, იმ კომპანიებს, რომლებიც მილსადენში ტუმბავენ უხარისხო ნავთობს, მოუწევთ სხვა კომპანიებისთვის მიყენებული ზიანის გადახდა. ამგვარად, ხარისხის ბანკი შექმნილია არსებული უსამართლობის აღმოსაფხვრელად - დაბალი ხარისხის (ბლანტი, ზედმეტი მინარევების მაღალი შემცველობით, პირველ რიგში გოგირდის) ნედლეულის მომწოდებლებს მოუწევს გადაიხადონ ერთგვარი დამატებითი „გადასახადი“.

ყველაფერი იგივე ანალოგიურია ბუნებრივ გაზთან დაკავშირებითაც - პირველ ეტაპზე „გაზპრომის“ კონკურენტები გეგმავენ გაზის მიწოდებას აღმოსავლეთ ციმბირისა და შორეული აღმოსავლეთის ახალი საბადოებიდან.

ისინი ასევე ითხოვენ ახალი გაზსადენების აშენების უფლებას, რომლებიც დაკავშირებული იქნება „გაზპრომის“ გაზის გადამცემ სისტემასთან.

რუსეთში გაზის წარმოების ბალანსი „გაზპრომის“ სასარგებლოდ ჯერ კიდევ ყალიბდება. ენერგეტიკის სამინისტროს ინფორმაციით, 2014 წელს ბუნებრივი და ნავთობის თანმდევი გაზის წარმოება განხორციელდა 258 მწარმოებელი კომპანიის მიერ, მათ შორის 97 არის ვერტიკალურად ინტეგრირებული ნავთობკომპანიის სტრუქტურის ნაწილი, 16 კომპანია „გაზპრომიდან“, 2 ПАО „HOBATЭK“-დან, 140 არის დამოუკიდებელი მწარმოებელი კომპანია და 3 კომპანია არის წარმოების ოპერატორების ხელშეკრულებების საფუძველზე მომუშავე [95].

„გაზპრომის“-თვის ასევე წამგებიანია მილსადენზე წვდომის გაფართოება დისპეტჩერიზაციის გამო: რაც უფრო მეტია გაზის ამოტუმბვაზე მომუშავე სხვა კომპანიები, მით უფრო რთულია ტექნოლოგიურად ყველა კონკურენტის ინტერესების გათვალისწინება. ასევე, უნდა მოხდეს გაზის ხარისხის მონიტორინგი, წინააღმდეგ შემთხვევაში მილსადენში გაზის საერთო ხარისხი შეიძლება გაუარესდეს არაკეთილსინდისიერი მომწოდებლების გამო.

ამრიგად, ენერჯის სახით გაზის მოხმარების გაზომვის მეთოდი შეიძლება ჩაითვალოს უფრო პერსპექტიული და უნივერსალური.

ენერჯის ზუსტი განსაზღვრის მისაღწევად, აუცილებელია, რომ გაზის მოცულობა და მისი წვის სითბო განისაზღვროს ერთი სტანდარტის პირობებში. ენერჯია განისაზღვრება კონკრეტული პერიოდის განმავლობაში მიღებული წვის სითბოს მნიშვნელობებისა და გატარებული გაზის მოცულობის თანმიმდევრობით მიღებული გამოთვლების შედეგების დაგროვებით, ან გაზის სრული მოცულობის გამრავლებით ამ პერიოდისთვის წვის სითბოს წარმომადგენლობით (მინიჭებულ) მნიშვნელობაზე.

ნაკადის და წვის სითბოს დასადგენად გამოყენებული მეთოდები უნდა შეესაბამებოდეს სტანდარტებს, სახელშეკრულებო პირობებს და ეროვნულ კანონმდებლობას.

სისტემატური შეუსაბამოების გამოსავლენად და მათ გასათვალისწინებლად, უნდა იქნას მიღებული ზომები მაგალითად, სხვადასხვა ეროვნული სტანდარტების, ნორმების და/ან ოპერაციული პროცედურების გამოყენებამ

შეიძლება გამოიწვიოს სისტემატური შეუსაბამობები; მხარეებმა უნდა გამოავლინოს შესაბამისი საშუალებები ამ განსხვავებების დასაძლევად.

ბუნებრივი გაზის გადაცემა ჩვეულებრივად ხდება გაზის მწარმოებელი კომპანიისგან ან გაზსაცავიდან საბოლოო მომხმარებელამდე შუალედური ეტაპებით, რომლებიც მოიცავს ზოგიერთ ან ყველა ქვემოთ ჩამოთვლილს:

- * გაზოტრანსპორტირების ორგანიზაცია;
- * რეგიონალური გაზგამანაწილებელი კომპანია;
- * ადგილობრივი გაზგამანაწილებელი კომპანია.

ხელშეკრულების მხარეებს შორის მიწოდების ჯაჭვში ენერჯის განსაზღვრა ხდება მიღება-გადაცემის პუნქტებში, რომლებსაც ხშირად გადაცემის წერტილსაც უწოდებენ. ენერჯის განსაზღვრის მეთოდი დამოკიდებულია მთელ რიგ მნიშვნელოვან ფაქტორებზე, რომლებიც გასათვალისწინებელია ენერჯის განსაზღვრის მეთოდის შესერჩევისას და მისი სწორად გამოყენებისას.

ენერჯის პირდაპირ გაზომვებში ინდივიდუალური ფიზიკური პარამეტრები (მაგალითად, წვის სითბო და გაზის მოცულობა) არ იზომება. ენერჯის მოხმარება და მისი რაოდენობა კალიბრირებულია და აღირიცხება გაზომვის ადგილზე. ამჟამად ბაზარზე დაიწყო ენერჯის პირდაპირი გაზომვის მრიცხველების შემოსვლა, მაგრამ მათი გამოყენება არ არის გაზის გადაცემის დადასტურებული ტექნოლოგია.

გაზის აღრიცხვის სადგურზე ენერჯის ირიბი განსაზღვრისას ცალკე იზომება გაზის მოცულობა ან მასა, წვის სითბო და დამატებითი ფიზიკური სიდიდეები, როგორცაა ნახშირორჟანგის შემცველობა, სიმკვრივე და ა.შ. მოცულობის ხარჯი და ენერჯია ჩვეულებრივ აღირიცხება გაზომვის ადგილზე.

