

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ქეთევან ჩხიკვაძე

ტყიბულ-შაორის ქვანახშირის თბოუნარიანობის გამოკვლევა

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის

მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა - ენერგეტიკა და ელექტროინჟინერია

შიფრი 0405

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

ივლისი, 2016

საავტორო უფლება © 2016 ქეთევან ჩხიკვაძე

თბილისი

2016

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ქეთევან ჩხიკვაძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ტყიბულ-შაორის ქვანახშირის თბოუნარიანობის გამოკვლევა“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი

ხელმძღვანელი: _____ ომარ კიღურაძე

რეცენზენტი: _____

რეცენზენტი: _____

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2016

ავტორი: ქეთევან ჩხიკვაძე
დასახელება : ტყიბულ-შაორის ქვანახშირის თბოუნარიანობის
გამოკვლევა
ფაკულტეტი : ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის
აკადემიური ხარისხი: 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 დაცული 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

ადგილობრივი ბუნებრივი თბური ენერგეტიკული რესურსების გამოყენების თვალსაზრისით საქართველოს შესაძლებლობები ქვანახშირითაა შემოსაზღვრული. ქვანახშირის მარაგები პრაქტიკულად ტყიბულ-შაორის ქვანახშირის საბადოთი განისაზღვრება. ამდენად მისი ეფექტური გამოყენება საქართველოს ეკონომიკის განვითარებისათვის მნიშვნელოვანი ფაქტორია. მთავრობის გადაწყვეტილებით დაგეგმილია ტყიბულში 150 მეგავატიანი თბოელექტროცენტრალის აშენება, რომელიც ადგილობრივ ქვანახშირზე წვის თანამედროვე ტექნოლოგიების („მდულარე შრეში“ წვა) გამოყენებით იმუშავებს. მსოფლიო პროგნოზით XXI საუკუნის ბოლოსთვის ენერჯის არაგანახლებადი წყაროების – ნავთობის და ბუნებრივი გაზის მსოფლიო მარაგები პრაქტიკულად მთლიანად ამოიწურება. ამ დეფიციტის შევსება შესაძლებელი იქნება ქვანახშირის დარჩენილი წიაღისეული მარაგების და განახლებადი ენერჯის წყაროების ხარჯზე.

საბადოს სხვადასხვა დონის ნიშნულის სათბობში წვადი ელემენტების და შიგა და გარე ბალასტების პროცენტული შემცველობები ერთმანეთისგან განსხვავებულია. აქედან გამომდინარე, განსხვავებულია სხვადასხვა ნიშნულის სათბობის თბოუნარიანობა. შესაბამისად ცალკეული ნიშნულების ნიმუშების თბოუნარიანობის განსაზღვრა აქტუალურ ამოცანას წარმოადგენს. სხვადასხვა დონის ნიშნულების განსხვავებული თვისებების მქონე ქვანახშირი გამადიდრებელ ფაბრიკაში ერთმანეთში ირევა და ისე მიეწოდება მომხმარებელს.

ნაშრომში დასაბუთებულია ტყიბულ-შაორის ქვანახშირის საბადოს სხვადასხვა ნიშნულის ქვანახშირის თბოუნარიანობის გამოკვლევის, როგორც სუფთა გამოყენებითი, ასევე სამეცნიერო თვალსაზრისით აქტუალობა.

განალიზებულია კალორიმეტრული სისტემაში მიმდინარე თბური პროცესების მათემატიკური მოდელირების ამოცანა გარკვეული გამარტივებების დაშვებით, რომელიც ეხება ამ სისტემის სახესა და თვისებებს. სისტემის სასაზღვრო და საწყისი პირობების გათვალისწინების შემთხვევაში შესაძლებელი ხდება ტემპერატურული ველის დროში ცვლილების ანალიზური გამოსახულების მიღება. განხილულია 6 მახასიათებელი მოდელი.

1922 წელს ლიონში საერთაშორისო ქიმიურ კონფერენციაზე ორგანული ნაერთების (სათბობის) თბოუნარიანობის გასაზომად (კალორიმეტრული სისტემის თბური ეკვივალენტის დასადგენად) რეკომენდირებული იქნა სანიმუშო ნივთიერება - ბენზოინის მჟავა, როგორც პირველი გვარის სანიმუშო ნივთიერება.

სანიმუშო ნივთიერებას წაეყენება მაღალი მოთხოვნები მისი სისუფთავის მიმართ. მაგალითად, უმაღლესი თანრიგის სანიმუშო ნივთიერება - ბენზოინის მჟავა უნდა შეიცავდეს 99,992% ძირითად ნივთიერებას. ასეთი სისუფთავის ნივთიერების მიღება დიდ

სიმწვანეებთან, და შესაბამისად დიდ ხარჯებთანაა დაკავშირებული. შედარებით დაბალი სიზუსტის კვლევების ჩასატარებლად, რომელსაც კალორიმეტრული კვლევებიც მიეკუთვნება, შესაძლებელია უფრო დაბალი სისუფთავის ბენზოინის მჟავას გამოყენება. მაგრამ ეს შესაძლებელია მხოლოდ მას შემდეგ, რაც მოხდება ამ ნივთიერების თბოუნარიანობის გამოკვლევა და სანიმუშო ნივთიერებად ატესტაცია.

ჩვენს მიერ ჩატარებულ იქნა სამუშაო შედარებით დაბალი სიზუსტის სანიმუშო ნივთიერების (სტუ-1) შესაქმნელად. ამ მიზნით გამოყენებულ იქნა რუმინული წარმომავლობის ("STANCHEM") ბენზოინის მჟავა (C_6H_5COOH) რომელიც ხარისხის სერთიფიკატის მიხედვით შეიცავს 99,24% ძირითად ნივთიერებას, 0,03% ტენს, 10 მლგ/კგ-ზე ნაკლებ მძიმე ლითონებს, 0,2%-ზე ნაკლებ ფტალურ ანჰიდრიდს, 0,03% სულფოზოლს. მისი დნობის ტემპერატურაა $121,7^{\circ}C$. სანიმუშო ნივთიერების ატესტაციისას კალორიმეტრის თბური ექვივალენტი განსაზღვრულ იქნა მაღალი სისუფთავის (99,992%) ბენზოინის მჟავას გამოყენებით, რომლის თბოუნარიანობა სერთიფიკატის მიხედვით ტოლია 26466 ჯ/გ-ს.

სტუ-1-ის ატესტაციისათვის პრეციზიულ კალორიმეტრზე ჩატარდა 12 ნიმუშის (10 მმ სიმაღლის და 10 მმ დიამეტრის ცილინდრული) თბოუნარიანობის გამოკვლევა მაღალი წნევის ჟანგბადის გარემოში. ექსპერიმენტის შედეგები (12 ცდა) დაყოფილია ორ ჯგუფად გაზომვების დროითი ნიშნის მიხედვით.

დაკვირვებათა მწკრივში უხეში შეცდომების არსებობის შესამოწმებლად და არსებობის შემთხვევაში მათი არგუმენტირებული გამორიცხვის მიზნით ცაკეული გაზომვებისათვის განისაზღვრა სტიუდენტის კოეფიციენტები და საბოლოოდ გაზომვების საშუალო მნიშვნელობისათვის ზღვრული ცდომილება.

შექმნილია მყარი და თხევადი სათბობის თბოუნარიანობის საზომი პრეციზიული ექსპერიმენტული დანადგარი, რომელიც მოიცავს: თერმოსტატულ გარემოში მოთავსებულ კალორიმეტრულ ყუმბარას; მაღალი წნევის ჟანგბადით შევსების სისტემას; პრეციზიულ ელექტრონულ სასწორს, პრეციზიულ ელექტრონულ საშრობს, სათბობის ბრიკეტის მოსამზადებელ აგრეგატს. სისტემა განკუთვნილია მაღალი სიზუსტით სხვადასხვა სათბობის თბოუნარიანობის გასაზომად.

განალიზებულია თბოუნარიანობის საზომი სისტემის თეორიული ცდომილებები და ცალკეული ნიმუშების მრავალჯერადი გაზომვების გზით მიღებული ექსპერიმენტული მონაცემების სტატისტიკური მეთოდებით დამუშავების შედეგად მიღებული ცდომილებები.

შექმნილია სათბობის თბოუნარიანობის გასაზომად მეორე თანრიგის სანიმუშო ნივთიერება-ბენზოინის მჟავა (თბოუნარიანობით $26358,50 \pm 1,4\%$).

ექსპერიმენტულად დადგენილია ტყიბულ-შაორის ქვანახშირის საბადოს სხვადასხვა ნიშნულების ნიმუშების თბოუნარიანობის მნიშვნელობები:

უბანი 1, ფენი 4 - $18547 \pm 15,8$ კჯ/კგ (0.09%);

უბანი 2, ფენი 4 - 21104 ± 35.87 კჯ/კგ (0.17%);

უბანი 2, ფენი 6 - 22722 ± 27.4 კჯ/კგ (0.12%);

უბანი 4, ფენი 4 - 20521 ± 31.6 კჯ/კგ (0.15%);

ღია წესით მოპოვებული ნიმუში- 19060 ± 236.2 კჯ/კგ (1.2%).

შექმნილი კალორიმეტრული სისტემა გამოყენებული იქნება ენერგეტიკის ფაკულტეტის სტუდენტებისათვის, როგორც სასწავლო-კვლევითი ბაზა.

ნაშრომი შედგება შესავლის, 4 თავისა და დასკვნებისაგან. ციტირებული ლიტერატურის სია შეიცავს ქართული და უცხოური წყაროების 46 დასახელებას. ექსპერიმენტული მონაცემები დამუშავებულია სტატისტიკური მეთოდებით.

ნაშრომის შედეგები აპრობირებულია 2 საერთაშორისო კონფერენციაზე. მოხსენებული იყო სტუ-ს სტუდენტურ კონფერენციებზე. კვლევის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია 6 სამეცნიერო სტატიაში, მათ შორის ორი თანაავტორის გარეშე.

resume

Georgian local natural energy resource use in terms of opportunities is limited with coal. Georgian coal reserves are limited by Tkibuli-Shaori coal mine. Consequently, it's effective use is a significant factor for Georgia's economic development. According to the Georgian government's decision, it is planned to construct 150-megawatt HPP in Tkibuli, which will use modern combustion technology ("boiling layer" burning) for a local coal. Based on world forecast, by the end of XXI century, the world resources of non-recoverable energy – oil and natural gas will be completely exhausted. This deficit will be compensated by remaining coal reserves of fossil and renewable energy reserves.

There is a difference between different levels of coal mine elements and internal and external ballast percentage concentration. Deriving from this fact, the calorific value of coal from different layers is different. Consequently, defining individual sample calorific value presents an active topic.

In the assay, the actuality of calorific value of Tkbul-Shaori plant is presented in terms of its usage as well as from a scientific view.

The analysis is made in a calorimetric system for an ongoing thermal process mathematical modeling case with specific easier assumptions that is linked with the systems' face and nature. While considering the terms of the system it is possible to evaluate temperature affect in terms of analysis schedule. Six characteristic models are discussed.

In 1922, in Lyon, during International Conference on Chemical organic compounds (fuels) for measuring the calorific value (calorimetry system in order to determine the thermal equivalent) it was recommended sample substance - benzoic acid, as the first sample substance.

The sample substance needs to comply with the high requirements of cleanliness. For example, a higher-level model ingredient - benzoic acid should contain 99.992% of the main substance. The achievement of such purity substance is associated with huge difficulties and consequently, with huge expenses. For performing relatively low accuracy research, to which calorimetric research refers as well, it is possible to use low purity benzoic acid. However, it is possible only after the research of calorific value and sample attestation.

We have performed work to create low accuracy sample substance (STU-1). For this purpose we have used Romanian origin ("STANCHEM") benzoic acid (C_6H_5COOH) which according to quality certificate consists of 99.24% main substance, 0.03% moisture, 10 milligram / kg less heavy metals, less than 0.2% anhydride, 0.03% sulphates. The melting temperature is 121,7 °C. During attestation of sample substance, the calorific value of calorimeter was defined through high purity (99,992%) benzoic acid, which calorific value per certificate is equal to 26466 J / g.

For attestation of STU-1, on precision calorimeter there were conducted 12 sample (10 mm height and 10 mm diameter cylindrical) calorific value examination in the high pressure oxygen environment. The results of the

experiment (12 attempts) is divided into two groups according to the measurements of the mark time.

Observations to track the gross errors in the test, and in case of their arguments in order to exclude individual measurements determined Student ratios and measuring the average value with the marginal error.

For measurement of solid and liquid fuel heating value precision experimental equipment is created, which includes: calorimetric bomb placed in thermostatic environment; high pressure oxygen filling system; precision electronic scales; precision electronic dryer, fuel briquettes preparatory assembly. The system is designed for high-precision measurement of a variety of fuel heating value.

Theoretical analysis of the heating value measurement system errors and certain patterns of multiple measurements of the test data statistical processing methods resulting from errors.

Fuel heating value is designed to measure the second-level model substance-benzoin acid (calorific $26358,50 \pm 1,4\%$).

Experimentally the calorific value of Tkibul-Shaori coal from different lawyers is determined:

District 1, layer 4 - $18547 \pm 15,8$ kJ/kg (0,09%);

District 2, layer 4 - $21104 \pm 1,47$ kJ/kg (0,17%);

District 2, layer 6 - $22722 \pm 27,4$ kJ/kg (0,12%);

District 4, a layer of 4 - $20521 \pm 31,6$ kJ/kg (0,15%);

In the open under the sample - $19060 \pm 236,2$ kJ/kg (1,2%).

The designed calorimetric system will be used for the students of Energy faculty, as educational research base.

The work performed is composed of 4 chapters and conclusion. The quoted literature contains Georgian and foreign sources of 46 description. The experimental results are processed through statistical methods.

The work results are approved on two international conferences. Was discussed on GTU students conference. The major results of the research are published on six scientific articles, including two without the co-writer.

შინაარსი

შესავალი	16
თავი I. ლიტერატურის მიმოხილვა.....	23
1.1. თბოუნარიანობა - სათბობის მთავარი თბოტექნიკური მახასიათებელი.....	23
1.2. კალორიმეტრიის ზოგადი დებულებები.....	24
1.3. კალორიმეტრული ექსპერიმენტი.....	30
1.4. კალორიმეტრულ სისტემაში სითბოსცვლის პროცესები	34
1.4.1. თბოგამტარობის განტოლება.....	36
1.4.2. კონვექციური თბოცვლა	38
1.4.3. თბოცვლა გამოსხივებით.....	40
თავი 2. კალორიმეტრული სისტემების მოდელირება.....	43
2.1. მოდელირების სახეები	43
2.2. ტემპერატურული შესწორების ზოგადი ფორმულა.....	46
2.3. ტემპერატურული შესწორებები თბოცვლის პროცესზე.....	48
2.4. ტემპერატურული შესწორების რენიუ-ფაუნდლერის ფორმულა	50
2.5. თბოცვლაზე შესწორებების განსაზღვრის გამარტივებული მეთოდი.....	51
თავი 3. კალორიმეტრიაში გამოყენებული სანიმუშო ნივთიერებები.....	55
3.1. ბენზოინის მჟავა.....	56
3.2. იანტარის მჟავა.....	58
კვლევის ამოცანები	59
თავი 4. ექსპერიმენტული ნაწილი.....	60
4.1. ექსპერიმენტული დანადგარი.....	60
4.2. კალორიმეტრის კალიბრება	64
4.3. სათბობის ტენიანობის განსაზღვრა.....	69
4.4. სათბობის ნაცრიანობის განსაზღვრა.....	72
4.5. ნიმუშის მომზადება	74
4.6. პირველი უბნის მე-4 ფენის ქვანახშირის უმაღლესი თბოუნარიანობის ექსპერიმენტული მონაცემები	77
4.7. მე-2 უბნის მე-4 ფენის ქვანახშირის უმაღლესი თბოუნარიანობის ექსპერიმენტული მონაცემები.	82

4.8.	მე-2 უბნის მე-6 ფენის ქვანახშირის უმაღლესი თბოუნარიანობის ექსპერიმენტული მონაცემები.	87
4.9.	მე-4 უბნის მე-4 ფენის ქვანახშირის უმაღლესი თბოუნარიანობის ექსპერიმენტული მონაცემები	92
4.10.	მე-4 უბნის მე-4 ფენის ქვანახშირის უმაღლესი თბოუნარიანობის ექსპერიმენტული მონაცემები	97
4.11.	ექსპერიმენტის შედეგები	101
4.12.	ვირტუალური ამოცანა - სათბობის თბოუნარიანობის განსაზღვრა.....	105
	ძირითადი დასკვნები.....	108
	გამოყენებული ლიტერატურა	109

ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1	საქართველოს ნახშირების სამრეწველო მარაგი და პროგნოზული რესურსები	17
ცხრილი 2	სხვადასხვა ნივთიერებებისა და მასალების უდაბლები თბოუნარიანობა	25
ცხრილი 3	ბენზონის მჟავას ატესტაციის შედეგები პირველი ჯგუფისთვის.....	66
ცხრილი 4	ბენზონის მჟავას ატესტაციის შედეგები მეორე ჯგუფისთვის.....	67
ცხრილი 5	კალორიმეტრული ხელსაწყოთა კალიბრების მონაცემი.	75
ცხრილი 6-10	ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 1, ფენი 4) - ცდა 1-5.....	77
ცხრილი 11-15	ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 2, ფენი 4) - ცდა 1-5.....	82
ცხრილი 16-20	ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 2, ფენი 6) - ცდა 1-5.....	87
ცხრილი 21-25	ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 4, ფენი 4) - ცდა 1-5.....	92
ცხრილი 26-29	ექსპერიმენტული მონაცემები (ღია წესით მოპოვებული) - ცდა 1-4.....	97
ცხრილი 30	ტყიბულ-შაორის საბადოს მინდელის სახელობის შახტის და ღია წესით მოპოვებული ქვანახშირის უმაღლესი თბოუნარიანობა უბნების მიხედვით	101
ცხრილი 31	ცალკეული გაზომვების დისპერსიის მნიშვნელობა ნიმუშების მიხედვით.....	101
ცხრილი 32	ცალკეული გადახრების სტანდარტული გადახრის მნიშვნელობა ნიმუშების მიხედვით	102
ცხრილი 33	თბოუნარიანობის საშუალო მნიშვნელობის დისპერსია ნიმუშების მიხედვით.....	102
ცხრილი 34	თბოუნარიანობის საშუალო მნიშვნელობის დისპერსია ნიმუშების მიხედვით.....	102
ცხრილი 35	კრიტერიუმ t_{max} -ის მნიშვნელობა ნიმუშების მიხედვით	103

ცხრილი 36	სტიუდენტის კოეფიციენტის (t) მნიშვნელობა $\alpha=0,95$ სარწმუნო ინტერვალისთვის და $k=n-1$ თავისუფლების ხარისხისთვის ნიმუშების მიხედვით	103
ცხრილი 37	თბოუნარიანობის საშუალო არითმეტიკული სიდიდის ზღვრული ცდომილება ნიმუშების მიხედვით	103
ცხრილი 38	საშუალო არითმეტიკული სიდიდის ზღვრული ცდომილება ნიმუშების მიხედვით.....	104

ნახაზების ნუსხა

ნახაზი 1.	ტყიბულ-შაორის საბადოს გავრცელების არეალი.....	18
ნახაზი 2.	ქვანახშირის განაწილება ტყიბულ-შაორის საბადოში სიღრმის მიხედვით	19
ნახაზი 3.	ტყიბულ-შაორის ქვანახშირში წვადი ელემენტების ჯამი (C+H+S) ნიშნულების მიხედვით როტერდამის სავაჭრო პალატის მონაცემებით.....	20
ნახაზი 4.	ტყიბულ-შაორის ქვანახშირში შიდა ბალასტის ჯამი (N+O) ნიშნულების მიხედვით როტერდამის სავაჭრო პალატის მონაცემებით.....	20
ნახაზი 5.	ტყიბულ-შაორის ქვანახშირში გარე ბალასტის ჯამი (A+W) ნიშნულების მიხედვით როტერდამის სავაჭრო პალატის მონაცემებით.....	21
ნახაზი 6.	ტყიბულ-შაორის ქვანახშირში ნაცრის შემადგენლობა ნიშნულების მიხედვით როტერდამის სავაჭრო პალატის მონაცემებით	21
ნახაზი 7.	კალორიმეტრული ცდის ტემპერატურული მრუდები	31
ნახაზი 8.	კალორიმეტრული სისტემის განზოგადებული მოდელი	43
ნახაზი 9.	კალორიმეტრული სისტემების მოდელი	46
ნახაზი 10.	თბოცვლაზე შესწორების გამოთვლა ტრაპეციის მეთოდით	50
ნახაზი 11.	ტემპერატურული მრუდი და გრაფიკული შესწორება თბოცვლაზე	53
ნახაზი 12.	პრეციზიული კალორიმეტრი XRY-1C.....	60
ნახაზი 13.	კალორიმეტრ XRY-1C-ის სქემა.	61
ნახაზი 14.	მაღალი წნევის კონტეინერი	62
ნახაზი 15.	მაღალი წნევის კონტეინერის ჟანგბადით შვსების სისტემა.....	62
ნახაზი 16.	კალორიმეტრული სისტემის ტემპერატურის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი.	63
ნახაზი 17.	სათბობის გამოსაშრობი დანადგარი RADWAG – MA 50.R და ექსიკატორი ნიმუშებით	75

ნახაზი 18. ტყიბულ-შაორის საბადოს ქვანახშირის თბოუნარიანობის ექსპერიმენტული მონაცემები	105
ნახაზი 19. კალორიმეტრული სისტემის მდგომარეობა ნიმუშის დაწვისთანავე.....	106
ნახაზი 20. კალორიმეტრული სისტემის მდგომარეობა პროცესის დასრულებისას.....	107

მადლიერება

მადლობას ვუხდით დისერტაციის ხელმძღვანელს პროფ. ო.კილურაძეს და თბოენერგეტიკის და ენერგოეფექტურობის დეპარტამენტის წევრებს დისერტაციაზე მუშაობის დროს გაწეული დახმარებისათვის.