გაზომვის მოწყობილობაში გასული გაზის ენერჯის განსაზღვრა ეფუძნება მნიშვნელობებს, რომლებიც იცვლება დროთა განმავლობაში:

- * მიმდინარე ხარჯი - $q(t)$;
- * მიმდინარე წვის სითბო - $H(t)$

$$e(t) = H(t)q(t), \quad (102)$$

ენერჯის ნაკადი $e(t)$ გამოითვლება დიფერენციალური განტოლების გამოყენებით

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{q}(t), \quad (103)$$

ენერგიის რაოდენობა $\mathbf{E}(t_j)$, რომელიც გადის t_0 -დან t დროის განმავლობაში (მაგალითად, ენერგიის განსაზღვრის პერიოდში) გამოითვლება (1) განტოლების ინტეგრირებით დროთა განმავლობაში t_0 -დან და t_j -მდე და იძლევა $\mathbf{E}(t_j)$ -ს, როგორც განტოლებაში:

$$\mathbf{E}(t_j) = \int_{t_0}^{t_j} \mathbf{e}(t) dt = \int_{t_0}^{t_j} \mathbf{H}(t)\mathbf{q}(t) dt. \quad (104)$$

ენერგიის განსაზღვრის საუკეთესო მეთოდოლოგია ითვალისწინებს წვის სითბოს დროებით ტენდენციებს, მიწოდების სიტუაციიდან გამომდინარე, და გაზომილი მონაცემების (ანუ დაუმაშავებელი მონაცემების) სიზუსტეს კონკრეტულ მიღება-გადაცემის წერტილში.

მიღებისა-გადაცემის პუნქტში გაზის ხარისხის ცვლილების გათვალისწინება საკვანძო ფაქტორია ენერგიის დადგენის მეთოდისა და მისი სიზუსტის დასაბუთებაში, ანუ წვის სითბოს განსაზღვრის მიკვლევადობა მიღება-გადაცემის გარკვეულ წერტილში.

თავიდან უნდა იქნას აცილებული ენერგიის განსაზღვრის შეუსაბამო მეთოდოლოგიის გამოყენება, რადგანაც ეს შეიძლება იყოს მხარეების საზიანო კონტრაქტი (ან ერთ-ერთი მხარისთვის). ეს შეიძლება მოხდეს, მაგალითად, არაწარმომადგენლობითი წვის სითბოს ან სხვა ფიზიკური სიდიდის გამოყენებისას (მაგ., სიმკვრივე, ნახშირორჟანგის შემცველობა) გადაცემის ისეთ წერტილში, სადაც იზომება მხოლოდ გაზის მოცულობა.

ამრიგად, ენერგიის ღირებულების ზრდამ და სხვადასხვა ხარისხის გაზების გამოჩენამ განაპირობა ის, რომ მთელ მსოფლიოში დაიწყო წვის სითბოს ენერგიის გაზომვა. ამასთან, პროცედურები, რომლების საშუალებით ხდება წვის სითბოს მონაცემების და ბუნებრივი გაზის მოცემულ მოცულობაში ენერგიის ოდენობის განსაზღვრა - არასაკმარისად სტანდარტიზებულია. ენერგიის განსაზღვრა (დამოუკიდებლად იმისა თუ სად ხდება დროში და ადგილზე) და ბუნებრივი გაზის პარამეტრების გაზომვები (დაწყებული წარმოებისა და გადამამუშავებელი ოპერაციებით) - უნდა მოხდეს საბოლოო მომხმარებლის მიერ გაზის მოხმარებამდე.

ენერჯის განსაზღვრა, როგორც წესი, წინაპირობაა ბუნებრივი გაზის პარამეტრების გაზომვის დროისა და ადგილის მიუხედავად, წარმოებისა და გადამუშავების ოპერაციებიდან დაწყებული, საბოლოო მომხმარებლის მიერ გაზის მოხმარებამდე. საბოლოო მომხმარებლისთვის, გაზის მოპოვებასთან, ტრანსპორტირებასთან და განაწილებასთან დაკავშირებული პრობლემების გადასაჭრელად აქტუალური რჩება ბუნებრივი გაზის ენერჯის გაზომვის სტანდარტიზებული მეთოდის შემუშავების საკითხი.

ერთმანეთისგან განსხვავებული გაზების შედარების მიზნით, იყენებენ გაზის ფარდობითი სიმკვრივის ცნებას, რომელიც არის გაზის სიმკვრივის თანაფარდობა ნორმალურ პირობებში (0°C , 101325 პა) ჰაერის ანალოგიური სიმკვრივის მიმართ, სადაც, $\rho = \rho_G / \rho_H$ და ρ_G , ρ_H , არის გაზისა და ჰაერის სიმკვრივეები ნორმალურ პირობებში. ბუნებრივი გაზის სიმკვრივე ნორმალურ პირობებში შეადგენს 0,7-დან 1,0 კგ/მ³-მდე [5].

ვობზეს რიცხვი არის მოცულობითი წვის სითბო (ე.ი. რამდენ ჯოულსაც გამოიმუშავებს ერთი კუბური მეტრი გაზი) შეფარდებული გაზის ფარდობითი სიმკვრივის კვადრატულ ფესვზე.

$$W = \frac{Q}{\sqrt{\rho}}. \quad (105)$$

როგორც აღვნიშნეთ, ამ ინდექსის ფიზიკური მნიშვნელობა ის არის, რომ თანაბარი წნევის დროს ერთნაირი ვობის რიცხვის მქონე საწვავი გაზები იძლევიან ერთნაირ ენერჯიას, განზომილება - მჯ/მ³ (ე.ი. მრიცხველი განზომილებიანია).

მსოფლიო პრაქტიკაში, აირების შესაძლო ურთიერთჩანაცვლადობის შეფასება ხორციელდება შემდეგი გზით: 1. ექსპერიმენტულად, ექსპერიმენტულ ეტალონურ სანთურებში სხვადასხვა საწვავი გაზების წვის მახასიათებლების შედარება 2. ანალიზურად.

ჩვენ განასხვავთ ყველაზე მაღალ და დაბალ ვობზეს რიცხვს. მისი დახმარებით მოსახერხებელია კომპლექსურად გაზის თბოუნარიანობის მნიშვნელობისა და სიმკვრივის რთული ეფექტის კონტროლი.