შესავალი

ქვეყნის ეკონომიკის ზრდა მჭიდროდაა დაკავშირებული ელექტროენერგეტიკის განვითარებასთან, შესაბამისად იგი ქვეყნისთვის პრიორიტეტული დარგია. ელექტროენერჯის დეფიციტის პრევენციისათვის აუცილებელია ქვეყანაში არსებობდეს საბაზისო ელექტროსადგურები, რომლებიც ძირითადად წარმოადგენენ ორგანულ სათბობზე (აირადი, თხევადი და მყარი) მომუშავე თბოელექტროსადგურებს. უკანასკნელ წლებში თბოელექტროსადგურებში უმეტესად აირადი და თხევადი სათბობი გამოიყენება. ეს გამოწვეულია ერთის მხრივ ენერგეტიკულ ბალანსში ბუნებრივი გაზისა და თხევადი სათბობის წილის მნიშვნელოვანი ზრდით, ხოლო მეორეს მხრივ მყარი საწვავის, კერძოდ ქვანახშირის, ძველი მეთოდებით წვასთან დაკავშირებული პრობლემებით.

პროგნოზით XXI საუკუნის ბოლოსთვის ენერჯის არაგანახლებადი წყაროების – ნავთობის და ბუნებრივი გაზის მსოფლიო მარაგები პრაქტიკულად მთლიანად ამოიწურება. ამ დეფიციტის შევსება შესაძლებელი იქნება ქვანახშირის დარჩენილი წიაღისეული მარაგების და განახლებადი ენერჯის წყაროების ხარჯზე. ქვანახშირის დარჩენილი წიაღისეულების მარაგები ამ პერიოდისათვის სავარაუდოდ 5 ტრილიონი ტონა პირობითი სათბობის ეკვივალენტური იქნება. მაგრამ, მისი ეფექტური გამოყენებისათვის საჭირო იქნება ნახშირის წვისთვის ახალი ტექნოლოგიების შემუშავება.

დღეისთვის ნახშირის წვის პროცესის გასაუმჯობესებლად დამუშავებულია პროგრესული ტექნოლოგიები. მათ შორის აღსანიშნავია წვრილფრაქციული ნახშირის წვა ეგრეთწოდებულ “მდულარე ფენაში”. ამ მეთოდის თანახმად, ქვანახშირის ნაწილაკები წვისთვის საჭირო წნევის ჰაერში შეწონილ მდგომარეობაში იმყოფება. ამით გაუმჯობესებულია ქვანახშირის ნაწილაკების ჰაერის ჟანგბადთან შეხების პირობები, რის

შედეგად მისი წვის ხარისხი 98-99%-ს აღწევს. აღნიშნული მეთოდი პასუხობს თანამედროვე ეკოლოგიურ მოთხოვნებსაც, რაც გულისხმობს წვის ისეთი პირობების შექმნას, რომლის დროსაც ხდება საწვავის მაქსიმალური წვა, და შესაბამისად, მავნე ნივთიერებების გამოყოფის მინიმალიზება. “მდულარე შრეში” სათბობის წვის ტექნოლოგია მგრძნობიარეა სათბობის ფრაქციული შედგენილობის, წვისთვის საჭირო პირველადი ჰაერის წნევის, სათბობის შედგენილობის და თბოუნარიანობის მიმართ. შესაბამისად, მისი სრულყოფილი გამოყენება მოითხოვს საწვავის თვისებების ყოველმხრივ შესწავლას.

ადგილობრივი ბუნებრივი თბური ენერგეტიკული რესურსების გამოყენების თვალსაზრისით საქართველოს შესაძლებლობები პრაქტიკულად ქვანახშირითაა შემოსაზღვრული. ცხრილ 1-ში მოცემულია ინფორმაცია საქართველოს ნახშირების სამრეწველო მარაგებისა და პროგნოზული რესურსების შესახებ.

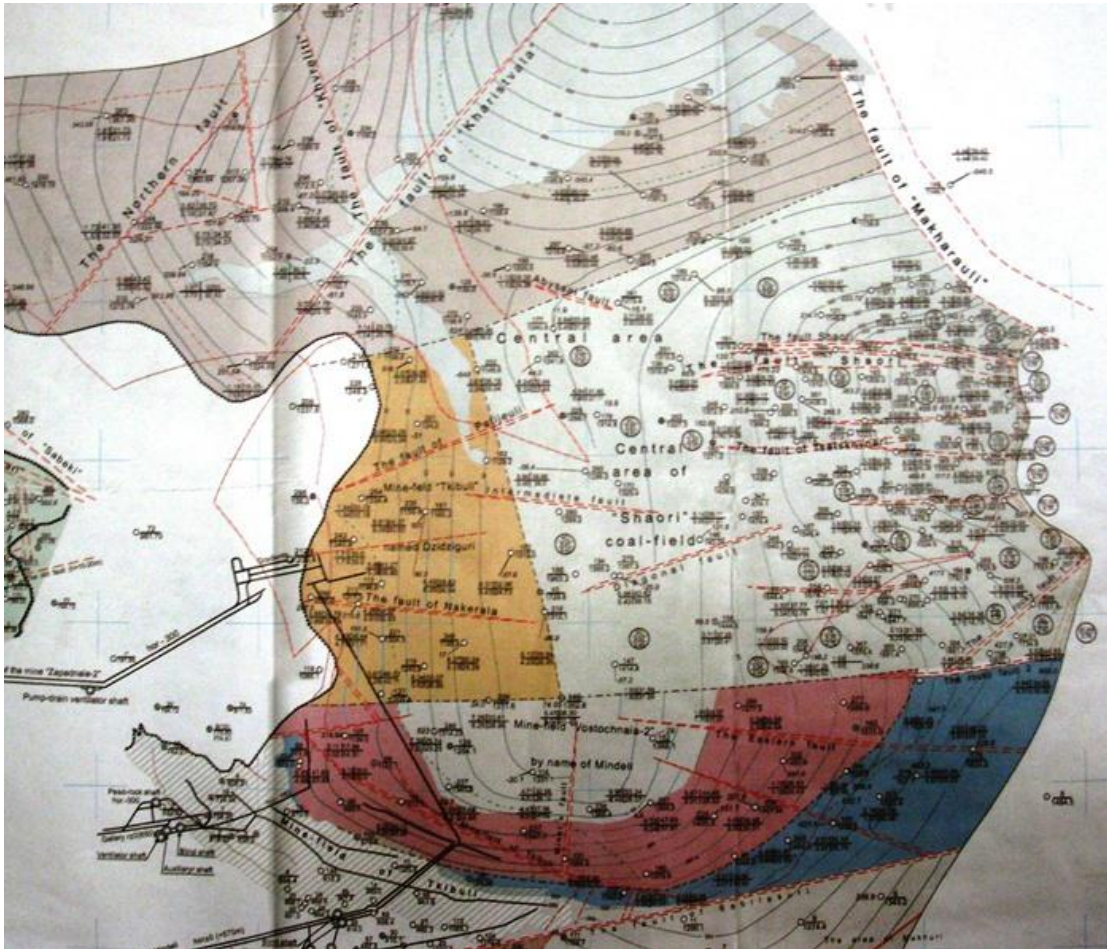
ცხრილი 1
საქართველოს ნახშირების სამრეწველო მარაგი და პროგნოზული რესურსები

№	საბადოს დასახელება	სამრეწველო მარაგები, მლნ ტონა	პროგნოზული რესურსები, მლნ ტონა	მთლიანი მარაგი, მლნ ტონა
1	ტყიბულ-შაორის	338,5	373,0	711,5
2	ტყვარჩელის	20,3	12,0	32,3
3	ახალციხის	75,7	-	75,7
4	გელათის	5,0	-	5,0

როგორც მოცემული ცხრილიდან ჩანს, ქვანახშირის მარაგები პრაქტიკულად ტყიბულ-შაორის ქვანახშირის საბადოთი განისაზღვრება. ამდენად მისი ეფექტური გამოყენება საქართველოს ეკონომიკისთვის განვითარების მნიშვნელოვანი ფაქტორია.

პირველ სურათზე მოცემულია ტყიბულ-შაორის საბადოს გავრცელების არეალი. ათვისებულია საბადოს სამხრეთ ნაწილი, რომლის

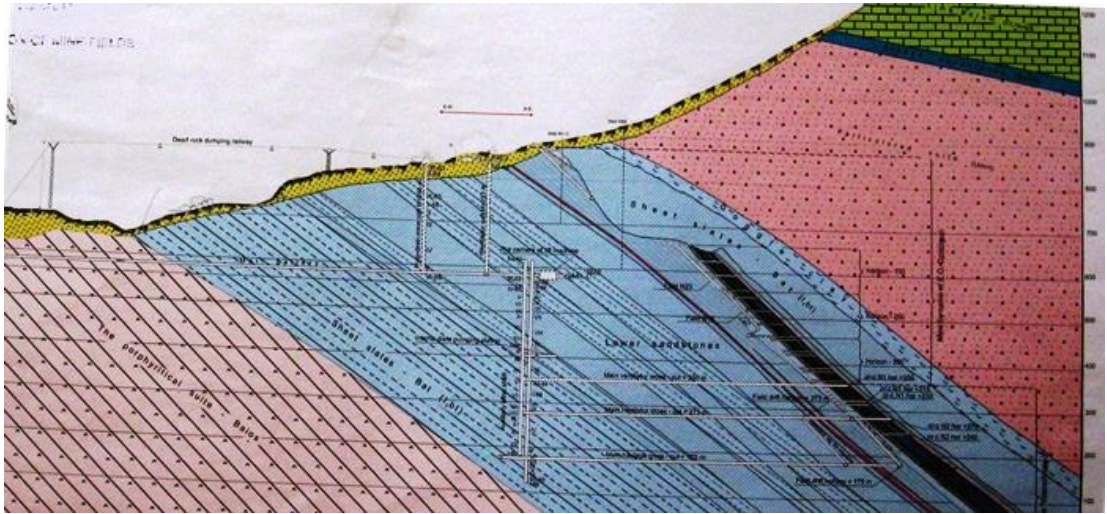
რესურსი შეადგენს 338,5 მილიონ ტონას, ხოლო ჯერ კიდევ აუთვისებელი, ჩრდილოეთ ნაწილის რესურსი შეადგენს 373 მილიონ ტონას. გეოგრაფიულად ტყიბულ-შაორის საბადო ვრცელდება რაჭისკენ, შაორის წყალსაცავის ქვეშ.



სურათი 1. ტყიბულ-შაორის საბადოს გავრცელების არეალი

მეორე სურათზე ნაჩვენებია ქვანახშირის განაწილება ტყიბულ-შაორის საბადოში სიღრმის მიხედვით. ქვანახშირი განთავსებულია ექვსი ნიშნულის დონეზე - I, 7/4, II, III, IV, და V ნიშნულები. სათბობში ნიშნულების მიხედვით განსხვავებულია წვადი ელემენტების და შიგა და გარე ბალასტების პროცენტული შემცველობები. წვადი ელემენტების ჯამი მოქცეულია ინტერვალში 40-62%; შიდა ბალასტი - 0,6-1%, და გარე ბალასტი - 43-50%. სათბობის შედგენილობების ფართო ვარიაციის გამო ქვანახშირის

თბოუნარიანობა (ერთეული რაოდენობის სათბობის სრული დაწვით გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა) სხვადასხვა ნიშნულის დონეების

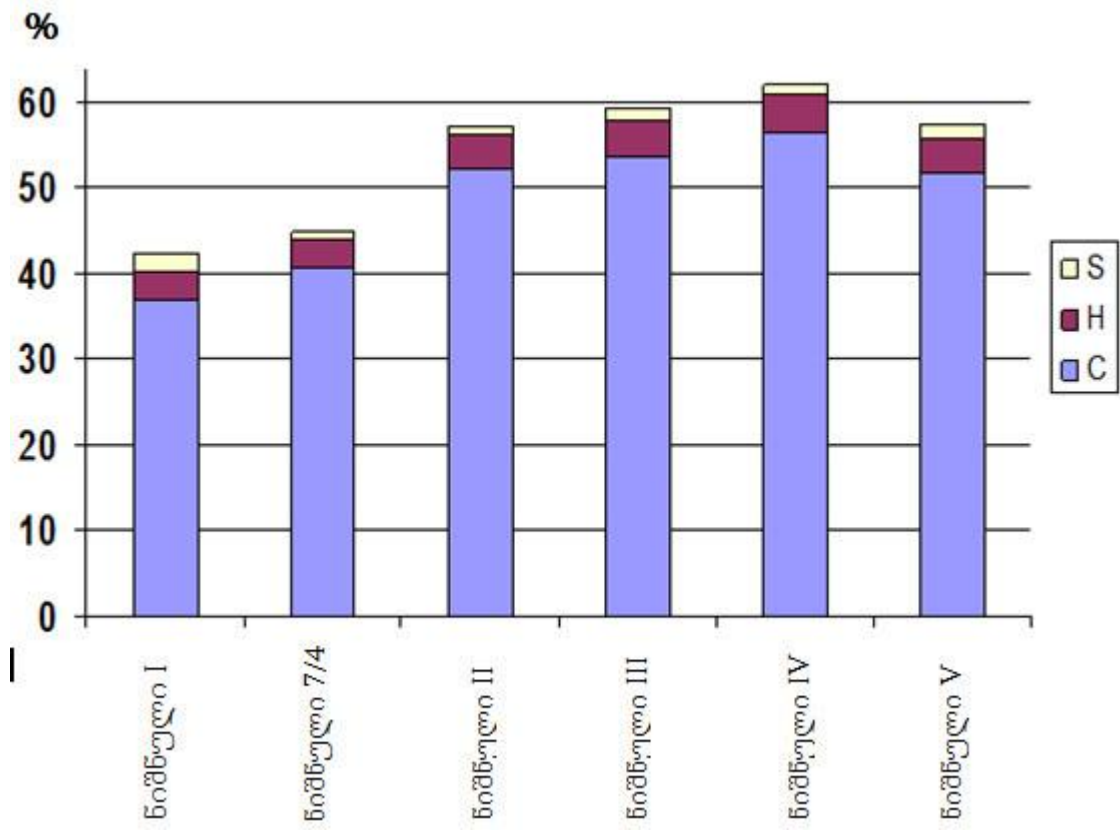


სურათი 2. ქვანახშირის განაწილება ტყიბულ-შაორის საბადოში სიღრმის მიხედვით

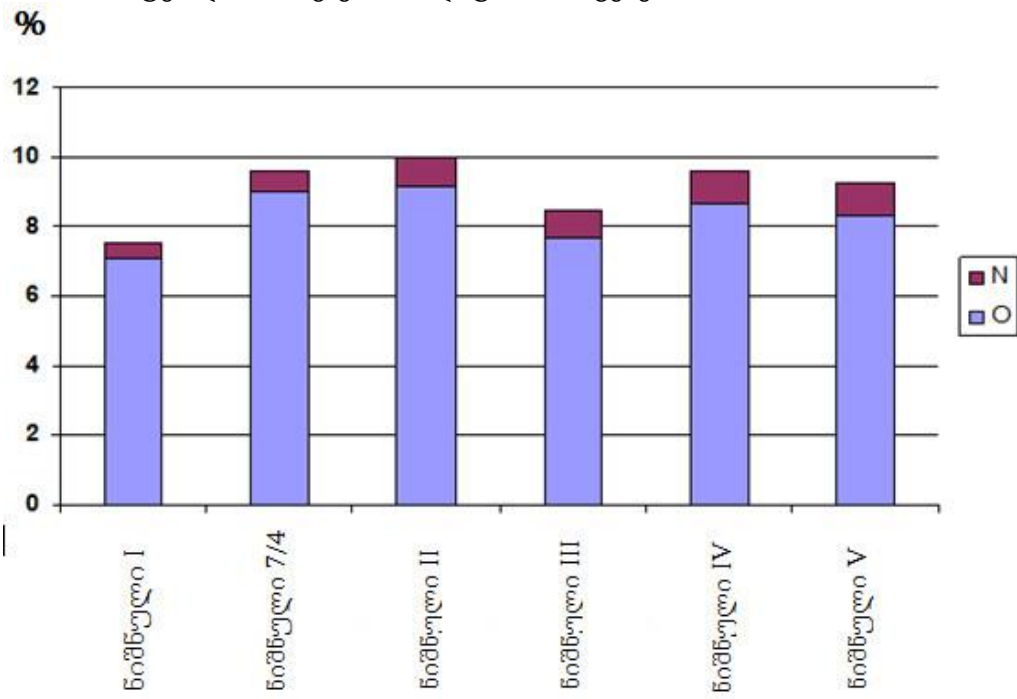
მიხედვით მნიშვნელოვნად განსხვავდება ერთმანეთისგან. გრანულომეტრული თვალსაზრისით ტყიბულის ქვანახშირში დიდი რაოდენობითაა 5 მმ-ზე ნაკლები ფრაქციის წვრილმანი, რის გამოც შეუძლებელია მის დასაწვავად ფენური ტიპის საცეცხლის გამოყენება, ხოლო „მდულარე შრეში“ მისი წვისათვის საჭირო მოთხოვნების შესრულება გაძნელებულია.

სხვადასხვა ნიშნულის დონეების, განსხვავებული თვისებების მქონე ქვანახშირი გამადიდრებელ ფაბრიკაში ერთმანეთში ირევა და ისე მიეწოდება მომხმარებელს.