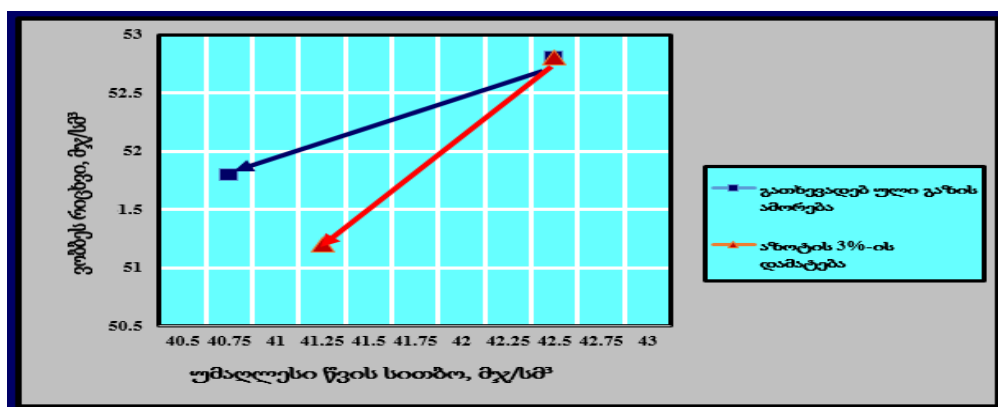
თუ საჭიროა ვობზეს რიცხვის მნიშვნელოვანი ცვლილება, შეიძლება უფრო ეფექტური იყოს აზოტის დამატება, ვიდრე გათხევადებული გაზის აღდგენა. აშშ-ს

ეროვნული სტანდარტები მილსადენური გაზის ხარისხი იძლევა 3%-მდე (მოლი) დაშვებას. ხშირ შემთხვევაში აზოტს არ უმატებენ. ის ბუნებრივ გაზში იმყოფება და ზოგჯერ მისი კონცენტრაცია 5%-საც აღემატება. ხოლო ხანდახან კონცენტრაცია შეადგენს დაახლოებით 4%-ს 1 ტონა პროდუქტზე. ერთ საათში აზოტის კონცენტრაციის 1%-ით ზრდით, იმისთვის, რომ აზოტი დარჩეს გათხევადებულ გაზში, საჭიროა მხოლოდ მისი გაგრილება, რაც ხარჯების გაზრდას მოითხოვს. [96].

ცხრილი 38 და ნახ. 73 გვიჩვენებს გათხევადებულ გაზში, ამოღებისა და აზოტის დამატების გავლენას უმაღლეს წვის სითბოზე.

ცხრილი 38. გათხევადებული გაზის ამოღებისა და აზოტის დამატების გავლენა უმაღლეს წვის სითბოზე

პარამეტრი	უმაღლესი წვის სითბო	გათხევადებული გაზის ამოღება	აზოტის დამატება 3%-ით
გათხევადებულ გაზის უმაღლესი წვის სითბო მჯ/მ ³	42,4	40,6	41,4
გათხევადებული გაზის ვობბეს რიცხვი, , მჯ/მ ³	52,9	51,9	51,4



ნახ. 73. გათხევადებული ბუნებრივი გაზის ამოღება

განვიხილოთ რუსული ნორმებსა და სტანდარტების მოთხოვნები გაზების ხარისხზე ГОСТ 5542-97 "ბუნებრივი საწვავი გაზები, სამრეწველო და კომუნალური მიწნებისთვის. ტექნიკური პირობები". აალებადი გაზების ფიზიკურ-ქიმიური მახასიათებლები უნდა შეესაბამებოდეს ცხრილ 39-ში

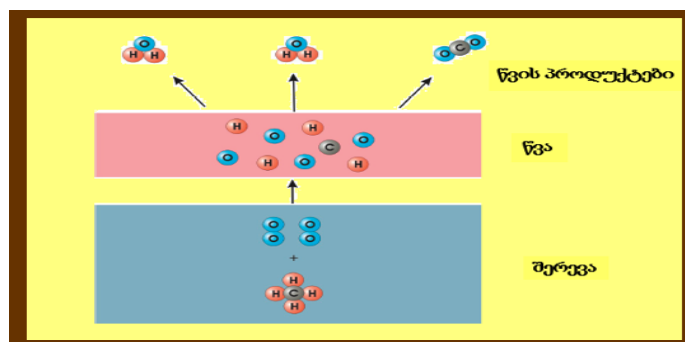
მოცემულ მოთხოვნებს და ნორმებს [97]. ვობბეს რიცხვის მნიშვნელობების არე, მჯ/მ³ (კვალ/მ³)

ცხრილი 39. ბუნებრივი გაზის მახასიათებლების ნორმირება (ГОСТ 5542-87)

მახასიათებლის დასახელება	ნორმა
უდაბლესი წვის სითბო, მჯ/მ ³ (კვალ/მ ³), 20 ⁰ C ტემპერატურისა და არანაკლებ წნევაზე 101,3 კპა	31,8 (7600)
ვობბეს რიცხვის მნიშვნელობების არე, მჯ/მ ³ (კვალ/მ ³)	41,2 ÷ 54,5 (9850 ÷ 13000)
ვობბეს რიცხვის დასაშვები გადახრა, მჯ/მ ³ (კვალ/მ ³)	± 5
წყალბადიგორგიდის კონცენტრაცია, გ/მ ³ , არა ნაკლები	0,03
ჟანგბადის მოცულობითი წილი, %, არა ნაკლები	1.0
მექანიკური მინარევების მასა, გ/მ ³ , არა ნაკლები	0,001

გაზისებრი საწვავის წვა არის ფიზიკური და ქიმიური პროცესების ერთობლიობის შედეგი (ნახ. 74):

- * გაზის შერევა ჰაერთან;
- * ნარევის გაცხელება;
- * წვადი კომპონენტების თერმული დაშლა
- * აალება;
- * წვადი ელემენტების ქიმიური კომბინაცია ატმოსფერულ ჟანგბადთან, რომელსაც თან ახლავს ჩირადნის წარმოქმნა (ალი);
- * ინტენსიური სითბოს გამოყოფა.