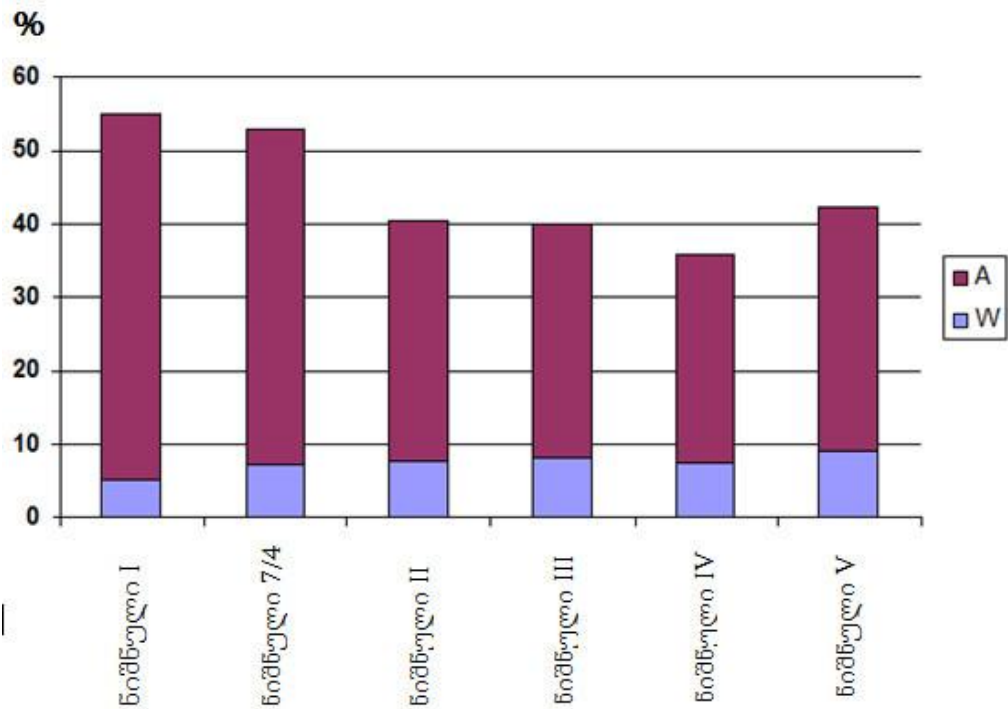
სურათებზე 3-6 მოცემულია ტყიბულ-შაორის საბადოს ქვანახშირის შედგენილობა ნიშნულების მიხედვით როტერდამის სავაჭრო პალატის მონაცემებით. ამ გრაფიკებიდან ჩანს, თუ რა მნიშვნელოვნად განსხვავებული შედგენილობა, და აქედან გამომდინარე განსხვავებული თვისებები აქვს სხვადასხვა ნიშნულის დონეების ქვანახშირებს.



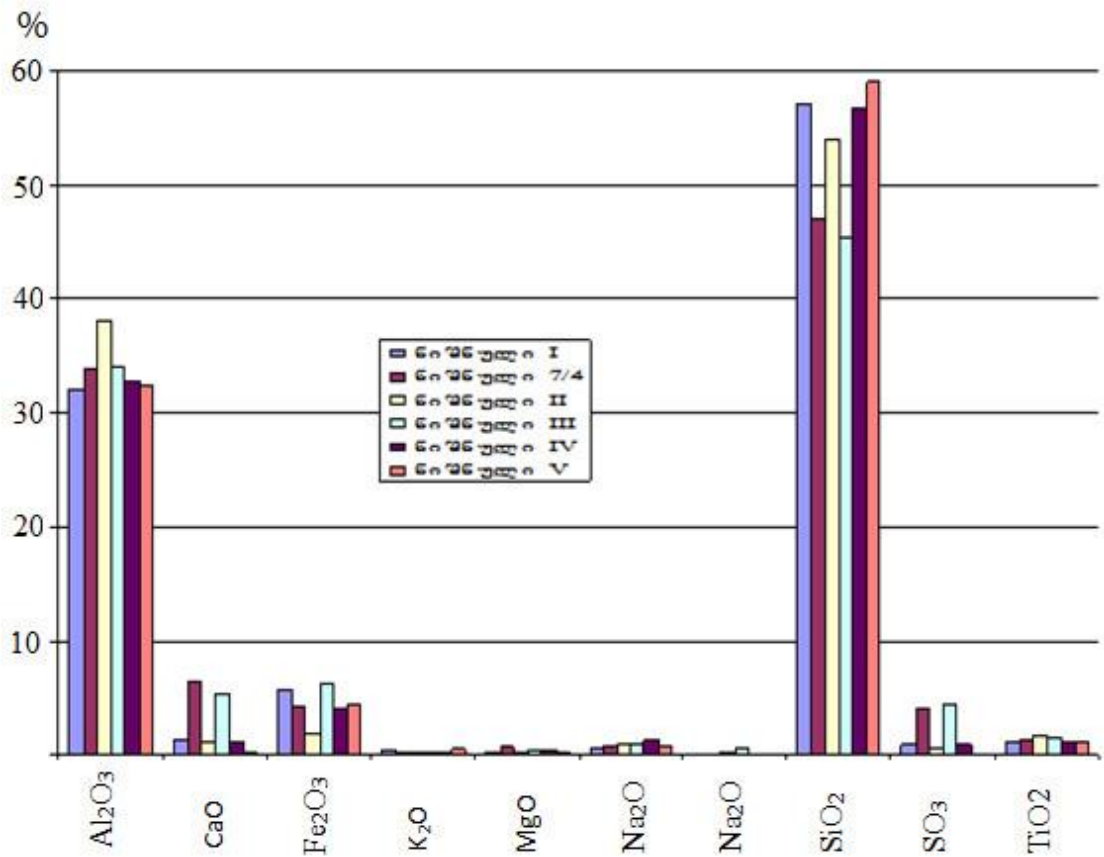
სურათი 3. ტყიბულ-შაორის ქვანახშირში წვადი ელემენტების ჯამი (C+H+S) ნიშნულების მიხედვით როტერდამის სავაჭრო პალატის მონაცემებით.



სურათი 4. ტყიბულ-შაორის ქვანახშირში შიდა ბალასტის ჯამი (N+O) ნიშნულების მიხედვით როტერდამის სავაჭრო პალატის მონაცემებით.



სურათი 5. ტყიბულ-შაორის ქვანახშირში გარე ბალასტის ჯამი (A+W) ნიშნულების მიხედვით როტერდამის სავაჭრო პალატის მონაცემებით.



სურათი 6. ტყიბულ-შაორის ქვანახშირში ნაცრის შემადგენლობა ნიშნულების მიხედვით როტერდამის სავაჭრო პალატის მონაცემებით.

მთავრობის გადაწყვეტილებით დაგეგმილია ტყიბულში 150 მეგავატიანი თბოელექტროცენტრალის აშენება, რომელიც ადგილობრივ ქვანახშირზე წვის თანამედროვე ტექნოლოგიების გამოყენებით იმუშავებს.

მდუღარე შრეში სათბობის წვის ტექნოლოგია ძალიან მგრძობიარეა სათბობის ფრაქციული შედგენილობის, წვისათვის საჭირო პირველადი ჰაერის წნევის, სათბობის შედგენილობისა და თბოუნარიანობის მიმართ. საბადოს სხვადასხვა ნიშნულის შესაბამისი რიგითი ქვანახშირის, სალექარებიდან აღებული შლამის და ქვანახშირის გამამდიდრებელი ფაბრიკის ნარჩენების გამოყენებით შესაძლებელია შეიქმნას კომპოზიტური საწვავი რომელიც უზრუნველყოფს “მდუღარე შრეში” წვის ეფექტურ პროცესს. კომპოზიტური სათბობის შესაქმნელად აუცილებელია ცალკეული კომპონენტის თვისებების შესწავლა.

ზემოთთქმულიდან გამომდინარეობს, რომ ტყიბულ-შაორის საბადოს ქვანახშირის სრულყოფილი გამოყენება მოითხოვს საწვავის თვისებების ყოველმხრივ შესწავლას.

გასული საუკუნის 70-იან წლების გამოკვლევებში მოცემულია ინფორმაცია სხვადასხვა ნიშნულის ქვანახშირის მხოლოდ საშუალო თბოუნარიანობის შესახებ. მონაცემები სხვადასხვა ფენის რიგითი ქვანახშირის თბოუნარიანობის შესახებ მასში არ მოიპოვება. გარდა ამისა, ქვანახშირის მოპოვების თანამედროვე არეალი შეცვლილია. ამდენად, ტყიბულ-შაორის ქვანახშირის თბოუნარიანობის შესწავლა აქტუალურ ამოცანას წარმოადგენს [1].

მოცემული სამუშაოს მიზანია ტყიბულ-შაორის ქვანახშირის ერთერთი მნიშვნელოვანი თბოტექნიკური მახასიათებლის - თბოუნარიანობის გამოკვლევა.

თავი 1. ლიტერატურული მიმოხილვა

1.1. თბოუნარიანობა - სათბობის მთავარი

თბოტექნიკური მახასიათებელი

თბოუნარიანობა - არის ნივთიერების მიერ გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა მისი სრული დაწვის დროს (ჯოული ან კალორია). თბოუნარიანობა დაყვანილი ნივთიერების ერთეულ მასაზე ან მოლზე (მყარი და თხევადი ნივთიერებისთვის), ან მოცულობაზე (აირადი ნივთიერებისთვის) არის ხვედრითი მასური (ჯ/კგ), ხვედრითი მოლური (ჯ/მოლი) და ხვედრითი მოცულობითი (ჯ/მ³) თბოუნარიანობა შესაბამისად.

თბოუნარიანობის ექსპერიმენტულად განსაზღვრისთვის ფართოდ გამოიყენება კალორიმეტრული მეთოდი [2,3].

თბოუნარიანობის გაანგარიშება შესაძლებელია აგრეთვე სათბობის ქიმიური შედგენილობის მიხედვით. სათბობის შემადგენლობაში შედის ნახშირბადი (C) , წყალბადი (H), გოგირდი (S), აზოტი (N), გოგირდი (S), ნაცარი (A) და ტენი (წყალი) (W).

არსებობს თბოუნარიანობის რამდენიმე სახე:

1. მუშა თბოუნარიანობა (Q^d) - ეს არის თბოუნარიანობა დაყვანილი წვადი ნივთიერების მუშა მასაზე, ანუ ისეთი სახის წვად ნივთიერებაზე, როგორსაც ღებულობს მომხმარებელი;
2. თბოუნარიანობა დაყვანილი მშრალ მასაზე (Q^{m3}) - ეს არის ისეთი სახის საწვავის თბოუნარიანობა, რომელიც არ შეიცავს ტენს;
3. თბოუნარიანობა დაყვანილი წვად მასაზე (Q^{v3}) - ეს არის ისეთი სახის საწვავის თბოუნარიანობა, რომელიც არ შეიცავს ტენს და ნაცარს. სათბობის წვადი ელემენტებია C, H და S. მათგან გოგირდი არასასურველი ელემენტია რადგან მისი დაწვით მართალია მიიღება სითბო, მაგრამ წვის პროდუქტები მავნე ნივთიერებებია [3].

ასხვავებენ უმაღლეს - $Q_{უმ}$ და უდაბლეს - $Q_{უდ}$ თბოუნარიანობას. უმაღლესი თბოუნარიანობა არის სითბოს ის რაოდენობა, რომელიც გამოიყოფა სათბობის სრული დაწვის დროს, წვის პროდუქტებში არსებული წყლის ორთქლის კონდენსაციის სითბოს ჩათვლით.

უდაბლესი თბოუნარიანობა შეესაბამება სითბოს იმ რაოდენობას, რომელიც გამოიყოფა სათბობის სრული დაწვის დროს წყლის ორთქლის კონდენსაციის სითბოს გათვალისწინების გარეშე.

უმაღლესი და უდაბლესი თბოუნარიანობები დაკავშირებულია ერთმანეთთან ფორმულით:

$$Q_{უმ} = Q_{უდ} + k((W + 9H^{\beta}),$$

სადაც $k=25$ კჯ/კგ (6კკალ/კგ) კოეფიციენტი არის წყლის აორთქლებაზე დახარჯული სითბოს რაოდენობის მეასედი ნაწილი ; W - წყლის რაოდენობა სათბობში % (მასური); H - წყალბადის რაოდენობა სათბობში , % (მასური).

პრაქტიკაში თბოტექნიკური გაანგარიშებების დროს ვერ ხერხდება წვის პროდუქტების გაცივება მასში არსებული წყლის სრულ კონდენსაციამდე. ამიტომ შემოღებულია სათბობის უდაბლესი თბოუნარიანობის ცნება, რომელიც მიიღება უმაღლესი თბოუნარიანობიდან სათბობში არსებული ტენისა, და წყალბადის დაწვით მიღებული ტენის აორთქლებისთვის საჭირო სითბოს გამოკლებით. 1კგ წყლის ორთქლის მისაღებად იხარჯება სითბოს რაოდენობა 2514 კჯ/კგ (600კკალ/კგ). ამიტომ უდაბლესი თბოუნარიანობა გამოიანგარიშება ფორმულით

$$Q_{უდ} = Q_{უმ} - 2514 \cdot ((9H^{\beta} + W^{\beta})/100)$$

სადაც კოეფიციენტი - 9 წარმოადგენს 1კგ წყალბადის დაწვით მიღებული წყლის რაოდენობას (მიიღება 9 კგ წყალი); 2514 კჯ/კგ - წყლის აორთქლების სითბო 100 °C ტემპურატურაზე და ატმოსფერული წნევის პირობებში. H^{β} და W^{β} - მუშა სათბობში წყალბადის და ტენის შემცველობა, % [4].

უდაბლესი თბოუნარიანობა განისაზღვრება ექსპერიმენტულად.

შესაძლებელია უდაბლესი თბოუნარიანობის გაანგარიშება მენდელეევის ფორმულით სათბობის ელემენტარული შედგენილობის მიხედვით [3]:

$$Q_{\text{უღ}} = Q_{\text{უმ}} - 2514 \cdot ((9H^{\text{მ}} + W^{\text{მ}})/100)$$

$$Q_{\text{უღ}} = 339 \cdot C^{\text{მ}} + 1256 \cdot H^{\text{მ}} - 109 \cdot (O^{\text{მ}} - S_{\text{აქრ}}^{\text{მ}}) - 25,14 \cdot (9H^{\text{მ}} + W^{\text{მ}}) \text{ კჯ/კგ,}$$

ან

$$Q_{\text{უღ}} = 81 \cdot C^{\text{მ}} + 246 \cdot H^{\text{მ}} - 26 \cdot (O^{\text{მ}} - S_{\text{აქრ}}^{\text{მ}}) - 6 \cdot (9H^{\text{მ}} + W^{\text{მ}}) \text{ კკალ/კგ,}$$

სადაც $C^{\text{მ}}, H^{\text{მ}}, O^{\text{მ}}, S_{\text{აქრ}}^{\text{მ}}, H^{\text{მ}}, W^{\text{მ}}$ - არის სათბობის მუშა მასაში ნახშირბადის, წყალბადის, ჟანგბადის, აქროლადი გოგირდის და ტენის პროცენტული შემცველობა (მასური).

გაანგარიშებების დროს გამოიყენება პირობითი სათბობის ცნება, მისი ხვედრითი თბოუნარიანობა ტოლია 29308 კჯ/კგ (7000 კკალ/კგ).

ცხრილი 2

სხვადასხვა ნივთიერებებისა და მასალების უდაბლესი თბოუნარიანობა

ნივთიერებები და მასალები	უდაბლესი თბოუნარიანობა მჯ/კგ
ბენზინი	41,87
ნავთი	43,54
ქაღალდი	13,40
შეშა ტენიანობით 14%	13,80
ნატურალური კაუჩუკი	44,73
ლინოლიუმი პოლივინილქლორიდის	14,31
რეზინა	33,52
ქსოვილი	13,80
პოლიეთილენი	47,14
პენოპოლისტიროლი	41,60
ბამბა	15,70
პლასტმასა	41,87

ზოგიერთ ქვეყანაში სარგებლობენ უმაღლესი თბოუნარიანობით, ხოლო ზოგიერთში უდაბლესით. ასე მაგალითად რუსეთში - უდაბლესით, აშშ-ში, დიდ ბრიტანეთში, საფრანგეთში - უმაღლესით. დიდ ბრიტანეთში

და აშშ-ში მეტრული სისტემის შემოღებამდე სარგებლობდნენ ბრიტანული თბური ერთეულებით.

ცხრილ 2-ში მოცემულია სხვადასხვა ნივთიერებების და მასალების თბოუნარიანობის მონაცემები.

1.2. კალორიმეტრის ზოგადი დებულებები

კალორიმეტრული სისტემა წარმოადგენს ფიზიკურ სისტემას, რომელიც შედგება ცალკეული სხეულების ერთობლიობისაგან, რომელთა შორისაც ხორციელდება თბოცვლა თბოგამტარობით, კონვექციითა და გამოსხივებით. სითბოს გამოყოფის ან შთანთქმის დროს იცვლება კალორიმეტრული სისტემის მდგომარეობა [5].

თბური მდგომარეობა არის სისტემის განზოგადებული მახასიათებელი, რომელიც გამოხატავს მასში ტემპერატურის განაწილებას, სისტემის ცალკეულ ნაწილებსა და გარემომცველ გარემოს შორის თბოცვლის მიმართულებას, სიჩქარეს და ინტენსივობას. მაგალითად საწყის თბურ მდგომარეობაში (კალორიმეტრული ცდის საწყისი პერიოდი) სისტემა ხასიათდება ტემპერატურის თანაბარი ცვლილების შედარებით მცირე სიჩქარით. ამასთან, სისტემა პრაქტიკულად იმყოფება გაცხელების ან გაცივების რეგულარულ სტადიაში. საბოლოო თბურ მდგომარეობაში (კალორიმეტრული ცდის საბოლოო პერიოდი) სისტემა ხასიათდება ტემპერატურის ისეთივე თანაბარი ცვლილების თბურ მდგომარეობაში, როგორშიც იმყოფებოდა საწყის პერიოდში, ოღონდაც, ტემპერატურის ცვლილების სიჩქარე, მისი აბსოლუტური მნიშვნელობა და გარემოსთან თბოცვლის ინტენსიობა განსხვავებული იქნება საწყისი თბური მდგომარეობის შესაბამისი პარამეტრების მნიშვნელობებისაგან.

ერთი თბური მდგომარეობიდან სხვა თბურ მდგომარეობაში გადასვლა ხასიათდება სისტემის ცალკეული ნაწილების კონკრეტული თბური თვისებების ცვლილებით და ფიზიკო-ქიმიური პროცესების ხასიათით, რომელთა შედეგადაც გამოიყოფა ან შთანთქმდება სითბო. სისტემის ერთი თბური მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლის დროს

ტემპერატურული ველის ცვლილება ჩვეულებრივ კონტროლდება სისტემის ერთ წერტილში ან ნაწილში, რის საფუძველზეც განისაზღვრება კალორიმეტრული ცდის ტემპერატურული მრუდი, ანუ ტემპერატურის დროზე დამოკიდებულება. ტემპერატურული მრუდის ხასიათი განისაზღვრება საწყის მომენტში ტემპერატურის ველის უთანაბრობით, კალორიმეტრული სისტემის თბური თვისებებით და გარემოსთან თბოცვლის ხასიათით.

თუ სიტბო, რომელიც გამოიყოფა კალორიმეტრულ სისტემაში, იხარჯება თბოშემცველობის გაზრდაზე, მაშინ სამართლიანი იქნება შემდეგი განტოლება

$$Q = H(\vartheta_f - \vartheta_0), \quad (1)$$

სადაც Q არის სიტბოს რაოდენობა; H - სისტემის ჯამური სიტბოტევადობა; ϑ_f და ϑ_0 - სისტემის საბოლოო და საწყისი ტემპერატურები შესაბამისად.

უნდა აღინიშნოს, რომ კალორიმეტრულ სისტემას არ აქვს მკაფიო საზღვრები, რაც ართულებს მისი ჯამური სიტბოტევადობის განსაზღვრას. საზღვრად ჩაითვლება კალორიმეტრული სისტემის ზედაპირი, რომელიც იმყოფება გარემოსთან თბოცვლის პირობებში. თუ თბოცვლის პირობები ერთნაირია ზედაპირის ნებისმიერი ნაწილისათვის, მაშინ საზღვარი იქნება სისტემის გეომეტრიული ზრდაპირი (მაგალითად, თბოცვლის პირობები იზოთერმულ ან ადიაბატურ გარსაცმთან). ხოლო, თუ ეს პირობები არაერთგვაროვანია, მაგალითად, გარსაცმთან თბოცვლა ხორციელდება ერთდროულად თბური გამოსხივებით და თბოგამტარობით, მაშინ სისტემის საზღვარი ხდება განუსაზღვრელი. მაგალითად, წყლის კალორიმეტრში სარეველას და თერმომეტრის ნაწილი იმყოფება კალორიმეტრულ ჭურჭელში, ხოლო სხვა ნაწილი გარსაცმში და კალორიმეტრის თავზე. ასეთ პირობებში სისტემის ელემენტები იწვევენ კალორიმეტრის ტემპერატურული ველის დამახინჯებას და კალორიმეტრული საზღვრების განუზღვრელობას.

კონკრეტული სისტემისათვის მოცემული საწყისი და საბოლოო ტემპერატურული ველის პირობებში შეიძლება განვსაზღვროთ პარამეტრი H . ამ შემთხვევაში ეს პარამეტრი ახასიათებს კალორიმეტრულ სისტემას იმ თვალსაზრისით, რომ ტემპერატურა სისტემაში შეიცვლება სისტემაში გამოყოფილი სითბოს შესაბამისად.

(1) განტოლებიდან გამომდინარეობს, რომ სითბოს რაოდენობის (Q) განსაზღვრისათვის აუცილებელია თბური ეკვივალენტის (H) და ტემპერატურული ნაზრდის ($\theta_f - \theta_0$) განსაზღვრა. თბური ეკვივალენტის განსაზღვრა შესაძლებელია აბსოლუტური და ფარდობითი მეთოდით. აბსოლუტური მეთოდი შემდეგში მდგომარეობს: კალორიმეტრულ სისტემას სითბო გადაეცემა მასში მოთავსებულ წინაღობაში ელექტრული დენის გავლით. გადაცემული სითბოს რაოდენობა განისაზღვრება წინაღობაში გამავალი დენის ძალის სიდიდის, წინაღობის ბოლოებზე ძაბვის სიდიდის და დენის გავლის ხანგრძლივობის გაზომვით. ამ სიდიდეების გაზომვა სასურველი სიზუსტით გარკვეულ სიძნელებთანაა დაკავშირებული და ექსპერიმენტის ჩატარების თვალსაზრისით საკმაოდ მოუხერხებელია. თბური ეკვივალენტის განსაზღვრის ფარდობითი მეთოდი გულისხმობს კალორიმეტრული გაზომვების ჩატარებას ცნობილი თბოუნარიანობის მქონე ნივთიერების (სანიმუშო ნივთიერების) გამოყენებით, ანუ კალორიმეტრული სისტემის კალიბრებას. ამ შემთხვევაში კალორიმეტრული სისტემის თბური ეკვივალენტი (1) გამოსახულებით განისაზღვრება. ფარდობით მეთოდს შემდეგი უპირატესობები გააჩნია:

1. ატესტირებული სანიმუშო ნივთიერების გამოყენების შემთხვევაში გაზომვის სიზუსტე პრაქტიკულად არ მცირდება;
2. შესაძლებელი ხდება კალორიმეტრული სისტემის ტემპერატურის ცვლილების მრუდები პრაქტიკულად ერთნაირი იყოს კალიბრებისა და ძირითადი გაზომვების დროს, რაც პრაქტიკულად გამორიცხავს შესაძლო სისტემატურ ცდომილებებს. ეს მიიღწევა შესაფერისი თბოუნარიანობის მქონე სანიმუშო ნივთიერების შერჩევით;

3. ექსპერიმენტის ჩატარების თვალსაზრისით კალორიმეტრის კალიბრება სანიმუშო ნივთიერების გამოყენებით უფრო მოხერხებულია.

სითბური სიდიდეების (სითბოს რაოდენობა, ენტალპია, თბური ნაკადი, სითბოტევადობა) გაზომვის მეთოდებიდან ცნობილია სამი ჯგუფი: შერევის მეთოდი, სითბოს შიგა წყაროს მეთოდი და სითბოს ნაკადის მეთოდი.

შერევის მეთოდის მიხედვით გაცხელებული ნიმუში შეყავთ კალორიმეტრში, რაც იწვევს კალორიმეტრული სისტემის ტემპერატურის ზრდას. კალორიმეტრზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა განისაზღვრება (1) ფორმულით.

სითბოს შიგა წყაროს მეთოდი შეიძლება განხორციელდეს ორი ვარიანტით: პირველი ვარიანტის მიხედვით იზომება სითბოს რაოდენობა, რომელიც გამოიყოფა სითბოს წყაროთი დროის გარკვეულ პერიოდში (სითბოს პერიოდული მიწოდების ვარიანტი). მეორე ვარიანტი შემდეგში მდგომარეობს: კალორიმეტრულ სისტემას უწყვეტად მიეწოდება გარკვეული რაოდენობის სითბური სიმძლავრე (უწყვეტი გაცხელების მეთოდი). საანგარიშო ფორმულას აქვს შემდეგი სახე:

$$w = H(\vartheta) \frac{d\vartheta}{d\tau}, \quad (2)$$

სადაც w არის სითბოს წყაროს თბური სიმძლავრე, $H(\vartheta)$ - სისტემის სრული სითბოტევადობა ϑ ტემპერატურაზე, $\frac{d\vartheta}{d\tau}$ ტემპერატურის ცვლილების სიჩქარე. სითბოს შიგა წყაროს უწყვეტი გაცხელების მეთოდი გამოიყენება სითბოტევადობის და ტემპერატურაგამტარობის კოეფიციენტების გასაზომად.

სითბოს ნაკადის მეთოდი ხორციელდება კალორიმეტრში მუდმივი სიჩქარით და უწყვეტად გაზის ან სითხის გატარებით. კალორიმეტრში ნივთიერება კარგავს ან იღებს სითბოს. ცნობილია, რა კალორიმეტრში შეტანამდე ნივთიერების ტემპერატურა ϑ_0 და მისი საბოლოო ტემპერატურა ϑ_f , სითბოს რაოდენობა განისაზღვრება (1) ფორმულით. ასეთ

შემთხვევისათვის კალორიმეტრული სისტემის სითბოტევადობა $H = Mc$, , სადა M არის ნივთიერების მასა, რომელიც გაივლის კალორიმეტრში, c - ნივთიერების ხვედრითი სითბოტევადობა.

1.3. კალორიმეტრული ექსპერიმენტი

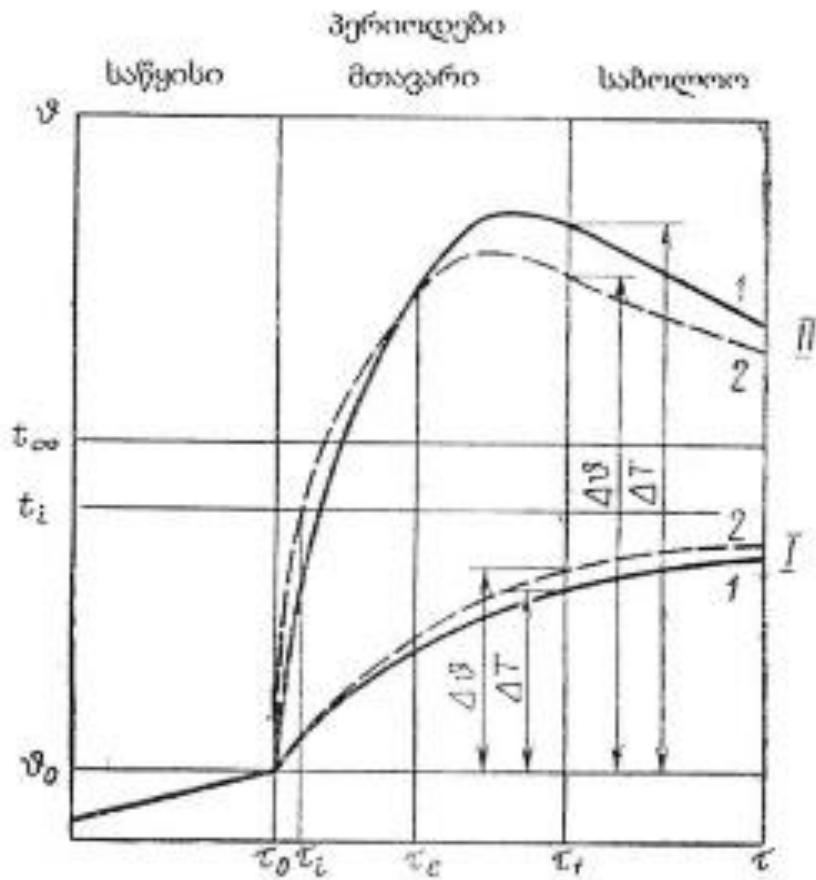
კალორიმეტრში მიმდინარე თბური პროცესის ინტენსივობა და სიჩქარე განსაზღვრავს კალორიმეტრის ცდის ტემპერატურის მრუდის სახეს. ბუნებრივია, რომ კალორიმეტრული სისტემის ცალკეული ნაწილების თბური თვისებები, ასევე გავლენას ახდენენ ტემპერატურის ველის ხასიათზე.

კალორიმეტრული სისტემა შეიძლება მოთავსებული იყოს იზოთერმულ გარსაცმში. მაშინ კალორიმეტრული სისტემისა და გარსაცმის განსხვავებული ტემპერატურული პირობების შემთხვევაში, მათ შორის წარმოიშობა თბოცვლა, რომელიც დაამახინჯებს კალორიმეტრის ტემპერატურის მრუდს. შესაბამისად აუცილებელია თბოცვლაზე შესწორების გათვალისწინება.

ექსპერიმენტების ჩატარება ყველაზე უფრო მარტივია, როცა კალორიმეტრს აქვს იზოთერმული გარსაცმი, როცა ბირთვის და გარსაცმს დროის ნებისმიერ მომენტისათვის აქვთ ერთნაირი ტემპერატურა. მაგრამ ამ შემთხვევაშიც კი საჭიროა პრაქტიკულად არსებული გარკვეული ტემპერატურათა სხვაობის გათვალისწინება.

იმისათვის, რომ გამოირიცხოს კალორიმეტრის გარემოსთან თბოცვლის პროცესი, კალორიმეტრს ათავსებენ გარსაცმში, რომლის ტემპერატურა დროის ნებისმიერ მომენტისათვის კალორიმეტრის ზედაპირული ტემპერატურის ტოლია. ამიტომ ადგილი არ აქვს კალორიმეტრის გარემოსთან თბოცვლას. შედეგად კალორიმეტრში გამოყოფილი სითბო არ იკარგება და ტემპერატურული მრუდი არ დამახინჯდება. პრაქტიკაში ყოველთვის ვერ ხერხდება მკაცრად ადიაბატური პირობების შესრულება. ამიტომ კალორიმეტრის და გარსაცმის

არაკომპენსირებულ ტემპერატურათა სხვაობაზე უნდა გაკეთდეს შესაბამისი შესწორება.



სურათი 7. კალორიმეტრული ცდის ტემპერატურული მრუდები

სურათ 7-ზე ნაჩვენებია კალორიმეტრული ცდის ტემპერატურული მრუდები, როცა კალორიმეტრს გააჩნია t_f ტემპერატურის მქონე იზოთერმული გარსაცმი. ნაჩვენებია ორი შემთხვევა (I და II). პირველი შემთხვევა შეესაბამება ისეთ თბურ პროცესებს, რომლის დროსაც ტემპერატურა ცდის დროს მუდმივად რჩება გარსაცმის ტემპერატურაზე ნაკლები (I შემთხვევის მრუდი 1). მეორე შემთხვევა ხასიათდება იმით, რომ კალორიმეტრის ტემპერატურა დასაწყისში ნაკლებია გარსაცმის ტემპერატურაზე, ხოლო შემდეგ ცდის ბოლომდე აღემატება მას (II შემთხვევის მრუდი 1) [5].

კალორიმეტრული ცდა იყოფა სამ პერიოდად: საწყისი, მთავარი და საბოლოო. სამივე პერიოდში ტემპერატურის ცვლილების მონაცემების მიხედვით გამოითვლება კალორიმეტრში გამოყოფილი სითბო.

საწყის პერიოდში ($\tau < \tau_0$) კალორიმეტრულ სისტემაში ტემპერატურის გრადიენტი მცირეა, თბოცვლა გარემოსთან ზრდის კალორიმეტრის ტემპერატურას, თუ იგი ნაკლებია გარსაცმის ტემპერატურაზე. ცდის საწყის პერიოდში ტემპერატურის ზრდა შეიძლება გამოწვეული იყოს აგრეთვე სითბოს წყაროს მოქმედებით, მაგალითად, წინაღობის თერმომეტრში საზომი დენის გავლის გამო, ან კალორიმეტრული სითბის შემრევით. თუ τ_0 მომენტში კალორიმეტრში გამოიყოფა სითბო, მაშინ ამ სითბოს რაოდენობის მიხედვით კალორიმეტრის ტემპერატურულ მრუდს ექნება I ან II სახე. შიგა სითბოს წყაროს არსებობისას და გარსაცმთან თბოცვლის შემთხვევაში კალორიმეტრის ტემპერატურა მიისწრაფვის ზღვრული ტემპერატურისაკენ - t_∞ , რომელიც ჩვეულებრივ აღემატება გარსაცმის ტემპერატურას. წყლის კალორიმეტრული სისტემებისათვის $t_\infty - t_i \approx 0.3 - 0.5^\circ C$.

როცა კალორიმეტრული სისტემასა და გარსაცმს შორის თბოცვლას ადგილი არ აქვს (ადიაბატური გარსაცმი) ტემპერატურა იცვლება მხოლოდ გამოსაკვლევი პროცესის შედეგად (მრუდი 1 I და II შემთხვევებისათვის).

I შემთხვევისათვის, როცა $\vartheta < t_\infty$, ($t_\infty - t_i \approx 0.3 - 0.5^\circ C$), და ადგილი აქვს თბოცვლას, მრუდი 2 ყოველთვის მრუდი 1-ის ზემოთ იქნება.

II შემთხვევისათვის, როცა $\vartheta_0 < \vartheta < t_i$ ადგილი ექნება სითბოს მოდინებას გარსაცმიდან კალორიმეტრისკენ და ϑ_1 ტემპერატურა, რომელიც შეესაბამება მრუდ 1-ს, იქნება უფრო დაბლა ვიდრე მრუდი 2-ის შესაბამისი ϑ_2 ტემპერატურა; $\tau = \tau_e$ მომენტში ტემპერატურები იქნება ერთმანეთის ტოლი $\vartheta_1 = \vartheta_2$, ხოლო შემდეგ ტემპერატურა ϑ_2 გახდება ϑ_1 -ზე ნაკლები. 1 და 2 მრუდების მაქსიმუმები ერთმანეთს არ ემთხვევა.

კალორიმეტრის მთავარი პერიოდი შეესაბამება დროის შუალედს, როცა სისტემაში გამოიყოფა სითბო. ნახაზზე იგი შეესაბამება დროის ინტერვალს $\tau_f - \tau_0$.

მთავარი პერიოდის დამთავრების განსაზღვრა რთული ამოცანაა. ეს აიხსნება იმით, რომ მთავარი პერიოდის ბოლოს კალორიმეტრის ტემპერატურა იცვლება, როგორც გამოყოფილი სითბოს გავლენით, აგრეთვე კალორიმეტრის თბოცვლით გარემოსთან. მთავარი პერიოდის დამთავრების შესაფასებლად ყველაზე უფრო გავრცელებული კრიტერიუმია $\tau = \tau_f$ მომენტის ფიქსირება, როცა კალორიმეტრის ტემპერატურა მუდმივი სიჩქარით იწყებს შეცვლას ტემპერატურის მატებით (შემთხვევა I) ან კლებით (შემთხვევა II).

არსებობს ცდის დამთავრების განსაზღვრის ანალიზური მეთოდები. კალორიმეტრული ცდის ბოლო პერიოდი ეწოდება პერიოდს, როცა ტემპერატურა იცვლება კალორიმეტრის გარემოსთან თბოცვლით. საბოლოო პერიოდი $\tau > \tau_f$ უშუალოდ ესაზღვრება მთავარ პერიოდს.

(1) განტოლების თანახმად, კალორიმეტრში გამოყოფილი სითბოს რაოდენობის დასადგენად საჭიროა კალორიმეტრული სისტემის თბური ექვივალენტის და ტემპერატურის ნაზრდის ცოდნა. ეს განტოლება სამართლიანია იმ შემთხვევაში, როცა სითბოს ცვლა გარემოსთან არ ხდება.

ხშირად კალორიმეტრული სისტემა არასაკმარისად არის იზოლირებული გარე თბური ზემოქმედებისაგან. ამიტომ სითბოს ზუსტი გაანგარიშებისათვის აუცილებელია შესწორებების გათვალისწინება. ანუ უნდა განისაზღვროს სითბოს რაოდენობა q , რომელსაც კარგავს ან იღებს სისტემა გარემოსაგან დამატებითი თბური პროცესით, ან უნდა განისაზღვროს ტემპერატურის ცვლილება Δt რომელიც გამოწვეულია ამ სითბოს ნაკადით. ასეთ შემთხვევაში, ანუ, როდესაც ადგილი აქვს კალორიმეტრსა და გარემოს შორის სითბოს ცვლას, (1) განტოლება მიიღებს სახეს

$$Q = H(\vartheta_f - \vartheta_0) + q.$$

ამ განტოლებაში $q = H\Delta t$, სადაც Δt არის თბოცვლაზე ტემპერატურული შესწორება.

ასეთ შემთხვევაში სამართლიანია განტოლება

$$Q = H(\Delta\theta + \Delta t) = H\Delta T,$$

სადაც ΔT არის კალორიმეტრში ტემპერატურის ნაზრდი, გამოწვეული შესასწავლი სითბური ეფექტის გავლენით.

სურათ 7-დან ჩანს, რომ I შემთხვევისთვის ტემპერატურის ხილული ნაზრდი აღემატება ნამდვილ ნაზრდს - $\Delta\theta > \Delta T$, ამიტომ თბოცვლაზე ტემპერატურული შესწორება უარყოფითია ($\Delta t < 0$). II შემთხვევისთვის $\Delta\theta < \Delta T$ და $\Delta t > 0$. მაგრამ მრუდებისთვის, რომლებიც ხასიათდებიან მაქსიმუმებით (II შემთხვევის 1 და 2 მრუდები), თანაფარდობა $\Delta\theta$ -სა და ΔT -ს შორის დამოკიდებულია მრუდების ფორმაზე და ცდის ორი პერიოდის ხანგრძლივობებზე. ერთ-ერთი მათგანი მოიცავს დროს $\tau_i - \tau_0$, ხოლო მეორე - $\tau_f - \tau_i$. თუ სითბოს რაოდენობა, რომელსაც კარგავს კალორიმეტრი $\tau_f - \tau_i$ დროში მეტი იქნება კალორიმეტრის მიერ $\tau_i - \tau_0$ დროში მიღებულ სითბოზე, მაშინ ტემპერატურული შესწორება იქნება დადებითი - $\Delta t > 0$.