ნახ. 74. მეთანის წვის სქემა

ასე რომ, ჰაეროვანი ნარევის წვის პროცესისთვის აუცილებელია, რომ გაზის რაოდენობა ჰაერში, ჰაეროვან ნარევი იყოს გარკვეულ ფარგლებში. ამ ზღვრებს უწოდებენ წვის აალებად ან ფეთქებად ზღვრებს. განასხვავებენ აალებადობის ქვედა და ზედა ზღვარს. გაზჰაეროვან ნარევი გაზის მინიმალურ შემცველობას, გამოხატულს მოცულობის პროცენტებში, რომლის დროსაც ხდება აალება, ეწოდება აალებადი ქვედა ზღვარი. გაზის მაქსიმალურ შემცველობას გაზ-ჰაეროვან ნარევი, რომლის ზევით ნარევი არ აალებდა, დამატებითი სითბოს მიწოდების გარეშე, ეწოდება აალებადი ზედა ზღვარი.

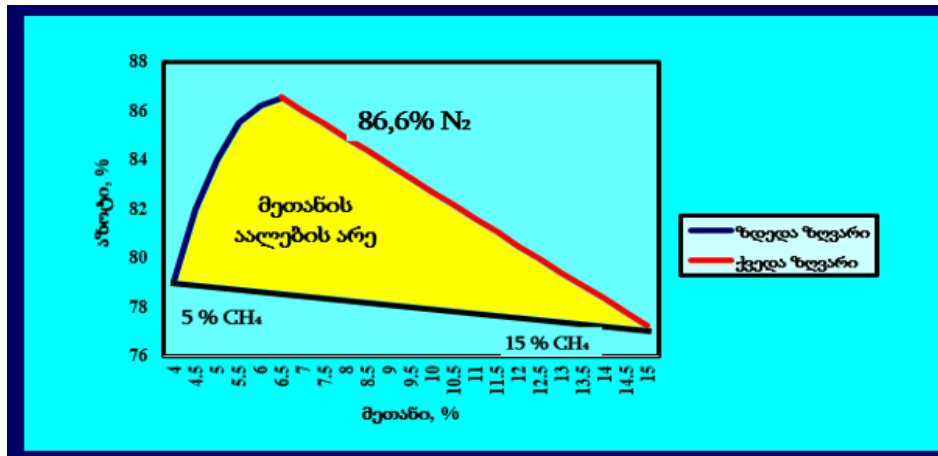
თუ აალებადობის ქვედა ზღვარზე ნაკლებია მაშინ ის არ დაიწვება. გაზ-ჰაეროვანი ნარევი დამოკიდებულია წნევაზე.

გაზებში ინერტული მინარევები დიდ გავლენას ახდენს ფეთქებადი ზღვრების მნიშვნელობებზე. გაზის შემცველობის მატება ბალასტის გარეშე (N_2 და CO_2) ავიწროებს აალებად ზღვრებს და როდესაც ბალასტის შემცველობა გარკვეულ ზღვრებს გადააჭარბებს, გაზ-ჰაეროვანი ნარევი არ აალებდა გაზ-ჰაეროვანი ნარევის ნებისმიერი თანაფარდობით. გრაფიკზე (ნახ. 75) ნაჩვენებია მეთანის აალებადი საზღვრების ცვლილებები, რაც დამოკიდებულია მეთან-ჰაეროვანი ნარევი აზოტის შემცველობაზე. ჰაერში აზოტის შემცველობის 86,6%-მდე მატებით, გაზ-ჰაეროვანი ნარევი წყვეტს აალებას [98].

ეს იმიტომ ხდება, რომ აზოტის ასეთი მნიშვნელოვანი რაოდენობის გაცხელება აალებად წერტილამდე მოითხოვს მნიშვნელოვან რაოდენობას სითბოს. ხოლო გაზ-ჰაეროვანი ნარევი, რომელიც შეიცავს 86,6%-ს წვის დროს, ვერ გამოყოფს საკმარის სითბოს, და ამიტომ არ იწვის.

დაახლოებით 30 წლის წინ, დასავლეთ ციმბირის ნავთობოგაზური რეგიონი გახდა ლიდერი ქვეყანაში ნავთობისა და გაზის მოპოვების თვალსაზრისით. ამჟამად აქ იწარმოება რუსული ნავთობისა და გაზის კონდენსატის 66% და ბუნებრივი გაზის 92% [99]. საწვავ-ენერგორესურსების წლიური მოხმარება მსოფლიოში 14 მლრდ. ტონაზე მეტი პირობითი საწვავია, საიდანაც 35% ნავთობია და 25,5-ზე მეტი ბუნებრივი გაზი. ნავთობისა და გაზის ჯამური მარაგი დასავლეთ ციმბირის ჩრდილოეთში შეადგენს ამ სახის საწვავ-ენერგეტიკული რესურსების რეზერვების მეოთხედზე მეტს და საშუალებას

მისცემს დასავლეთ ციმბირის ნავთობისა და გაზის პროვინცია დარჩეს წამყვანი დარგი რუსეთში, რამდენიმე ათეული წლის განმავლობაში (ცხრილი 40).



ნახ. 75. მეთანის აალების ზღვრების ცვლილების გრაფიკი მეთან-ჰაეროვან ნარევეში აზოტის შემცველობის ცვლილების შესაბამისად

ცხრილი 40. სხვადასხვა საბადოების გაზის შემადგენლობა

შემადგენლობა	სამოტლორის	ვარიოგანსკოე	აგანსკოე	სოვეტსკოე
CO_2	0,59	0,69	0,5	1,02
N_2	1,48	1,51	1,53	1,53
CH_4	60,64	59,33	46,94	51,89
C_2H_6	4,13	8,31	6,89	5,29
C_3H_8	13,05	13,51	17,37	15,37
IC_4H_{10}	4,04	4,05	4,47	5,02
nC_4H_{10}	8,6	6,65	10,84	10,33
IC_5H_{12}	2,52	2,2	3,36	2,99
nC_5H_{12}	2,65	1,8	3,88	3,26

სსრკ-ს დაშლის დროს, აზერბაიჯანი ფლობდა ყველაზე სერიოზულ და შესწავლილ სარესურო პოტენციალს კასპიის ზღვის ზონაში, იმის გამო, რომ ნახშირწყალბადების სამრეწველო წარმოება ამ რეგიონში თითქმის ორი საუკუნის განმავლობაში ხდებოდა. 1990-იანი წლების დასაწყისში რესპუბლიკამ სერიოზული კრიზისი განიცადა ნავთობის ინდუსტრიაში. გამოწვეული ფინანსური რესურსების ნაკლებობითა და „ნავთობის ქვების“ ხმელეთის საბადოებისა და სარეწების გამოფიტვის მაღალი ხარისხით. ამ მხრივ, ძირითადი აქცენტი გაკეთდა ნახშირწყალბადების და ნავთობის წარმოებაზე ზღვაში [100,101].