1.4. კალორიმეტრულ სისტემაში სითბოსცვლის პროცესები

კალორიმეტრული სისტემა წარმოადგენს სხვადასხვა ელემენტების ერთობლიობას, რომელთა შორისაც ხდება თბოცვლა. იგი შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც არაერთგვაროვანი ბირთვი, რომელშიც მიმდინარეობს შესასწავლი სითბოს გამოყოფა ან შთანთქმა და გარსაცმი, რომელთანაც ბირთვი თბოცვლის პროცესშია. ასეთ სისტემაში ტემპერატურის ცვლილების კანონზომიერება დამოკიდებულია მრავალ ფაქტორზე. მათ შორის ყველაზე მნიშვნელოვანია ბირთვის თბური თვისებები, როგორებიცაა: თბოგამტარობა, ტემპერატურაგამტარობა, სითბოტევადობა. ტემპერატურის ცვლილების კანონზომიერება დამოკიდებულია ასევე კალორიმეტრული სისტემის ცალკეულ ელემენტებს

შორის თბური კავშირების ხასიათზე და ბირთვისა და გარსაცმს შორის თბური კავშირებზე [5].

კალორიმეტრული სისტემა შეიძლება შედგებოდეს აირადი, თხევადი ან მყარი სხეულებისაგან. აქედან გამომდინარე, თბოცვლა მათ შორის შეიძლება წარმოებდეს როგორც თბოგამტარობით, ასევე კონვექციით და გამოსხივებით.

სხეულებს შორის თბოცვლა თბოგამტარობით ხორციელდება იმ შემთხვევაში, თუ სხეულები ერთმანეთს ეხება. თბოგამტარობით სითბოს გადაცემა შესაძლებელია აირებშიც, სითხეებშიც და მყარ სხეულებშიც. აირებში და სითხეებში ენერგია გადაეცემა სხვადასხვა კინეტიკური ენერგიის მქონე მოლეკულების შეჯახებით. მაგრამ ამ პროცესს სუფთა სახით არ აქვს ადგილი, ვინაიდან ასეთი სახით სითბოს ცვლას თან ახლავს კონვექცია.

მყარ სხეულებში სითბოს გადაცემა ხდება ელექტრონებით და ნივთიერების მესერით.

თბოგადაცემის შესწავლის დროს გამოყოფენ სისტემის ნაწილს, რომლისთვისაც თბური თვისებები შეიძლება ჩაითვალოს მუდმივ სიდიდეებად.

კონვექციით სითბოს გადაცემა ხდება აირად და თხევად სხეულებში. კონვექციით სითბოს გადაცემისას უფრო მაღალი ტემპერატურის მქონე სითხის ან აირის მოცულობები გადაადგილდება ზემოთ, ხოლო უფრო დაბალი ტემპერატურის მქონე მოცულობები ეშვება ქვემოთ მათ ადგილზე. კონვექციის ასეთი ტიპი ცნობილია, როგორც ბუნებრივი ანუ თავისუფალი კონვექცია. თუ სხეულის ნაწილაკები შეერევა ერთმანეთს გარე ფაქტორების ზემოქმედების შედეგად (მაგალითად ტუმბოს საშუალებით) მაშინ სითბოს გადაცემას უწოდებენ იძულებით კონვექციას.

კალორიმეტრული სისტემისათვის დამახასიათებელია ბუნებრივი კონვექცია. მაგალითად, თბოუნარიანობის განსაზღვრისას კალორიმეტრში თბოცვლა ხდება ბუნებრივი კონვექციით ბირთვისა (კალორიმეტრულ

ყუმბარასა), რომელიც მოთავსებულია წყლიან კალორიმეტრულ ჭურჭელში, და გარსაცმს შორის. მასიურ კალორიმეტრში, რომელიც გამოიყენება ხვედრითი სითბოტევადობის ან თბოუნარიანობის გასაზომად, სითბოს ცვლა ხდება მასიურ ლითონის ბირთვისა და კალორიმეტრის კედლებს შორის.

სითბოს გადაცემა გამოსხივებით ხორციელდება სხეულების ზედაპირებს შორის რომლებიც გაყოფილია გარემოთი, რომელიც ატარებს ამ გამოსხივებას. სხეულის თბური ენერგია გარდაიქმნება ელექტრომაგნიტურ თბურ გამოსხივებად რომლის ნაწილი შთაიმთქმება სხვა სხეულების მიერ და გარდაიქმნება თბურ ენერგიად. გარკვეული ზომით გამოსხივებითი თბოცვლა ხდება ყველა კალორიმეტრში. ვაკუუმურ კალორიმეტრში ბირთვისა და გარსაცმს შორის თბოცვლა ხორციელდება თბური გამოსხივების კანონებით.

პრაქტიკულად რეალურ კალორიმეტრულ სისტემაში თბოცვლა ცალკეულ ნაწილებს შორის ხორციელდება ერთი ან რამდენიმე მექანიზმით. მაგალითად, თბოცვლა ბირთვისა და გარსაცმს შორის, რომლებიც გაყოფილია ჰაერის ფენით, ხორციელდება თბოგამტარობით, კონვექციით და გამოსხივებით. თუ საჭიროა თბოცვლის შემცირება, ამცირებენ მანძილს ბირთვისა და გარსაცმს შორის, რაც მინიმუმამდე ამცირებს ბუნებრივ კონვექციას. ამ დროს შესაბამისად იზრდება თბოგამტარობის და გამოსხივების წილები.

კალორიმეტრში, რომელშიც ხდება ქიმიური რეაქციის თბური ეფექტის გაზომვა, ყუმბარიდან წყალზე სითბოს გადაცემა ძირითადად ხდება იძულებითი კონვექციით (საცირკულაციო წყლის გადაადგილება), თუმცა თბოცვლის უმნიშვნელო ნაწილი მოდის თბოგამტარობის მექანიზმზე.

1.4.1. თბოგამტარობის განტოლება.

სითბოს გადატანა სხეულში ხდება სხვადასხვა ტერმპერატურის მქონე ზედაპირებს შორის. განიხილება ისეთი ზედაპირები, რომელთაც აქვთ

ერთნაირი ტემპერატურები (იზოთერმული ზედაპირები). სითბოს გავრცელების მიმართულება ემთხვევა იზოთერმული ზედაპირების ნორმალის მიმართულებას და სპირისპიროა ტემპერატურის გრადიენტის.

სხეულში სითბოს გავრცელების მათემატიკურ ფორმულას აქვს სახე (ფურიეს კანონი):

$$q = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n}.$$

ამ ფორმულის მიხედვით სითბოს რაოდენობის სიმკვრივე პროპორციულია ტემპერატურის გრადიენტის. სითბოს სიმკვრივე არის სითბოს რაოდენობა, რომელიც გადის 1მ^2 იზოთერმულ ზედაპირში ერთი წამის განმავლობაში. მისი განზომილებაა ვტ/მ².

თბოგამტარობა არის ტემპერატურის ფუნქცია, მაგრამ გარკვეული ამოცანის გადაწყვეტისას, კერძოდ, თუ ტემპერატურის ცვლილება შემოსაზღვრულია, შეიძლება ჩაითვალოს, რომ, თბოგამტარობა არ არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე. კალორიმეტრულ ცდებში, სადაც ტემპერატურა იცვლება მხოლოდ რამდენიმე გრადუსით, შეიძლება ჩაითვალოს, რომ თბოგამტარობა პრაქტიკულად არ არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე.

ენერგიის მუდმივობის კანონისა და ფურიეს კანონის საფუძველზე შეიძლება გამოყვანილი იქნეს თბოგამტარობის განტოლება. სხეულში, რომელშიც მოქმედებს თანაბრად განაწილებული სითბოს წყარო, თბოგამტარობის განტოლებას აქვს სახე:

$$c\gamma \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \omega,$$

სადაც τ არის დრო, წმ; $c=f_2(x,y,z,\tau)$ - ხვედრითი სითბოტევადობა, ჯ/კგ/°C; $\gamma=f_3(x,y,z,\tau)$ - სიმკვრივე, კგ/მ³; ω - თბური წყაროს სიმძლავრე ერთეულ მოცულობაში, ვტ/მ³; $\lambda=f_4(x,y,z,\tau)$ - თბოგამტარობისკოეფიციენტი, ვტ/მ/°C.

მოცემული დიფერენციალური განტოლება გამოსახავს სხეულში ტემპერატურული ველის განაწილებას [6].

არჩევნ ოთხი სახის სასაზღვრო პირობას. პირველი სახის სასაზღვრო პირობის თანახმად მოცემულია ტემპერატურის განაწილება დროის ნებისმიერი მომენტისთვის:

$$\vartheta_s = f_1(x_s, y_s, z_s, \tau);$$

მეორე სახის სასაზღვრო პირობის მიხედვით მოცემულია სითბური ნაკადის განაწილება:

$$q_s = f_2(x_s, y_s, z_s, \tau);$$

მესამე სახის სასაზღვრო პირობის მიხედვით მოცემულია თბოცვლის პირობები, რომელიც აღიწერება ნიუტონის კანონით:

$$q_s = q_\alpha;$$

მეოთხე სახის სასაზღვრო პირობის თანახმად:

$$\begin{aligned} \vartheta_{1s}(\tau) &= \vartheta_{2s}(\tau), \\ -\lambda_1 \frac{\partial \vartheta_{1s}(\tau)}{\partial n} &= -\lambda_2 \frac{\partial \vartheta_{2s}(\tau)}{\partial n}. \end{aligned}$$

1.4.2. კონვექციური თბოცვლა.

მყარი სხეული, რომელიც მოთავსებულია აირის ან სითხის გარემოში კარგავს ან ღებულობს სითბოს თუ მას აქვს გარემოსაგან განსხვავებული ტემპერატურა. სითბოცვლის მიკროსურათი არის ძალიან რთული და დამოკიდებულია სხვადასხვა ფაქტორებზე გარემოს თვისებების ჩათვლით.

სითბოს გადაცემის მექანიზმი აირისა და სითხეების არეში გარკვეულად განსხვავდება ერთმანეთისაგან. სხეულის ზედაპირის უშუალოდ სიახლოვეს სითბოს გადაცემა გარემოში ხორციელდება თბოგამტარობით. თუ გარემო გამჭვირვალეა გამოსხივებისათვის, მაშინ სხეულმა შიძლება სითბო დაკარგოს გამოსხივებით. თბოცვლა შეიძლება მიმდინარეობდეს ბუნებრივი ან იძულებითი კონვექციით. მყარი სხეულის თბოცვლა აირად ან სითხის გარემოსთან აიწერება მიახლოებითი ანალიზური დამოკიდებულებით, რომელიც ცნობილია ნიუტონის კანონით:

$$q = \alpha(\vartheta_s - t_i),$$

სადაც g_s არის სხეულის ზედაპირის ტემპერატურა, t_i - გარემოს ტემპერატურა. მოცემული გამოსახულებიდან გამომდინარეობს, რომ სითბოს ნაკადის სიმკვრივე სხეულისა და გარემოს შორის ტემპერატურათა სხვაობის პროპორციულია. პროპორციულობის კოეფიციენტს - α -ს ეწოდება თბოგაცემის კოეფიციენტი. თუ თბოცვლა ხორციელდება ძირითადად კონვექციით, მაშინ თბოგაცემის კოეფიციენტს ეწოდება კონვექციური თბოცვლის კოეფიციენტი [7].

ცდები ჩვენებს, რომ რთული კონფიგურაციის მქონე სხეულის სხვდასხვა უბანზე თბოგაცემა დამოკიდებულია სხეულის გეომეტრიაზე და განისაზღვრება აირის ან სითხის მოძრაობის სიჩქარით. ეს განსხვავებები ართულებს თბოგაცემის ამოცანის თეორიულ შესწავლას. ამიტომ უმარტივეს შემთხვევაშიც კი მათემატიკური სირთულეების გამო თბოგაცემის უმრავლესი ამოცანა ამოიხსნება მხოლოდ ისეთი მიახლოებით, რომ თბოგაცემის კოეფიციენტი არ არის დამოკიდებული განსახილველი სხეულის წერტილების კოორდინატებზე. ცალკეული უმარტივესი შემთხვევებისათვის შესაძლებელია მათემატიკური ანალიზის სიზუსტის გაზრდა.

თბოგამტარობის ანალიზური თეორიის მიხედვით მყარი სხეულის საზღვარზე თბური ბალანსი ჩაიწერება ასე:

$$dq = dq_\alpha,$$

ანუ, dq სითბო, რომელიც მიეწოდება სხეულის საზღვარს მისი შიგა ნაწილიდან, გადაეცემა გარემოს და გაიბნევა მასში (dq_α).

ფურიესა და ნიუტონის კანონების გამოყენებით მიიღება [7]:

$$-\lambda_1 \frac{\partial g(\tau)}{\partial n} = \alpha(g_s - t_i).$$

წყლის კალორიმეტრში რეაქციის თბური ეფექტის განსაზღვრისათვის, (მაგალითად წვის სითბოს) ყუმბარას ათავსებენ წყლიან კალორიმეტრულ ჭურჭელში. თუ ჭურჭელში წყლის არევის პირობები

ისეთია (ინტენსიური არევა), რომ თბოგაცემის კოეფიციენტი შესაძლებელია ჩაითვალოს უსასრულოზად, მაშინ

$$\theta_s = t_i,$$

ე.ი. ყუმბარის ზედაპირზე ტემპერატურა θ_s ტოლია ჭურჭელში წყლის ტემპერატურის t_i .

კალორიმეტრული ჭურჭლის ზედაპირსა და გარსაცმს შორის თბოგაცემის კოეფიციენტს აქვს სასრული მნიშვნელობა. იგი შეიძლება განისაზღვროს ექსპერიმენტული მონაცემებიდან, რისთვისაც საჭიროა კალორიმეტრული ცდის საწყისი და საბოლოო პერიოდების ექსპერიმენტული განსაზღვრა.

1.4.3. თბოცვლა გამოსხივებით

თუ მყარი სხეული იმყოფება სხვა სხეულების გარემოცვაში და მათი გამყოფი გარემო არის გაზი ან სითხე, რომელც სრულად არ შთანთქავს გამოსხივებას, მაშინ ადგილი ექნება მათთან გამოსხივებით თბოცვლის პროცესს. სითბოს რაოდენობა რომელსაც ასხივებს აბსოლუტურად შავი სხეული ერთეული ზედაპირიდან დროის ერთეულში იანგარიშება ფორმულით:

$$q = \sigma_0 T^4,$$

სადაც $\sigma_0 = 5,7 \cdot 10^{-8}$ ვტ/(მ²T⁴) არის აბსოლუტურად შავი სხეულის გამოსხივების მუდმივა, T - გამოსხივების ზედაპირის ტემპერატურა [7].

ეს ფორმულა წარმოადგენს სტეფან-ბოლცმანის კანონის მათემატიკურ გამოსახულებას, რომლის მიხედვითაც: თბური ნაკადის სიმკვრივე პროპორციულია აბსოლუტური ტემპერატურის მეოთხე ხარისხის.

ტექნიკური გაანგარიშებების დროს გამოსხივება იანგარიშება ფორმულით

$$q = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

სადაც $C_0 = 10^8 \cdot \sigma_0 = 5,7$ ვტ/(მ²Т⁴) აბსოლუტურად შავი სხეულის გამოსხივების კოეფიციენტი.

რეალური სხეულების გამოსხივების კოეფიციენტი $C < C_0$, და სტეფან-ბოლცმანის კანონი ასე ჩაიწერება

$$q = C \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

მოცემულ გამოსახულებაში $C = \varepsilon C_0$, სადაც ε - არის ნაცრისფერი სხეულის გამოსხივების ხარისხი (სიშავის ხარისხი).

გამოსხივებული ან შთანთქმული ენერჯიის გამოსათვლელად უნდა გავითვალისწინოთ სხეულების ზედაპირების გეომეტრული ფორმები და ურთიერთმდებარეობები, რომელთა შორისაც ხდება გამოსხივებით თბოცვლა.

ორ ბრტყელ ზედაპრს შორის თბოცვლა, რომელთა ტემპერატურებია T_1 და T_2 , ხოლო გამოსხივების კოეფიციენტებია C_1 და C_2 , თბური ნაკადი გამოითვლება ფორმულით:

$$q = C_{\text{დაყ}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right].$$

მოცემულ გამოსახულებაში $C_{\text{დაყ}}$ არის გამოსხივების დაყვანილი კოეფიციენტი და იგი გამოითვლება ფორმულით

$$\frac{1}{C_{\text{დაყ}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}.$$

როცა გამოსხივების ზედაპირებს აქვს რთული კონფიგურაცია მაშინ ფორმულა მნიშვნელოვნად რთულდება. გამოსახულება შეიძლება ასე ჩაიწეროს

$$q_{\text{გამ}} = \alpha_{\text{გამ}} (\vartheta_s - t_i),$$

სადაც $\alpha_{\text{გამ}}$ არის გამოსხივებით თბოცვლის კოეფიციენტი და იგი ტოლია

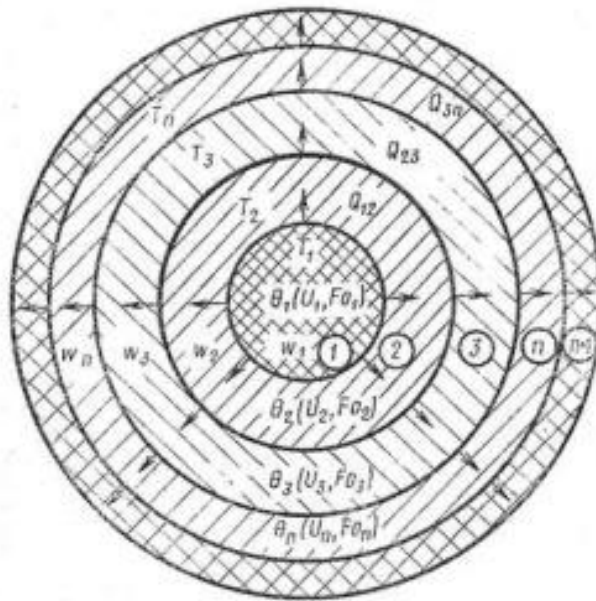
$$\alpha_{\text{გამ}} = 0,04 C_{\text{გამ}} \left(\frac{\vartheta_s + 273,15}{100} \right)^3.$$

თბოცვლა გამოსხივებით დამახასიათებელია ვაკუუმური
კალორიმეტრისათვის, რომელიც გამოიყენება სითბოტევადობის
გასაზომად.

თავი 2. კალორიმეტრული სისტემების მოდელირება

2.1. მოდელირების სახეები

კალორიმეტრულ სისტემაში მიმდინარე თბური პროცესების მათემატიკური მოდელირება შესაძლებელია გარკვეული გამარტივებების დაშვებით, რომელიც ეხება ამ სისტემის სახესა და თვისებებს. სისტემის სასაზღვრო და საწყისი პირობების გათვალისწინების შემთხვევაში შესაძლებელი ხდება ტემპერატურული ველის დროში ცვლილების ანალიზური გამოსახულების მიღება.



სურათი 8. კალორიმეტრული სისტემის განზოგადებული მოდელი

ნახ. 8-ზე ნაჩვენებია კალორიმეტრული სისტემის განზოგადებული მოდელი. კალორიმეტრული სისტემა შედგება მრავალი სხეულისაგან, რომლებიც ერთმანეთს გარს აკრავს. გამოვყოთ ერთერთი ერთგვაროვანი სხეული, რომელიც აღინიშნება ინდექსით 1. მასში შეყურსულია სითბოს წყარო (სითბოს გამოყოფით ან შთანთქმით) - გამოსაკვლევი ეფექტი. თითოეულ სხეულს გააჩნია სითბოს წყარო $W(W_1, W_2, \dots, W_n)$, თერმომეტრი $T(T_1, T_2, \dots, T_n)$. ტემპერატურის ცვლილება აიწერება განტოლებით $\theta(U, F_0)$, $(\theta_1(U_1, F_{01}); \theta_2(U_2, F_{02}); \dots, \theta_n(U_n, F_{0n}))$, სადაც $U(U_1, U_2, \dots, U_n)$ გარკვეული ფუნქციაა, რომელიც დამოკიდებულია გარემო სხეულებთან თბოცვლის

პირობებზე, თბოფიზიკურ თვისებებზე და სხეულის გეომეტრიულ ფორმაზე; F_0 - ფურიეს კრიტერიუმი (განზოგადებული დრო). შესაბამისი თბური ნაკადები აღნიშნულია $Q(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ [5].

კალორიმეტრული სისტემის განზოგადებული მოდელი იგება იმ დაშვებით, რომ შესასწავლი თბური ეფექტი W_1 ლოკალიზებულია სხეულში 1. სწორედ ეს თბური ეფექტი განსაზღვრავს სხეულებს შორის თბოცვლას. თერმომეტრები შეიძლება განლაგდეს ნებისმიერ n სხეულში. პრაქტიკულად კალორიმეტრები ისეა კონსტრუირებული, რომ სხეულთა სიტემა შემოსაზღვრება რიცხვით n , ანუ, სხეულები დაწყებული $(n+1)$ -დან არ ზემოქმედებენ კალორიმეტრული სისტემის დანარჩენ სხეულებზე.

უმრავლესი რეალური კალორიმეტრის მოდელი შეიძლება წარმოვიდგინოთ სისტემების სახით, რომლებიც ნაჩვენებია ნახ. 9-ზე. ყველა მოდელი შეიძლება შეიცავდეს თბური ენერჯის წყაროს (ან თბური ენერჯის არინების წყაროს), რომელიც მოთავსებულია მოცემული სისტემის ნებისმიერ სხეულში. ტემპერატურის საზომი ხელსაწყო მოთავსებულია ასევე ნებისმიერ სხეულში. სისტემა შედგება ერთ ბირთვისაგან - θ_1 , ან რამდენიმე შედგენილი ბირთვისაგან - θ_1 და θ_2 . ბირთვები გარედან დაცულია გარსაცმით T_i . გარსაცმსა და ბირთვს შორის არსებობს თბოცვლის გარემო. თბოცვლა ხდება თბოგამტარობით, კონვექციითა და გამოსხივებით. ამ სამივე სახის თბოცვლა ხასიათდება სრული თბოგაცემის α კოეფიციენტით. გარსაცმს აქვს მუდმივი ტემპერატურა T_i (იზოთერმული გარსაცმი), ან ცვალებადი ტემპერატურა (მაგალითად ადიაბატური გარსაცმი). მოდელირებული სხეულები შეიძლება იყოს გარკვეული ფორმის - სფერო ან შემოუსაზღვრელი ცილინდრი. ცალკეული სხეულის ტემპერატურული ველი აღიწერება განტოლებით $\theta(U, F_0)$, სადაც U არის გარკვეული ფუნქცია, რომელიც დამოკიდებულია გარსაცმთან თბოცვლის პირობებზე, სხეულის თბოფიზიკურ თვისებებზე და მის გეომეტრიულ ფორმაზე. F_0 - ფურიეს კრიტერიუმი (განზოგადებული დრო).

მოდელი I წარმოადგენს ერთგვაროვანი სხეულის უმარტივეს შემთხვევას. სხეულში არ არსებობს ტემპერატურის გრადიენტი, და ყველა შემდგომი მომენტისათვის სხეულის ყველა წერტილში ტემპერატურა ერთნაირია. (ასეთი მოდელი გამოყენებული იყო ადრე და ახლაც გამოიყენება [2,3].

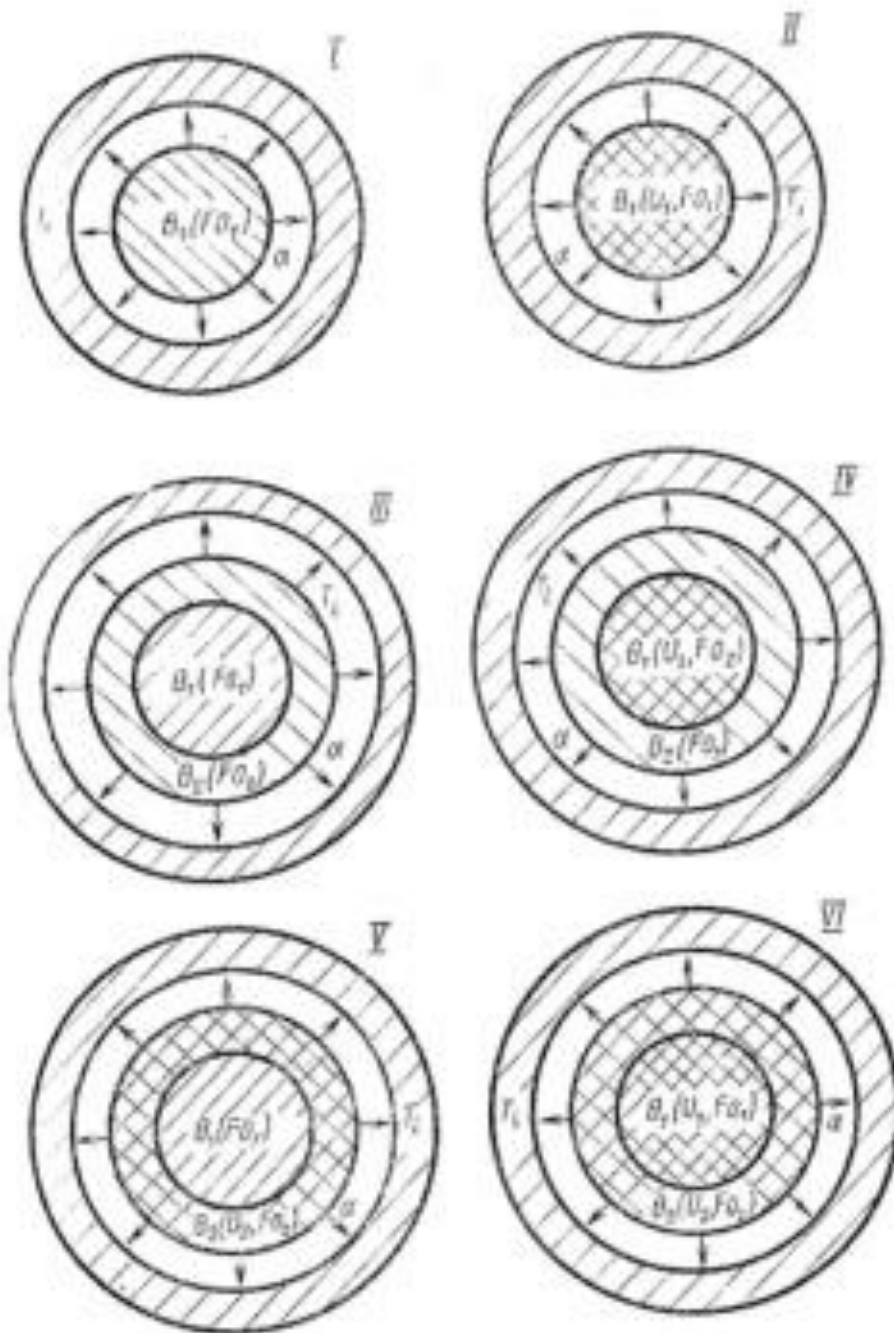
მოდელი II აღწერილია და შესწავლილია ა.ლიკოვის თბოგამტარობის თეორიის შრომებში. კალორიმეტრული სისტემის ბირთვი შეიძლება იყოს სითბოს წყაროთი აღჭურვილი, გარსაცმის ტემპერატურა შეიძლება იცვლებოდეს განსხვავებული კანონზომიერებით, ბირთვი შეიძლება წარმოადგენდეს სწორი ფორმის სხეულს - შემოუსაზღვრელი ფირფიტა, სფერო, შემოუსაზღვრელი ცილინდრი . ბირთვის ტემპერატურული ველი არის ბირთვის თბური თვისებების და გარსაცმთან თბოცვლის ფუნქცია [6].

მოდელი III წარმოადგენს ორი ბირთვისგან შედგენილ სხეულს. ტემპერატურის ცვლილება ხორციელდება გარსაცმთან თბოცვლის შედეგად. ეს შემთხვევა განხილულია გ.კონდრატიევის შრომებში [8].

მოდელი IV უფრო შეესაბამება არსებულ კალორიმეტრულ სისტემებს. მოდელის გული არის შედგენილი - ცენტრალური სხეული, რომელშიც მიმდინარეობს სითბოს გამოყოფა (ან შთანთქმა), ხასიათდება არათანაბარი ტემპერატურული ველით. მეორე სხეულში ადგილი არ აქვს ტემპერატურის გრადიენტს. ამ სხეულით ხდება თბოცვლა გარსაცმთან. გარსაცმის ტემპერატურა არის მუდმივი, ან იცვლება კანონზომიერებით [9,10].

მოდელ V-ს აქვს ორშედგენილიანი ბირთვი - ცენტრალური რომლის ტემპერატურა თანაბარია ნებისმიერ მომენტში და გარე სხეული თბოდაცავი გარსაცმი.

მოდელი VI. ყველაზე რთული მოდელია. მისი გამოყენება მოუხერხებელია რადგან ანალიზური გამოსახულებები გამარტივებული შემთხვევებისთვისაც კი რთული და დიდი ცდომილებების მქონეა [6].



სურათი 9. კალორიმეტრული სისტემების მოდელი

პრაქტიკულად კალორიმეტრიაში გამოყენებულია მე-4 და მე-5 მოდელები.

2.2. ტემპერატურული შესწორების ზოგადი ფორმულა

კალორიმეტრული სისტემის გარემოსთან თბოცვლა ამახინჯებს კალორიმეტრული სისტემის ტემპერატურული ველს. ეს იწვევს

გამოსაკვლევი თბური ეფექტით გამოწვეული ტემპერატურის ნაზრდის გაზომვის ცდომილებას.

კალორიმეტრული სისტემის თბური დანაკარგების წყაროებია: კალორიმეტრული ზედაპირის გარემოსთან თბოცვლა, თერმომეტრების და ნაპერწკლის ანთების წრედების გამომყვანების თბოგამტარობა. გარდა ამისა, სისტემის შიგნით შეიძლება მოქმედებდეს სითბოს მუდმივი ან ცვალებადი წყაროები, მაგალითად, წინაღობის თერმომეტრში გამავალი საზომი დენით გამოყოფილი სითბო, კალორიმეტრული სითხის შემრევის მიერ გამოყოფილი სითბო. სითბოს დანაკარგები შეიძლება გამოწვეული იყოს აგრეთვე კალორიმეტრული სითხის აორთქლებით.

ყოველ ცალკეულ შემთხვევაში აუცილებელია გათვალისწინებულ იქნას კალორიმეტრულ სისტემაში მიმდინარე თბოცვლის პროცესები და გაკეთდეს ამ პროცესების შესაბამისი ტემპერატურული შესწორებები.

თბოცვლაზე ტემპერატურის შესწორება შეიძლება შეფასდეს შემდეგი გამოსახულებით:

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3,$$

სადაც Δt_1 ითვალისწინებს შიგა დამატებითი სითბოს წყაროების სიმძლავრეს; Δt_2 ითვალისწინებს თბოცვლას გარემოსთან; Δt_3 ითვალისწინებს სითბოს სხვადასხვა დანაკარგებს, მაგალითად კალორიმეტრული სითხის აორთქლებით გამოწვეული სითბური დანაკარგები, თერმომეტრის თბოგამტარობით გამოწვეული სითბური დანაკარგები.

შესწორება სითბოს მუდმივი შიგა წყაროს არსებობის დროს - Δt_1 შეიძლება განისაზღვროს ანალიზურად. თუ შიგა სითბოს წყაროს სიმძლავრე დროის მიხედვით ცვალებადია, მაშინ საჭიროა ამ ცვლილების კანონზომიერების ცოდნა.

შესწორება გარემოსთან თბოცვლაზე - Δt_2 შეიძლება შეფასდეს თბოცვლის კოეფიციენტის საშუალებით, რომელიც ითვალისწინებს კონვექციას, თბოგამტარობას და გამოსხივებას.

კალორიმეტრული სითხის აორთქლება უნდა აღმოიფხვრას, რადგან მისი ანალიზური გზით შესწავლა რთულია. ყველა დანარჩენი ცდომილების წყაროების გავლენის გათვალისწინება შესაძლებელია შემასწორებელი კოეფიციენტით - Δt_3 .

2.3. ტემპერატურული შესწორებები თბოცვლის

პროცესზე

თუ კალორიმეტრულ სისტემაში მოქმედებს თბური ენერჯის მუდმივი წყარო, მაშინ გარემოში თბური dQ დანაკარგები $d\tau$ დროის განმავლობაში გამოითვლება ნიუტონის ფორმულით

$$dQ = \alpha \cdot S \cdot (\vartheta_s - t_\infty) \cdot d\tau,$$

სადაც ϑ_s არის კალორიმეტრის ზედაპირის ტემპერატურა; $t_\infty = t_i + \frac{\omega}{\alpha S}$ - ზღვრული ტემპერატურა; t_i - გარსაცმის ტემპერატურა; α - თბოგაცემის კოეფიციენტი; S - კალორიმეტრის ზედაპირის ფართობი. კალორიმეტრული სისტემის თბური დანაკარგები მთავარი პერიოდის ($\tau_f - \tau_i$) განმავლობაში გამოითვლება ამ განტოლების ინტეგრებით:

$$Q = \alpha \cdot S \cdot \int_{\tau_i}^{\tau_f} (\vartheta_s - t_\infty) d\tau \quad (2)$$

ამ შემთხვევაში მიღებულია, რომ თბოგაცემის კოეფიციენტი მუდმივია და სითხოს Q დანაკარგები იწვევს სისტემის ტემპერატურის ცვლილებას სიდიდით

$$\Delta t = \frac{Q}{H} \quad (3)$$

სადაც H - არის სისტემის თბური ეკვივალენტი.

(2) და (3) განტოლებებიდან მიიღება:

$$\Delta t = m \int_{\tau_i}^{\tau_f} \vartheta_s d\tau - m t_\infty (\tau_f - \tau_i) \quad (4)$$

სადაც $m = \frac{\alpha S}{H}$ არის სისტემის გაცივების ტემპი.

ტემპერატურის ცვლილება შეიძლება ასე ჩავწეროთ:

$$\Delta t = m(\bar{\mathcal{G}} - t_\infty)(\tau_f - \tau_i) \quad (5),$$

ამ გამოსახულებაში $\bar{\mathcal{G}}$ - არის მთვარ პერიოდში კალორიმეტრის საშუალო ტემპერატურა. იგი ტოლია

$$\bar{\mathcal{G}} = \frac{1}{(\tau_f - \tau_i)} \int_{\tau_i}^{\tau_f} \mathcal{G}_s d\tau. \quad (6)$$

ამრიგად თბოცვლაზე შესწორების გამოსათვლელად უნდა განისაზღვროს გაციების ტემპი, მთავარი პერიოდის საშუალო ტემპერატურა და ზღვრული ტემპერატურა.

გაციების ტემპი განისაზღვრება ექსპერიმენტული მონაცემებიდან:

$$m = \frac{g_i - g_f}{\mathcal{G}_f - \mathcal{G}_i},$$

სადაც

$$g_i = \left(\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \tau} \right)_i = m(t_\infty - \bar{\mathcal{G}}_i) \quad \text{და} \quad g_f = \left(\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \tau} \right)_f = m(t_\infty - \bar{\mathcal{G}}_f).$$

ამ განტოლებებიდან განისაზღვრული ზღვრული ტემპერატურა ტოლი იქნება

$$t_\infty = \bar{\mathcal{G}}_i + \frac{g_i}{m} = \bar{\mathcal{G}}_f + \frac{g_f}{m}.$$

მაშინ ტემპერატურის ცვლილებისთვის მივიღებთ

$$\Delta t = -[g_i + m(\bar{\mathcal{G}}_i - \bar{\mathcal{G}})](\tau_f - \tau_i) = -[g_f + m(\bar{\mathcal{G}}_f - \bar{\mathcal{G}})](\tau_f - \tau_i).$$

თბოცვლაზე ტემპერატურული შესწორების გამოსათვლელად არსებობს სხვადასხვა ავტორების მიერ რეკომენდებული როგორც ზუსტი ასევე მიახლოებითი მეთოდები [2,11,12,13,14,15]. პრაქტიკულად ყველა მეთოდი ეყრდნობა ზემოთ მოყვანილ განტოლებას, რომელშიც მთავარ პერიოდში საშუალო ტემპერატურა $\bar{\mathcal{G}}$ განისაზღვრება ამა თუ იმ განსხვავებული მეთოდით, გრაფიკულად ან ანალიზურად.

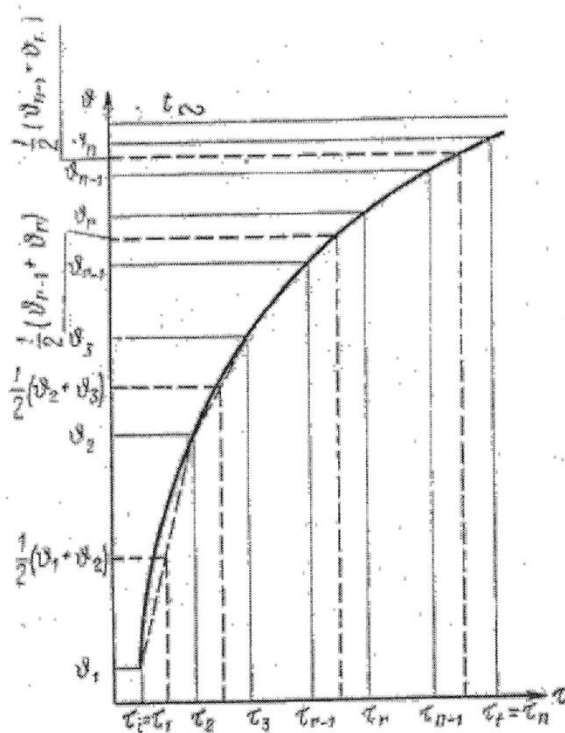
2.4. ტემპერატურული შესწორების რენიუ-ფაუნდლერის ფორმულა

ზუსტ კალორიმეტრულ ცდებში თბოცვლაზე შესწორების გამოსათვლელად ყველაზე ხშირად გამოიყენება ტრაპეციის მეთოდი, რომლის მიხედვითაც (6) განტოლებაში $\int_{\tau_i}^{\tau_f} \vartheta_s d\tau$ შეცვლილია ტრაპეციების ფართობების ჯამით.

სურათ 10-ზე გამოსახულია დამოკიდებულება $\vartheta = \vartheta(\tau)$ მთავარი პერიოდისათვის, სადაც მრუდის ქვეშ მოთავსებული ფართი დაყოფილია $n-1$ ნაწილად. ამ ნახაზის შესაბამისად:

$$\int_{\tau_i}^{\tau_f} \vartheta d\tau \approx \frac{1}{2}(\vartheta_1 + \vartheta_2) + \frac{1}{2}(\vartheta_2 + \vartheta_3) + \dots + \frac{1}{2}(\vartheta_{n-1} + \vartheta_n) = \frac{1}{2}(\vartheta_1 + \vartheta_n) + \sum_{r=2}^{n-1} \vartheta_r$$

სადაც n - არის ანათვლების რიცხვი მთავარ პერიოდში.