უმსხვილესი საბადოებიდან გუნშელი, აზერი, ჩირაგი, ყარაბაღი და ა.შ., რამაც საშუალება მისცა რესპუბლიკას 1994 წელს დადო „საუკუნის კონტრაქტი“, რომლის მიხედვითაც აზერბაიჯანი და ბრიტანული კომპანია „ბრიტიშ პეტროლიუმი“ და რუსული კომპანია „ლუკოილი“ გახდნენ მთავარი პარტნიორები. ძირითადი საექსპორტო მარშრუტი გახდა „ბაქო-თბილისი-ჯეიჰანის“ მილსადენი (ნახ. 76).

რესპუბლიკა თავისი ნავთობ-გაზის სექტორის განვითარების ყველაზე დიდ პერსპექტივას უკავშირებს „შაჰ-დენიზის“ გაზოკონდენსატის საბადოს განვითარებას, რომელიც გამოიკვლია 1999 წელს. მისი მთლიანი მარაგი დაახლოებით 1,2 მლრდ. მ³-ს შეადგენს.



ნახ. 76. ა. აზერბაიჯანის ბუნებრივი გაზის მარაგები (ტრლნ. მ³) ბ. აზერბაიჯანის გაზისა და ნავთობის ტრანსპორტირების მარშრუტები

გაზის ყველაზე დიდი მარაგები დაკავშირებულია გაზოკონდენსატურ ბუდობებთან. მაგალითად, ღარადაღის რაიონში ეს მარაგი შეადგენდა 30 მლრდ მ³ გაზი, ბაჰარის რაიონში - 70-80 მლრდ მ³. გაზის მარაგი შაჰ-დენიზის რაიონში დაახლოებით 1 ტრლნ. მ³ -ია. გაზის მნიშვნელოვანი რაოდენობა გვხვდება გუნშელის, აზერის, ჩირაღის რაიონებში, სადაც გაზის მთლიანი მარაგი დაახლოებით 400-500 მლრდ. მ³-ია.

ამ ანალიზის მიხედვით, გაზის შემადგენლობა წარმოდგენილია შემდეგი კომპონენტებით და მათი ზღვრებით:

- 1) ნახშირწყალბადის კომპონენტები: მეთანი 51,0-99,0%, ეთანი 0,14-11,0%, პროპანი 0,04-4,4%, ბუტანი 0,04-3,8%, პენტანი 0,04- 3,3%.
- 2) არასაწვავი გაზები, ნახშირორჟანგი 0-46,0%, აზოტი 0,01-9,0, არგონი 0,001-0,04%.
- 3) მიკრომინარევი: ჰელიუმი 0,0002-0,03%, გოგირდწყალბადი 0-0,5%.

მაგალითისათვის განვივილოთ სამი მძლავრი საბადო (ცხრილი 41). აზერბაიჯანში ბუნებრივი გაზის მოპოვებამ მკვეთრი ზრდა დაიწყო 2006 წლიდან 2010 წლამდე - 4,5 მლრდ მ³-დან 26 მლრდ მ³-მდე. თითქმის მთელი ბუნებრივი გაზი მოიპოვება აზერი-ჩირაგ-გიუნეშლისა და შაჰ-დენიზის საბადოების ორ სდაბადოზე. შაჰ-დენიზის ბუნებრივი გაზისა და გაზის კონდენსატის საბადოს ექსპლუატაცია დაიწყო 2006 წლის ბოლოს, რამაც შესაძლებელი გახადა ქვეყანაში გაზის წარმოების მთლიანი მოცულობის გასამმაგება, რის წყალობითაც აზერბაიჯანი გაზის წმინდა ექსპორტიორი გახდა.

ცხრილი 41. აფშერონის ნახევარკუნძულის საბადოების შემადგენლობა

კომპონენტები	შემადგენლობა (მასა, %)		
	ჩირაღი	ღარაღალი	შაჰ-დენიზი
გოგირდწყალბადი, H ₂ S	0	0	0
აზოტი, N ₂	1,66	0,68	0,64
ჰელიუმი, He	0	0,0001	0,002
ეთანი, C ₂ H ₆	9,5	7,31	8,17
პროპანი, C ₃ H ₈	7,40	4,02	4,57
იზო-ბუტანი, C ₄ H ₁₀	0,86	0,96	1,02
H-ბუტანი C ₄ H ₁₀	1,49	2,13	1,98
იზო-პენტანი, C ₅ H ₁₂	0,67	0,85	0,89
H-პენტანი, C ₅ H ₁₂	0,61	1,11	0,97
იზო-ჰექსანი, C ₆ H ₁₂	0,40	0,93	0,49
H-ჰექსანი, C ₆ H ₁₂	7,20	5,94	4,31
ნარჩენი	7,20	5,94	4,31

აზერი-ჩირაგ-გიუნეშლის საბადოები უზრუნველყოფს აზერბაიჯანის სისტემასთან თანმდევი გაზის მიწოდებას ქვეყანაში შიდა მოხმარებისთვის წყალქვეშა გაზსადენის მეშვეობით ბაქოს მახლობლად მდებარე სანგაჩალის ტერმინალამდე. სანგაჩალის ტერმინალი არის ნავთობისა და გაზის ინტეგრირებული გადამამუშავებელი ტერმინალი, მსოფლიოში ერთ-ერთი უდიდესი ტერმინალი, რომელიც აგროვებს, ინახავს და გადაამუშავებს ნავთობს და ბუნებრივ გაზს აზერი-ჩირაგ-გიუნეშლისა და შაჰ-დენიზის საბადოებიდან და შემდეგ უზრუნველყოფს ამ ნახშირწყალბადების გადაზიდვას. მაგ. სამხრეთ კავკასიის მილსადენით გაზი ექსპორტზე გადის.