სურათი 10. თბოცვლაზე შესწორების გამოთვლა ტრაპეციის მეთოდით

ასეთ შემთხვევაში საშუალო ტემპერატურის გამოსათვლელი ფორმულა მიიღებს სახეს:

$$\bar{\vartheta} = \frac{1}{n-1} \int_{\tau_i}^{\tau_f} \vartheta d\tau = \frac{1}{n-1} \left[\frac{1}{2}(\vartheta_1 + \vartheta_n) + \sum_{r=2}^{n-1} \vartheta_r \right].$$

აქედან გამომდინარე

$$\Delta t = m \left[\frac{1}{2}(\vartheta_1 + \vartheta_n) + \sum_{r=2}^{n-1} \vartheta_r - (n-1)\bar{\vartheta}_i \right] - (n-1)g_i,$$

ან

$$\Delta t = m \left[\frac{1}{2}(\vartheta_1 + \vartheta_n) + \sum_{r=2}^{n-1} \vartheta_r - (n-1)\bar{\vartheta}_f \right] - (n-1)g_f,$$

სადაც გაცივების ტემპს აქვს განზომილება $(\partial\tau)^{-1}$, ტემპერატურის ცვლილების სიჩქარე $g -^{\circ} C/\partial\tau$. დროის ინერვალად ხშირად აღებულია 15; 30 ან 60 წმ [5].

2.5. თბოცვლაზე შესწორებების განსაზღვრის

გამარტივებული მეთოდი

თბოცვლაზე შესწორებების გამოთვლა რენიუ-ფაუნდლერის ფორმულით რთულია, ამიტომ შედარებით ნაკლები სიზუსტით გაზომვებისას სარგებლობენ გამარტივებული მეთოდებით. რენიუ-ფაუნდლერის ფორმულით განსაზღვრული შესწორების ცდომილება განპირობებულია მთავარი პერიოდის საშუალო ტემპერატურის განსაზღვრის ცდომილებით. ტექნიკური გაზომვებისას (მაგალითად სათბობის თბოუნარიანობის გაზომვა) შეიძლება დაუვშვათ, რომ მთავარ პერიოდში ტემპერატურულ მრუდს აქვს სახე $\vartheta = \vartheta_f - (\vartheta_f - \vartheta_i) \exp(-\chi\tau)$, სადაც ϑ_i და ϑ_f მთავარი პერიოდის პირველი და საბოლოო ანათვალია, χ ექსპონენტის მაჩვენებელია. ვინაიდან $\tau = \tau_f$ მომენტს შეესაბამება საბოლოო ანათვალი $\vartheta = \vartheta_f$, ამიტომ გვექნება $\exp(-\chi\tau_f) \approx 0$, და ცდის საშუალო ტემპერატურა განისაზღვრება ფორმულით

$$\bar{\vartheta} = \vartheta_f + \frac{\vartheta_f - \vartheta_i}{\chi(\tau_f - \tau_i)} [\exp(-\chi\tau_f) - \exp(-\chi\tau_i)].$$

თუ მთავარი პერიოდის დასაწყისად მივიღებთ $\tau_i = 0$, მივიღებთ:

$$\bar{\vartheta} = \vartheta_f + \frac{\vartheta_f - \vartheta_i}{\chi\tau_f}$$

$$\vartheta_f - \vartheta_i = \bar{\vartheta}_f - \bar{\vartheta}_i$$

ამიტომ

$$\Delta t = -\frac{m}{\chi}(\vartheta_f - \vartheta_i) - g_f\tau_f = -g_i\tau_m - g_f(\tau_f - \tau_m),$$

τ_m -არის დრო, რომელიც შეესაბამება მთავარი პერიოდის საშუალო ტემპერატურას. იგი ტოლია

$$\tau_m = \chi^{-1}.$$

მთავარი პერიოდის საშუალო ტემპერატურა შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით

$$\bar{\vartheta} - \vartheta_i = 0.63(\vartheta_f - \vartheta_i) [4].$$

ნახაზ 11-ზე ნაჩვენებია ტემპერატურის მრუდი $\vartheta(\tau)$, რომელიც შეესაბამება შემთხვევას, როცა $\vartheta(\tau) < t_\infty$. დავუშვათ, საწყისი პერიოდის ტემპერატურის ცვლილების სიჩქარეა g_i , ხოლო საბოლოო პერიოდის სიჩქარე - g_f , მთავარი პერიოდის პირველ ნაწილში ანათვლების რიცხვია k , ხოლო მეორე ნაწილში r . მაშინ შესწორება ტოლი იქნება

$$\Delta t_1 = -\frac{1}{2}(g_f + g_i)k,$$

იგი გრაფიკულად შეესაბამება MN მონაკვეთს.

$$\Delta t_{21} = -g_f r,$$

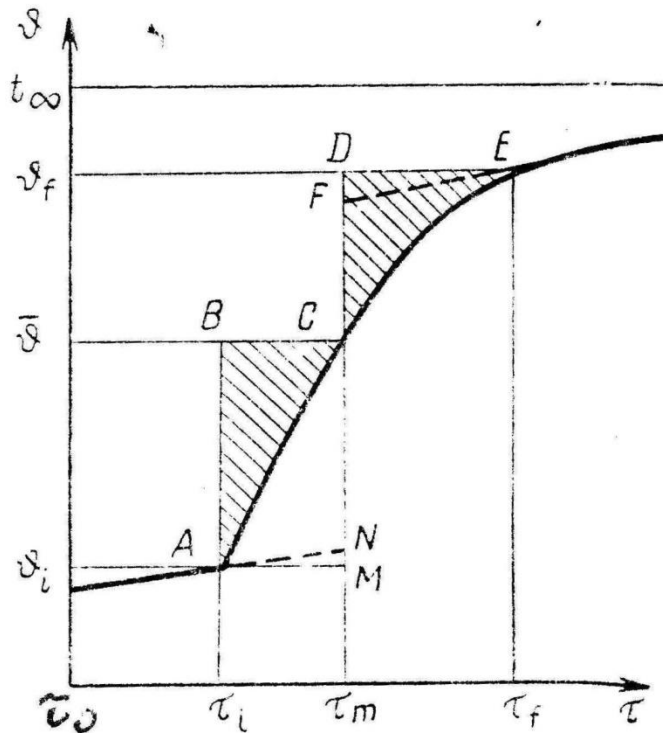
რომელიც გრაფიკულად შეესაბამება DF მონაკვეთს.

მთლიანი შესწორება ტოლია

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = -\left[\frac{1}{2}(g_f + g_i)k + g_f r \right]$$

იგი გრაფიკულად შეესაბამება $DF+MN$ მონაკვეთს. მაშინ ტემპერატურის ნაზრდი მთავარ პერიოდში, რომელიც გამოწვეულია თბოცვლით გამოისახება მონაკვეთით $MD-(MN+DF)=NF$.

კალორიმეტრული ცდა მოიცავს საწყის, მთავარ და საბოლოო პერიოდებს. ნახაზ 11-ზე. ნაჩვენებია თბოცვლაზე ტემპერატურული შესწორების გრაფიკული გამოსახულება.



ნახაზი 11. ტემპერატურული მრუდი და გრაფიკული შესწორება თბოცვლაზე

საწყის პერიოდში (სათბობის დაწყების განხორციელებამდე პერიოდი $t_0 - t_i$) ტემპერატურა იცვლება პრაქტიკულად წრფივად - $A - A$ წრფე, რაც გამოწვეულია გარემოსთან თბოცვლით და ყველა ზემოთ ჩამოთვლილი ფაქტორებით: ელექტრო ნაპერწკლით ანთების მკვებავი წრედის მავთულების და მინის თერმომეტრის ღეროს თბოგამტარობის პროცესით, წინაღობის თერმომეტრში გამავალი საზომი დენით გამოყოფილი სითბოთი, კალორიმეტრული სითხის სარევალას მუშაობით გამოყოფილი სითბოთი და სხვა.

t_i - მომენტი შეესაბამება კალორიმეტრულ ყუმბარაში ნაპერწკლის მიწოდებას და სათბობის წვის პროცესის დასაწყისს, ანუ მთავარი პერიოდის დასაწყისს. მთავარ პერიოდში - $\tau_i - \tau_f$ ტემპერატურის ცვლილება გამოისახება ექსპონენტის ფორმულით (AE) მრუდი. მთავარი პერიოდის განმავლობაში ადგილი აქვს ტემპერატურის გათანაბრებას და τ_f მომენტიდან იწყება საბოლოო პერიოდი (E წერტილიდან), რომელიც ასევე წარმოადგენს წრფეს. მთავარი პერიოდის საშუალო ტემპერატურა გამოითვლება ფორმულით:

$$\bar{g} = g_i + 0.63 \cdot (g_f - g_i) .$$

საწყისი პერიოდის ტემპერატურის ცვლილების ექსტრაპოლაცია AN მთავარი პერიოდის საშუალო ტემპერატურამდე იძლევა ტემპერატურის მონაკვეთს NM, ასევე საბოლოო პერიოდის ტემპერატურის ცვლილების ექსტრაპოლაცია EF მთავარი პერიოდის საშუალო ტემპერატურამდე იძლევა ტემპერატურის მონაკვეთს DF. ტემპერატურის შესწორება კალორიმეტრულ ცდაში იქნება მომაკვეთების ჯამი NM+DF. ხოლო ტემპერატურის სხვაობა, რომელიც შეესაბამება კალორიმეტრში სათბობის დაწვით გამოწვეულ მნიშვნელობას იქნება FN= DM- (NM+DF). შესწორება თბოცვლაზე პირველად მიღებული იქნა დიკინსონის მიერ [16].

ამრიგად კალორიმეტრული ცდის ტემპერატურული მრუდები არის სამი განსხვავებული სახის. ორი მათგანი გარკვეული მიახლოებით წარმოადგენს ტემპერატურის დროის მიხედვით ცვლილების წრფეებს, რაც განპირობებულია კალორიმეტრის თბოცვლით გარემოსთან, ხოლო მესამე მრუდი წარმოადგენს სხვადასხვა ექსპონენტების ჯამს, რაც ძირითადად განპირობებულია გამოსაკვლევი თბური პროცესით [9,10].

თავი 3. კალორიმეტრიაში გამოყენებული სანიმუშო

ნივთიერებები

კალორიმეტრიაში გამოყენებული სანიმუშო ნივთიერებები დანიშნულების მიხედვით შეიძლება დაიყოს სამ ჯგუფად. პირველი ჯგუფის სანიმუშო ნივთიერებები წარმოადგენს საითბოს რაოდენობის საზომს და გამოიყენება კალორიმეტრების დასაგრადუირებლად (თბული ექვივალენტის დასადგენად). მეორე ჯგუფის სანიმუშო ნივთიერებები გამოიყენება ქიმიური რეაქციების მიმდინარეობის და მისი დასრულების კონტროლისთვის. მესამე ჯგუფის სანიმუშო ნივთიერებები გამოიყენება კალორიმეტრული სისტემების კონტროლისთვის და გამოურიცხავი სისტემატური ცდომილებების გავლენის დასადგენად [5].

კალორიმეტრიაში გამოყენებული სანიმუშო ნივთიერებები უნდა აკმაყოფილებდეს მკაცრ მოთხოვნებს. კერძოდ, ისინი იოლად უნდა ექვემდებარებოდნენ მინარევებისაგან გაწმენდას, ხასიათდებოდნენ დაბალი ჰიგროსკოპულობით და აქროლადობით. მყარ სანიმუშო ნივთიერებებს არ უნდა ახასიათებდეს რამდენიმე კრისტალური მდგომარეობა საკვლევი ტემპერატურის დიაპაზონში, უნდა იყოს მაღალი დონის სისუფთავის.

კალორიმეტრის კალიბრებისათვის გამოიყენება პირველი თანრიგის სანიმუშო ნივთიერებები, რომელთა თბოუნარიანობა გაზომილია მრავალი ავტორის მიერ პრეციზიული კალორიმეტრების გამოყენებით. სანიმუშო ნივთიერებებით განისაზღვრება კალორიმეტრის თბური ექვივალენტი და ფართო მასშტაბიანი კვლევების დროს ხდება მათი კალიბრება.

სანიმუშო ნივთიერებები უნდა აკმაყოფილებდეს სპეციალურ მოთხოვნებს, რომელთაგან უმნიშვნელოვანესია ნივთიერების სისუფთავე და ქიმიურად მდგრადობა. რამდენიმე ათეული წლის განავლობაში მრავალი ქვეყნის ავტორი იკვლევდა სხვადასხვა ნივთიერებებს აღნიშნული დანიშნულებისათვის. ამჟამად კალორიმეტრიაში მიღებულია სათბობის თბოუნარიანობის გასაზომად მოწყობილობების კალიბრებისათვის ბენზოინის მჟავა და იანტარის მჟავა.

3.1. ბენზოინის მჟავა

ორგანული ნაერთების (სათბობის) თბოუნარიანობის გასაზომი კალორიმეტრული სისტემის კალიბრებისთვის (კალორიმეტრული სისტემის თბური ექვივალენტის დასადგენად) 1922 წლის ლიონის საერთაშორისო ქიმიურ კონფერენციაზე რეკომენდირებულ იქნა სანიმუშო ნივთიერება - ბენზოინის მჟავა [2]. მუდმივმოქმედი თერმოქიმიურმა კომისიამ, რომელიც არჩეული იქნა ამ კონფერენციაზე თავის ცნობაში 1934 წელს რეკომენდაცია გაუწია ბენზოინის მჟავას ნივთიერებათა თბოუნარიანობის გაზომვისათვის გამოყენებას. ნივთიერებები უნდა შეიცავდეს ერთდროულად ნახშირბადს, წყალბადს და ჟანგბადს, ან ნახშირბადს, წყალბადს, ჟანგბადს და გოგირდს [17,18]. რუსეთში ბენზოინის მჟავა დამტკიცებულია, როგორც სანიმუშო ნივთიერება სათბობის თბოუნარიანობის გასაზომად 1926 წელს [19].

ბენზოინის მჟავას ძირითადი ფიზიკა-ქიმიური თვისებები შემდეგია. ჰორმალური ყუმბარიანი კალორიმეტრის პირობებისათვის ბენზოინის მჟავას თბოუნარიანობა 1934-1968 წლების გაზომვების მიხედვით ტოლია $26434,1 \pm 0,8$ კჯ/კგ. მჟავის სისუფთავე დადგინდა სხვადასხვა მეთოდებით: კრიოეკოპური მეთოდით (გამყარების ტემპერატურის დადაბლების მიხედვით) [20]; მჟავის დაწვის შედეგად გამოყოფილი ნახშირორჟანგის შემცველობით [21]; ტიტრირებით [22]; კულონომეტრული ტიტრირებით [22] და სხვა მეთოდებით. ჩამოთვლილი მეთოდების უმრავლესობა საშუალებას იძლევა ბენზოინის მჟავაში მინარევების განსაზღვრის არსებობის გაზომვა ხდებოდა რამდენიმე მეათესადი პროცენტის ცდომილებით. ნაშრომებში [20,23,24] გამოკვლეულია ბენზოინის მჟავას სტაბილურობის საკითხები. მჟავის დაშლა მიმდინარეობს 150°C -ზე მაღალ ტემპერატურებზე [25]. ბენზოინის მჟავას აქროლადობის პროცესი შესწავლილია $29-30^{\circ}\text{C}$ -ზე. სამი კვირის განმავლობაში აქროლადობის ფარდობითი სიდიდემ შეადგინა 0,01% დღეში. მჟავის დაწვის სისრულე

დამოკიდებულია ნიმუშის ფორმაზე, მასაზე და ტიგელში მის მდებარეობაზე [21,26].

სხვადასხვა ლაბორატორიებში გაზომილი ბენზოინის მჟავას თბოუნარიანობის ერთმანეთთან შესადარებლად საჭიროა გაზომვის შედეგები მივიყვანოთ კალორიმეტრული ცდის ნორმალურ პირობებამდე . ეს პირობები შემდეგია [17]:

1. ცდის შედეგები დაიყვანება 25 °C -ზე;
2. ნიმუში იწვევა მუდმივი მოცულობის კალორიმეტრულ ყუმბარაში სუფთა ჟანგბადის გარემოში 25°C საწყისი ტემპერატურის და 30 ბარი წნევის პირობებში;
3. ნიმუშის მასის (გრამებში) შეფარდება ყუმბარის შიგა მოცულობასთან (დმ³) 3-ის ტოლია.
4. ყუმბარაში წინასწარ ჩასხმული წყლის მასის (გრამებში) შეფარდება ყუმბარის შიგა მოცულობასთან (დმ³) 3-ის ტოლია.

როცა ბენზოინის მჟავის დაწვის პროცესი, ნორმალური პირობებიდან გადახრილია მაშინ თბოუნარიანობის მიღებული მნიშვნელობის (კჯ/კგ) გადასაყვანად ნორმალურ პირობებზე უნდა გამოვიყენოთ მამრავლი კოეფიციენტი:

$$f = 1 + 10^{-6} \cdot [20 \cdot (p - 30) + 42 \cdot \left(\frac{m_b}{V} - 3\right) + 30 \cdot \left(\frac{m_w}{V} - 3\right) - 45 \cdot (t - 25)]$$

სადაც p არის ჟანგბადის საწყისი წნევა t ტემპერატურაზე (რომელ ტემპერატურასაც მიეკუთვნება თბოუნარიანობის მნიშვნელობა), ატმ; m_b ბენზოინის მჟავას მასა გრამებში; m_w - ყუმბარაში ჩასხმული წყლის მასა, გრამებში; V - ყუმბარის შიგა მოცულობა, დმ³. ფორმულა სამართლიანია

თუ შესრულებულია შემდეგი უტოლობები: $20 < p < 40$ ატმ; $2 < \frac{m_b}{V} < 4$ გ/დმ³; $2 < \frac{m_w}{V} < 7$ გ/დმ³; $20 < t < 30$ °C

1922 წლის ლიონის საერთაშორისო ქიმიურ კონფერენციაზე სანიმუშო ნივთიერების - ბენზოინის მჟავას თბოუნარიანობისათვის

რეკომენდირებულ იქნა მნიშვნელობა - 26434 ჯოული გ მასასზე, რომელიც განსაზღვრულია იზოთერმული პირობებში 20⁰C ტემპერატურაზე, და ამასთანავე, ნიმუშის მასა განსაზღვრულია ვაკუუმში [2].

განსაკუთრებით აღსანიშნავია, რომ ბენზოინის მჟავა გამოყენებულია სანიმუშო ნივთიერებად როგორც სათბობის წვის კალორიმეტრიაში, ასევე დაბალტემპერატურულ უბანში სითბოტევადობის გასაზომად.

3.2. იანტარის მჟავა

იანტარის მჟავა წარმოადგენს თბოუნარიანობის გასაზომად მეორე ჯგუფის სანიმუშო ნივთიერებას იმ შემთხვევისთვის, როცა სათბობი შეიცავს ნახშირბადს, წყალნადს, ჟანგბადს და აზოტს. ასეთი სანიმუშო ნივთიერების შექმნის წინადადება წამოყენებული იყო მუდმივი თერმოქიმიური კომისიის მიერ ჯერ კიდევ 1934 წელს. კვლევები ამ მიმართულებით ჩატარებული იქნა მრავალი ავტორის მიერ. ამ კვლევების საფუძველზე მიღებული იქნა გადაწყვეტილება წვის კალორიმეტრიაში იანტარის მჟავას სანიმუშო ნივთიერებად აღიარების შესახებ. შემდეგ წლებში გრძელდებოდა კვლევები. ამჟამად იანტარის მჟავას წვის სითბოს მნიშვნელობა სტანდარტული თერმოდინამიკური პირობებისათვის მიღებულია მნიშვნელობა $12634,6 \pm 2.2$ კჯ/კგ [27,28,29,30,31,32].