დასკვნები და რეკომენდაციები

1. მაგისტრალური გაზსადენების საიმედოობის, ენერგოდაზოგვის და ენერგოეფექტურობის პრობლემის კვლევებისას ავტორმა შემუშავა რეკომენდაციები რომლებიც მოიცავს შემდეგს: გაზსადენების ცალკეული უბნების მტყუნებების შესახებ სტატისტიკური ინფორმაციის საფუძველზე, დამუშავდა დროითი დინამიკური მწკრივები (კერძოდ გაზსადენის შიგა წნევის სიდიდეების სტატისტიკური მწკრივები და ამ სიდიდეების ამოვარდნები), დადგინდა მათი ალბათური მახასიათებლების სიდიდეები და შესაბამის ალბათობის ფუნქციები, რაც საშუალებას გვაძლევს შევაფასოთ მტყუნებების ცვლილებების ტენდენციები. შემუშავდა გაზსადენის (მისი ცალკეული უბნების) ტექნიკური მდგომარეობის შეფასებისა და პროგნოზირების ახალი მეთოდის ფორმირების მექანიზმი, კერძოდ, შესწავლილი იქნა გაზსადენის შიგა წნევის სტატისტიკური მწკრივები და შემუშავდა ამ სიდიდეების ამოვარდნების თეორიაზე დაფუძნებული მეთოდი. მიღებული მეთოდი გვაძლევს მაგისტრალური გაზსადენების პროცესების პროგნოზირების და ნორმატიული მოთხოვნების შესრულების შედეგების ანალიზის საშუალებას, რაც უზრუნველყოფს გაიცეს მაგისტრალური გაზსადენის ექსპლუატაციის პრაქტიკულ რეკომენდაციები და გაახანგრძლევს აღნიშნული ობიექტის დანიშნულ რესურსს.

2. ნაშრომში ჩატარდა მაგისტრალური გაზსადენების გარე და შიგა ფაქტორების გავლენის მოძიება და სტატისტიკური მონაცემების დამუშავება. კერძოდ პირველად შემუშავდა ალბათური მახასიათებლების სიდიდეების და შესაბამის ალბათობის ფუნქციების დადგენა: ბუნებრივი გაზის ფიზიკური სიდიდეები (თბოუნარიანობა, სიმკვრივე, გაზის შემადგენლების კომპონენტების მნიშვნელობები), გაზოდინამიკური ფაქტორები (შიგა წნევა). დადგენილია მათი ალბათური მახასიათებლები და ალბათობის განაწილების ფუნქციები - ნორმალური, ექსპონენციალური და რელეის განაწილებები.

3. პირველად შემუშავებელია სტოქასტიკური მწკრივების ამოვარდნების რაოდენობისა და ამოვარდნების ხანგრძლივობის დადგენის ორიგინალური მეთოდი ნორმალური და რელეის განაწილებისას. კერძოდ, გაზსადენის შიგა

წნევისა და ბუნებრივი გაზის თბოუნარიანობის ამოვარდნების დროს, ამოვარდნების რაოდენობისა და ხანგრძლივობის დადგენა.

4. იდენტიფიცირებულია და გამოვლინდა ისეთი ფაქტორები და კანონზომიერებები, რომლებიც აერთიანებს საექსპლუატაციო მახასიათებლებს მაგისტრალური გაზსადენის საექსპლუატაციო პარამეტრებთან. კერძოდ ბუნებრივი გაზის თბოუნარიანობა, სიმკვრივე, შემადგენლობის ქიმიური ნაერთების ოდენობის სტატისტიკური მახასიათებლები, უშუალო საწვავის წვის ფაქტორების დადგენა, კერძოდ ვობხეს რიცხვთან დაკავშირებით. Q თბოუნარიანობისა და გაზის ρ სიმკვრივეს სიდიდეების ხანგრძლივი პერიოდის მქონე მწკრივების სტატისტიკური დამუშავებისა და მათი ალბათური მახასიათებლების მნიშვნელობების და ფუნქციების შესწავლის საფუძველზე პირველად განხორციელდა ვობხეს რიცხვის არეს დიაგრამის ალგორითმის აგება, რაც საშუალებას გვაძლევს დადგინდეს გაზების ურთიერთანაცვლების ოპტიმალური დიაპაზონი, მათ შორის საქართველოსთვის. აღნიშნული მეთოდი რეკომენდებულია შპს „გაზის ტრანსპორტირების კომპანიისთვის“ ურთიერთანაცვლების დიაგრამის დანერგვისას, რაც შეიძლება გამოყენებულ იქნას წარმოებაში ტიპური ტექნოლოგიური სქემების შემუშავების დროს.

ლიტერატურა

1. Аралов О.В. и др. Определение оптимального времени квалификационных испытаний насосно-силового оборудования. “Трубопроводный транспорт”, 2017, с.12-14.
2. Аралов О.В., Лисин Ю.В. Применение метода количественного прогнозирования отказов оборудования на примере отраслевой системы оценки соответствия . АО «Транснефть», 2017, №10, с. 106-109.
3. Miroslava Gennadevna Glukhova¹, Aleksandr Andreevich Zubarev. Economic Appraisal of the Program of Diagnostics of Main Gas Pipelines. International Journal of Energy Economics and Policy, 2017, №7(2), pp. 316-326.
4. Rafael Amaya-Gómez, Mauricio Sánchez-Silva, Felipe Muñoz. Integrity assessment of corroded pipelines using dynamic segmentation and clustering. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03487165> Submitted on 20 Dec. 2021. უკანასკნელად გადამოწმებულია 18.04.2022.
5. Wang, Q.; Sun, C.; Li, Y.; Liu, Y. Numerical Simulation of Erosion Characteristics and Residual Life Prediction of Defective Pipelines Based on Extreme Learning Machine. Energies 2022, 15, 3750. <https://doi.org/10.3390/en15103750>. უკანასკნელად გადამოწმებულია 18.04.2022.
6. INTEGRITY MANAGEMENT AND LIFE EXTENSION OF AGED PIPELINES Asset integrity engineering January, 2021. <https://www.assetintegrityengineering.com/integrity-management-and-life-extension-of-aged-pipelines/> უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.
7. Как это работает энергетические единицы вместо кубометров газа. <https://lv.104.ua/ru/for-clients/news/id/jak-ce-pracjuje.-energetichni-odinici-zamist-kubom> 21813 . უკანასკნელად გადამოწმებულია 18.04.2022.
8. Ресурсные и экологические ограничения развития мировой энергетики http://www.energystrategy.ru/editions/docs/WB_2050_101-218.pdf უკანასკნელად გადამოწმებულია 24.03.2022.
9. Макаров А., Митрова Т., Кулагин В., Мельникова С., Галкина А. Мировые газовые горизонты до 2040 года. Институт энергетических исследований РАН (ИНЭИ РАН), Газовый бизнес, 2016, №3, сс.21- 28. <https://www.eriras.ru/files/mirovye-gazovye-gorizonty-do-2040-goda.pdf> უკანასკნელად გადამოწმებულია 24.03.2022.
10. Delbourg P. Le controle de la qualite et l’interchangeabilite des gaz. Congres de l’Ass. Tech. de l’Indus. du Gaz 1951.

11. Delbourg P. and Schneck H. Interchangeabilite des gaz de la deuxieme famille. Congres de l'Ass. Tech. de l'Indus. du Gaz 1957.
12. Weaver E.R. Formulas and graphs for representing the inter-changeability of fuel gases. J. res. Nat. Bur. Standards, 1951, №46, pp. 213-245.
13. Knoy M.F. Combustion experimenys with petroleum gases. Gas, 1941, №17, pp.14-19.
14. Knoy M.F Master interhangea ability chart. Gas, 1947, №23, pp. 46-52.
15. The Wobbe Index and Natural Gas Interchangeability. Emerson Process Management, 2007-07-30.
<https://www.emerson.com/documents/automation/white-paper-wobbe-index-natural-gas-interchangeability-ras-en-133638.pdf>
 უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.
16. Sandfort V., Barbara M., Trabold B. and all. Monitoring the Wobbe Index of Natural Gas Using Fiber-Enhanced Raman Spectroscopy. Sensors (Basel), 2017, №17(12): 2714. <https://europemc.org/article/pmc/pmc5753068> უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.
17. Лом У.Л., Уильямс А.Ф. Заменители природного газа. Производства и свойства. Англия. М.: Недра, 1976, с.247.
<https://www.chem21.info/page/130013151202150204103174168056046126018197035136/> უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.
18. Gilbetrt M.G., Prigg J.A. The Prediction of the Combustion Characteristic of Town Gas. Gas Council Res. Comm., 1956, c.35.
19. American Gas Association. IUnterchangeability ofg Various. Fuel Gases with Manufactured Gases. Res. Bull., 1950, №60, Clivlend, Ohio.
20. Holmquist R. Svenska Gasforeningens Arsbok. 1957, pp.35-80.
21. France D.H. U.S and U.K. substitute gas supplies. Energy World, 1974, №11, pp.10-13.
22. Wood D., Mokhatab S. Natural Gas Quality Interchangeability. Increasingly a Fact of Doing Business in Increasingly a Fact of Doing Business in International LNG Trading.
<https://rogtecmagazine.com/wp-content/uploads/2014/10/112.pdf> უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.

23. The Wobbe Index in the H-gas standard and how to include renewable gases in the gas quality standardisation – CEN presentation. Madrid Forum, 5 + 6 June 2019 . CEN SFG Pre-normative study of H-gas quality parameter CEN/TC 234 Gas infrastructure https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/cen_-_gas_quality.pdf უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.
24. CEN SFGAS WORKING Group on Gas Quality. <https://etn.global/policy/cen-sfgas-gqs-wg/> უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.
25. Angewandte Chemie Internat. Edition. 2012, №5, Vol.51, p.1152–1255.
26. Omri Sarig Lecture Notes on Ergodic Theory March 8, 2020. <https://www.weizmann.ac.il/math/sarigo/sites/math.sarigo/files/uploads/ergodicnotes.pdf> უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.
27. Мистрюков А.В., Ушаков В.Г. Достаточные условия эргодичности приоритетных систем массового обслуживания. 2018, № 2, Т.1. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35161779> უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.
28. Бланк М.Л. Строгая эргодичность коллективного случайного блуждания. Доклады Академии наук, 2013, №6, Т.448, с.629-632.
29. Kulinskii V. L., Glavatskiy K. Thermodynamics without ergodicity. November 2018, <https://www.researchgate.net/publication/328899502> უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.
30. Hoagun D.C., Mosteler F. and Tukey J.W. Understanding robust exploratory data analysis. New York, Willey, 2000, 472p.
31. Junyong In, Sangseok Lee. Statistical data presentation, June 2017. https://www.researchgate.net/publication/317262617_Statistical_data_presentation უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.
32. Statistical methods. Statistical data presentation. Part 4. Detection and treatment of outliers. Дата введения 2018-12-01. <http://docs.cntd.ru/document/1200146680> უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.
33. Использование алгоритмов выявления выбросов для изучения неоднородности социально-экономических данных. https://studme.org/120990/matematika_himiya_fizik/ispolzovanie_algoritmov_vyyavl_eniya_vybrosov_izucheniya_neodnorodnosti_sotsialno_ekonomicheskikh_dannyh უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.
34. Формула расчета статистических выбросов с выборкой в EXCEL. <https://exceltable.com/formuly/raschet-statisticheskikh-vybrosov>

უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.

35. Rice S.O. The distraction of the maxima of a random curve. Amer. J. math, 1939, №61, p.409-416.
36. Rice S.O. Mathematical analyses of random noise. Bell Syst Tech., 1.23, 1944, pp.282-332.
37. Rice S.O. Mathematical analyses of random noise. Bell Syst Tech., 1.24, 1945, pp.46-156.
38. Вращение функции в EXCEL. <https://excel2.ru/articles/vrashchenie-grafika-v-ms-excel> უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.
39. Random variables and probability distributions <https://www.britannica.com/science/statistics/Random-variables-and-probability-distributions> უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.
40. Xiaobiao Shan, Henan Song, Chong Zhang, Guangyan Wang, and Jizhuang Fan, Linear System Identification and Vibration Control of End-Effector for Industrial Robots, November 2020. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29EM.1943-7889.0001937> უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.
41. Barratt B., et all. Evulation of the dust suppersant application on ambient PM10 concentrations in London. London, King's College, 2012, 56 p.
42. Gundmundsson J., Mork M., Graf O. Hydrate non-pipeline technology. International Conference on gas Hydrates. Yokogama, Japan, 2002, №4, pp.997-1002.
43. Долгаев С.И., Квон В.Г., Истомин В.А., Герасимов Ю.А., Тройникова А.А. Сравнительные экономические характеристики гидратной транспортировки природного газа. Научно-технический сборник Вести Газовой Науки, 2018, №1(33), сс.100 -116.
44. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 303с.
45. Смирнов Н.В. О построении доверительной области для плотности распределения случайной величины. Доклады АН СССР, 1950, Т.74, №2, сс.189 -192.
46. Akaike H. Information theory as an extension of the maximum likelihood principle. In B. N. Petrov & F. Csaki (Eds.). Second International Symposium on Information Theory, Budapest: Akademiai Kiado, 1973, p.267-281.

47. Scott D.W. On optimal and data-based histograms. *Biometrika*, 1979, Vol.66. p.605-610.
48. Taylor C. Akaike's information criterion and the histogram. *Biometrika*, 1987, Vol.74, Issue 3, pp. 636–639.
49. ღვანიძე თ. საქართველოში ბუნებრივი გაზის მიწოდებისას დინამიკური ალბათური მახასიათებლების დადგენა. „ენერჯია“, 2020, №2-3(94-95), გვ. 59-63.
50. ნამგალაძე დ., ღვანიძე თ. ბუნებრივი გაზის წვის სითბოს სტოქასტიკური მახასიათებლების დადგენა და ურთიერთჩანაცვლების მახასიათებლების (ვობეს რიცხვი) დადგენა. „ენერჯია“, 2021, №4(100), გვ. 83-87.
51. Баврина А.П., Борисов И.Б. СОВРЕМЕННЫЕ ПРАВИЛА ПРИМЕНЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА, 2021. file:/C:/Users/t.gvanidze/Downloads/sovremennye-pravila-primeneniya-korrelyatsionnogo-analiza.pdf
უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.
52. Тырсин А.Н. МЕТОД ПОДБОРА НАИЛУЧШЕГО ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ НА ОСНОВЕ ОБРАТНОГО ОТОБРАЖЕНИЯ. Вестник ЮурГУ, Серия «Математика, Механика, Физика» 2017, №1, том 9, с.31–38.
53. ნამგალაძე დ., ღვანიძე თ. მეთოდიკა: „ბუნებრივი გაზის წვის სითბოს და ვობეს რიცხვის სტოქასტიკური მახასიათებლების ანალიზი და თვისებრივი კრიტერიუმების დადგენა“. მეთოდიკის პრეზენტაცია საქართველოს ენერჯეტიკისა და წყალმომარაგების მარეგულირებელი ეროვნული კომისიაში 04.03.2022წ.
54. Гванидзе Т. Определение динамических вероятностных характеристик теплоемкости пр поставках природного газа в Грузию. Abstracts of 11th International and Practical Internet Conference - „Modern Movement of Science“, 8-9 October 2020, Dnipro, International El. Journal „WayScience“, 2020, p.1, pp.133 – 136.
55. Визуальный корреляционный анализ на TradingView.
<https://www.tradingview.com/blog/ru/vizualnyj-korrelyatsionnyj-analiz-na-tradingview-1359/> უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.
56. Возник О.М. и др. Моделирование и обработка стохастических сигналов и структур. Учебное пособие. М.:, Университетская книга, 2013, 125с.
უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.
57. Wang, S. Leak Detection for Gas and Liquid Pipelines by Online Modeling / S. Wang, J.J. Carroll // June 2007 SPE Projects, Facilities & Construction. p.9.

58. Hulsof D. and all. Market fundamentals, competition and natural-gas prices. Energy Policy. Volume 94, July 2016, pp.480-491.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421515302299#f0010>
 უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.
59. Костенко И. П. Введение в вероятностное прогнозирование. Курс лекций и упражнений. Учебное пособие в журнале. Матем. обр., 2004, выпуск 1(28), страницы 2–57 (Mi mo364).
http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=mo&paperid=364&option_lang=rus უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022
60. Распределение Релея.
http://cyclowiki.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D1%81%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%A0%D1%8D%D0%B%D0%B5%D1%8F
 უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022
61. Намгаладзе Д., Кизирия Т., Шатакишвили Л., Гванидзе Т. Расчет характеристик выбросов внутреннего давления в магистральных газопроводах. World Science, RS Global, 2021, №1(62), сс. 59 – 61.
https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30012021/7408
 უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022
62. Физико-химические свойства топливных газов. <http://dolgikh.com/index/0-33>
 უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022
63. Технический регламент. Европейского экономического союза. „О безопасности газа горючего природного, подготовленного к транспортированию и (или) использования“. (ТРЕАЭС00_/201_).
<http://www.eurasiancommission.org/ru/act/texnreg/deptexreg/tr/Documents/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82%20%D0%A2%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D1%80%D0%B5%D0%B3%D0%BB%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0.pdf> - უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022
64. О хорошем и плохом газе. Физико-химические свойства природного газа. Методическое пособие. Челябинск: ООО Газпром трансгаз Екатеринбург, Филиал, Учебно-производственный центр, 2008, с.109.
<https://mirvn.livejournal.com/10459.html>
 უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022.
65. Namgaladze D., Kiziria T., Shatakishvili L., Gvanidze T. Plotting a diagram of natural gas interchangeability for the energy market of Georgia. World Science, RS Global, 2020, №9(61), pp. 60 – 63.

https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30122020/7277
გადამოწმებულია 12.04.2022.

უკანასკნელად

66. Malenshek M. Methane number testing of alternative gaseous fuels. Fuel 88, 2009, p.650–656.
67. Условия оптимизации процессов сжигания жидкого топлива и газа.
<https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/usloviya-optimizacii-processov-szhiganiya-zhidkogo-topliva-i-gaza-3.html>
უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022
68. Взаимозаменяемость газов. Число Воббе.
<https://chem21.info/page/179155001091222213014059032221027205106168171192/>
უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022
69. Гуссейнов Д.Р. Международное экономическое сотрудничество Азербайджанской Республики в топливно-энергетической сфере. Дисс. на с.риск. уч. ст. к.э.н., Москва, 2018, 204 с.
70. Козлов А.М., Карпов А.Б., Федорова Е.Б., Жагфаров Ф.Г. Определение энергии – важный фактор при реализации природного газа.
<https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-energii-vazhnyy-faktor-pri-realizatsii-prirodnogo-gaza> უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022
71. Энергетика Азербайджана.
https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0_%D0%90%D0%B7%D0%B5%D1%80%D0%B1%D0%B0%D0%B9%D0%B4%D0%B6%D0%B0%D0%BD%D0%B0
უკანასკნელად გადამოწმებულია 12.04.2022