კვლევის ამოცანები

ლიტერატურული მიმოხილვის საფუძველზე შესაძლებელია შემდეგი დასკვნების გამოტანა და ამოცანების დასახვა:

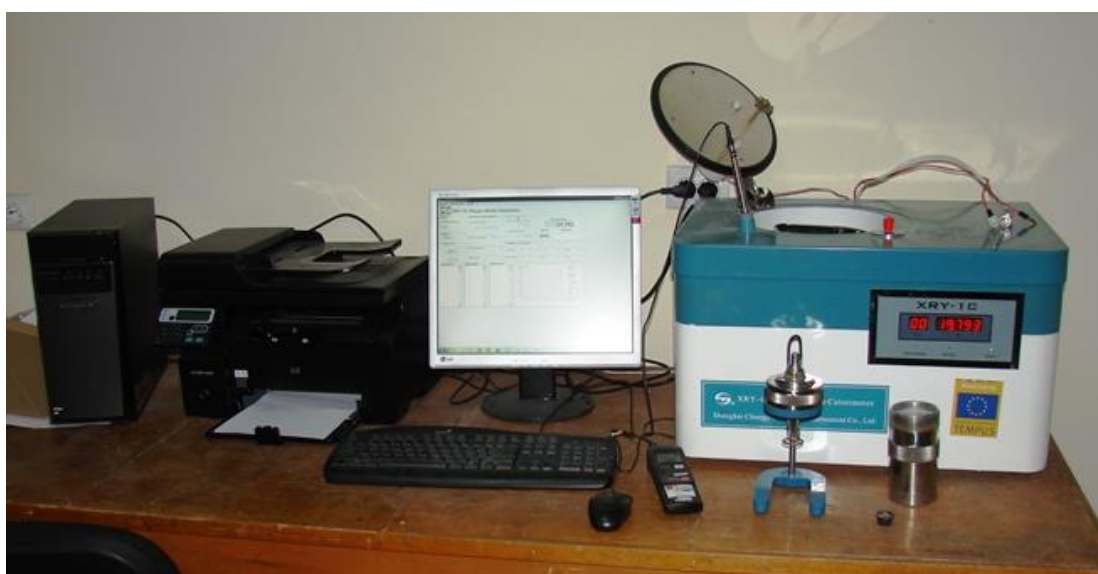
- ტყიბულ-შაორის ქვანახშირის ენერგეტიკულ სათბობად გამოყენების ერთ-ერთ ხელშემწყობ ფაქტორს წარმოადგენს ტყიბულ-შაორის ქვანახშირის საბადოს სხვადასვა ნიშნულის ნიმუშების თბოუნარიანობის ექსპერიმენტული გამოკვლევა, ამდენად დასმული ამოცანა აქტუალურია;
- საკითხის გადაწყვეტა გულისხმობს შესაბამისი პრეციზიული კალორიმეტრული სისტემის (პრეციზიული კალორიმეტრული ყუმბარა შესაბამისი სისტემით, მაღალი წნევის ჟანგაბდის სისტემა, პრეციზიული სასწორი - სიზუსტით 0,001 გ, ეფექტური და პრეციზიული საშრობი და სხვა) გამოყენებას.
- კალორიმეტრული გაზომვების მეთოდის დამუშავება;
- პრეციზიული კალორიმეტრული გაზომვის ვირტუალური ამოცანის შექმნა;
- ტყიბულ-შაორის ქვანახშირის საბადოს სხვადასვა ნიშნულების ნიმუშების თბოუნარიანობის გამოკვლევა;
- სასაწავლო-სამეცნიერო ლაბორატორიული ამოცანის შექმნა.

თავი 4. ექსპერიმენტული ნაწილი

4.1. ექსპერიმენტული დანადგარი

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, სამუშაოს მიზანია ტყიბულ-შაორის ქვანახშირის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი თბოტექნიკური მახასიათებლის – თბოუნარიანობის ექსპერიმენტული გამოკვლევა. გამოკვლევებისთვის გამოყენებულ იქნა კალორიმეტრული მეთოდი. გაზომვები ჩატარდა კალორიმეტრულ ხელსაწყოზე XRY-1C.

კალორიმეტრული ხელსაწყო XRY-1C წარმოადგენს იზოთერმულ კალორიმეტრს, რომელიც გამოიყენება თხევადი და მყარი ნივთიერებების

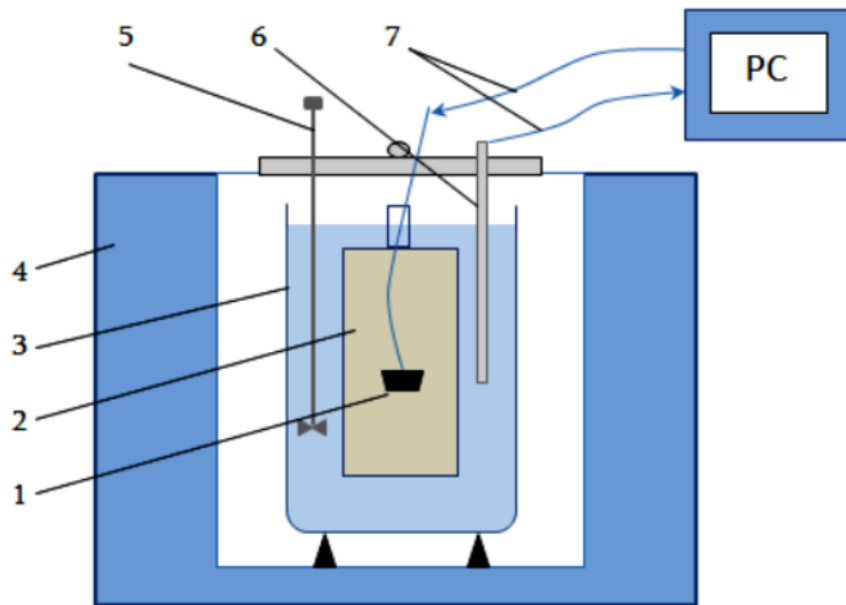


სურათი 12. პრეცეიზიული კალორიმეტრი XRY-1C

თბოუნარიანობის განსასაზღვრად (სურათი 12). მისი სიზუსტე ქარხნული მონაცემებით შეადგენს 0,4%-ს.

კალორიმეტრის სქემა მოცემულია სურათ 13-ზე. იგი შედგება კალორიმეტრული ჭურჭლისგან (3), რომელიც მოთავსებულია კალორიმეტრულ გარსაცმში (4). კალორიმეტრული გარსაცმი წარმოადგენს წყლიან ჭურჭელს და უზრუნველყოფს კალორიმეტრული ჭურჭლის გარემოსგან თბოიზოლირებას. გამოსაკვლევი ნიმუში მოთავსებულია სპეციალურ ტიგელში (1), რომელიც თავის მხრივ მოთავსებულია მაღალი

წნევის კონტეინერში (2). წვისთვის ხელსაყრელი პირობების შექმნის მიზნით



სურათი 13. კალორიმეტრ XRY-1C-ის სქემა. 1-ტიგელი ნიმუშით, 2. კონტეინერი მაღალი წნევის ჟანგბადით, 3-კალორიმეტრული ჭურჭელი, 4-კალორიმეტრული გარსაცმი, 5-სითხის შემრევი, 6-თერმომეტრი, 7-სადენები.

კონტეინერი შევსებულია 25 ატმოსფერული წნევის მქონე ჟანგბადით. ეს კონტეინერი მოთავსებულია გამოხდილი წყლით შევსებულ კალორიმეტრულ ჭურჭელში (3). იმისთვის, რომ ცდის დროს ტემპერატურა წყლის მთელ მოცულობაში იყოს ერთნაირი, ხდება წყლის შერევა სპეციალური შემრევით კონტეინერი მოთავსებულია გამოხდილი წყლით შევსებულ კალორიმეტრულ ჭურჭელში (3). იმისთვის რომ ცდის დროს ტემპერატურა წყლის მთელ მოცულობაში იყოს ერთნაირი, ხდება წყლის შერევა სპეციალური შემრევით (5). კომპიუტერული მართვის პროგრამა თერმომეტრიდან (6) მიღებული მონაცემების საფუძველზე სადენების (7) საშუალებით რთავს ელექტრულ წრედს, რაც ნიმუშთან წარმოქმნის ნაპერწკალს. ნაპერწკალი იწვევს საკვლევი ნიმუშის დაწვას. საკვლევი ნიმუშის დაწვის შედეგად გამოყოფილი სითბო გადაეცემა კალორიმეტრულ ჭურჭელში მოთავსებულ გამოხდილ წყალს. გამოხდილი

წყლის მიერ მიღებული სითბოს რაოდენობის განსაზღვრით დგინდება საკვლევი ნიმუშის თბოუნარიანობა.



სურათი 14. მაღალი წნევის კონტეინერი

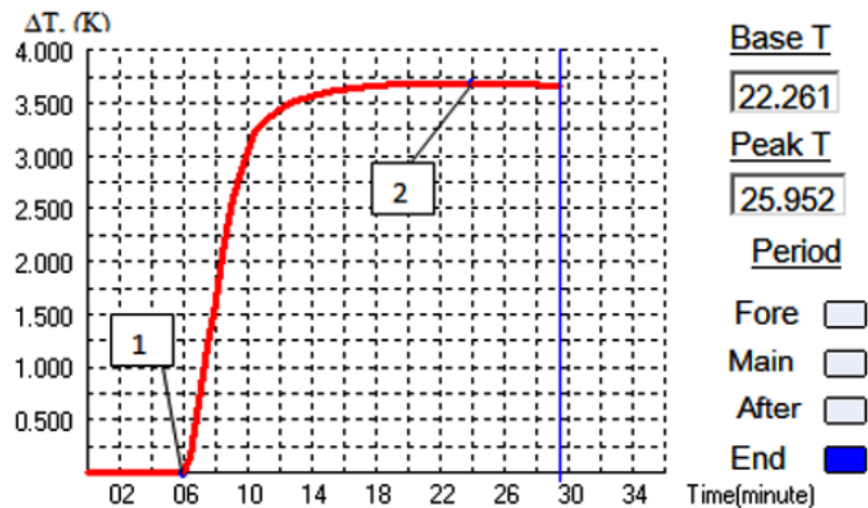


სურათი 15. მაღალი წნევის კონტეინერის ანგადათ შევსების სისტემა

სურათ 14-ზე ნაჩვენებია მაღალი წნევის კონტეინერი, რომელიც გაზომვების დროს ივსება 25 ატმოსფერული წნევის ჟანგბადით, და,

რომელშიც ხდება ნიმუშის წვა, ხოლო სურათ 15-ზე ნაჩვენებია მაღალი წნევის კონტეინერის ჟანგბადით შევსების სისტემა.

გაზომვის მეთოდიკა შემდეგში მდგომარეობს: კალორიმეტრში სტაციონარული ტემპერატურული რეჟიმის დამყარების შემდეგ, რომლის დროსაც ტემპერატურის ცვლილება ერთ წუთში არ აღემატება 0,001 გრადუსს, მართვის პროგრამა ხელსაწყოს გადაიყვანს გაზომვის რეჟიმში. მოხდება ნიმუშის დაწვა. წვისას გამოყოფილი სითბოს გავლენით კალორიმეტრულ ჭურჭელში მოთავსებული გამოხდილი წყლის ტემპერატურა იწყებს ზრდას. ტემპერატურის მაქსიმალური მნიშვნელობის მიღწევის შემდეგ ფიქსირდება გამოხდილი წყლის მაქსიმალურ, ანუ საბოლოო და ბაზურ, ანუ საწყის მნიშვნელობებს შორის სხვაობა [33,34].



სურათი 16. კალორიმეტრული სისტემის ტემპერატურის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი. 1 - ექსპერიმენტის საწყისი მომენტის შესაბამისი წერტილი, 2 - ექსპერიმენტის საბოლოო მომენტის შესაბამისი წერტილი

სურათ 16-ზე მოცემულია კალორიმეტრული სისტემის მიმდინარე და საწყის ტემპერატურებს შორის ΔT სხვაობის დროის მიხედვით ცვლილების ტიპური გრაფიკი. წერტილი 1 შეესაბამება ტემპერატურის სხვაობას ექსპერიმენტის საწყის, ხოლო წერტილი 2 - ექსპერიმენტის საბოლოო მომენტში.

კალორიმეტრული სისტემის მიერ მიღებული სითბოს რაოდენობა, და შესაბამისად, საკვლევი ნიმუშის თბოუნარიანობა – Q გამოითვლება ფორმულით

$$Q=H\cdot\Delta T \quad (1)$$

სადაც H არის კალორიმეტრული სისტემის ჯამური სითბოტევადობა, ΔT - სისტემის საბოლოო და საწყის ტემპერატურათა შორის სხვაობა.

თბოუნარიანობის გამოსათვლელი (1) ფორმულა გულისხმობს, რომ ნიმუშის წვის შედეგად გამოყოფილი სითბო მთლიანად ხმარდება კალორიმეტრული სისტემის თბოშემცველობის გაზრდას. რეალურად კალორიმეტრი აბსოლუტურად თბოიზოლირებული არ არის. მაგალითად, გამოხდილი წყლის შემრევის ზედა ნაწილი, ისევე, როგორც თერმომეტრის ზედა ნაწილი, კალორიმეტრის გარეთაა, ქვედა ნაწილი, კი კალორიმეტრულ ჭურჭელში. ეს იწვევს კალორიმეტრული სისტემის ტემპერატურული ველის დამახინჯებას, და აქედან გამომდინარე, მისი ჯამური სითბოტევადობის განუზღვრელობას.

4.2. კალორიმეტრის კალიბრება

კონკრეტული კალორიმეტრული სისტემისთვის ჯამური სითბოტევადობის, ანუ თბური ექვივალენტის განსაზღვრა შესაძლებელია კალორიმეტრის კალიბრებით [36]. არსებობს კალიბრების ორი მეთოდი – აბსოლუტური და ფარდობითი. აბსოლუტური მეთოდის შემთხვევაში სითბო გამოიყოფა კალორიმეტრში მოთავსებულ წინააღმდეგობაზე და მისი რაოდენობა განისაზღვრება წინააღმდეგობაში გამავალი დენისა და მასზე მოდებული ძაბვის საშუალებით. ფარდობითი მეთოდის შემთხვევაში თბოუნარიანობის განსაზღვრის ექსპერიმენტი ტარდება ცნობილი თბოუნარიანობის მქონე სანიმუშო ნივთიერებაზე. ორივე შემთხვევაში H პარამეტრის მნიშვნელობა განისაზღვრება (1) ფორმულის საშუალებით. ფარდობითი მეთოდის გამოყენება ექსპერიმენტის ჩატარების თვალსაზრისით უფრო მოსახერხებელია. ამასთანავე, იგი უზრუნველყოფს

გაზომვების მაღალ სიზუსტეს. ჩვენს კვლევებში არჩევანი სწორედ კალიბრების ფარდობით მეთოდზე შევაჩერეთ.

კალორიმეტრიაში გამოყენებული სანიმუშო ნივთიერება იოლად უნდა ექვემდებარებოდეს მინარევებისაგან გაწმენდას, ხასიათდებოდეს ნაკლები ჰიგროსკოპიულობით და დაბალი აქროლადობით. მყარ სანიმუშო ნივთიერებებს არ უნდა ახასიათებდეს რამოდენიმე კრისტალური მდგომარეობა საკვლევი ტემპერატურის დიაპაზონში.

1922 წელს ლიონში საერთაშორისო ქიმიურ კონფერენციაზე ორგანული ნაერთების (სათბობის) თბოუნარიანობის გასაზომად (კალორიმეტრული სისტემის თბური ეკვივალენტის დასადგენად) რეკომენდირებული იქნა სანიმუშო ნივთიერება - ბენზონის მჟავა. იგი წარმოადგენს პირველი გვარის სანიმუშო ნივთიერებას [5].

ძირითად სანიმუშო ნივთიერებას წაეყენება მაღალი მოთხოვნები მისი სისუფთავის მიმართ. მაგალითად, უმაღლესი თანრიგის სანიმუშო ნივთიერება - ბენზონის მჟავა უნდა შეიცავდეს 99,992% ძირითად ნივთიერებას. ასეთი სისუფთავის ნივთიერების მიღება დიდ სიმძნელებთან, და შესაბამისად დიდ ხარჯებთანაა დაკავშირებული. შედარებით დაბალი სიზუსტის კვლევების ჩასატარებლად, რომელსაც კალორიმეტრული კვლევებიც მიეკუთვნება, შესაძლებელია უფრო დაბალი სისუფთავის ბენზონის მჟავას გამოყენება. მაგრამ ეს შესაძლებელია მხოლოდ მას შემდეგ, რაც მოხდება ამ ნივთიერების თბოუნარიანობის გამოკვლევა და სანიმუშო ნივთიერებად ატესტაცია.

ჩვენს მიერ ჩატარებულ იქნა სამუშაო შედარებით დაბალი სიზუსტის სანიმუშო ნივთიერების (სტუ-1) შესაქმნელად. ამ მიზნით გამოყენებულ იქნა რუმინული წარმომავლობის ("STANCHEM") ბენზონის მჟავა (C_6H_5COOH) რომელიც ხარისხის სერთიფიკატის მიხედვით შეიცავს 99,24% ძირითად ნივთიერებას, 0,03% ტენს, 10 მლგ/კგ-ზე ნაკლებ მძიმე ლითონებს, 0,2%-ზე ნაკლებ ფტალურ ანჰიდრიდს, 0,03% სულფოზოლს. მისი დნობის ტემპერატურაა 121,7°C. სანიმუშო ნივთიერების ატესტაციისას

კალორიმეტრის თბური ექვივალენტი განსაზღვრულ იქნა მაღალი სისუფთავის (99,992%) ბენზოინის მჟავას გამოყენებით, რომლის თბოუნარიანობა სერტიფიკატის მიხედვით ტოლია 26466 ჯ/გ-ს [5].

ცხრილი 3

ბენზოინის მჟავას ატესტაციის შედეგები პირველი ჯგუფისთვის

i	თბოუნარიანობა	თბოუნარიანობის საშუალო მნიშვნელობა	თბოუნარიანობის მნიშვნელობის გადახრა	თბოუნარიანობის მნიშვნელობის გადახრის კვადრატი	პირველი ჯგუფის გაზომვის დისპერსია,	პირველი ჯგუფის გაზომვის სტანდარტული გადახრა,	საშუალო არითმეტიკული სიდიდის დისპერსია	საშუალო არითმეტიკული სიდიდის სტანდარტული გადახრა
	q_i	\bar{q}	$\delta_i = q_i - \bar{q}$	δ_i^2	S^2	S		
	ჯ/გ	ჯ/გ	ჯ/გ	ჯ ² /გ ²	ჯ ² /გ ²	ჯ/გ	ჯ/გ	ჯ/გ
1	26550,65	26358,54	192,11	36904,64	167563,00	±409,60	23932,60	±154,72
2	26446,57		88,03	7749,28				
3	26348,03		-10,51	110,46				
4	26205,09		-153,45	23546,90				
5	26230,07		-128,47	16504,54				
6	26076,03		-282,51	79811,90				
7	26653,36		294,82	86918,83				

სტუ-1-ის ატესტაციისათვის პრეციზიულ კალორიმეტრზე ჩატარდა 12 ნიმუშის (10 მმ სიმაღლის და 10 მმ დიამეტრის ცილინდრული ტაბლეტები) თბოუნარიანობის გამოკვლევა მაღალი წნევის ჟანგბადის გარემოში. ექსპერიმენტის შედეგები (12 ცდა) დაყოფილია ორ ჯგუფად გაზომვების დროითი ნიშნის მიხედვით. ცხრილ 3-ში და ცხრილ 4-ში მოცემულია შესაბამისად პირველი და მეორე ჯგუფების მონაცემები და ცდის შედეგების დამუშავების ინფორმაცია [37].

დაკვირვებათა მწკრივში უხეში შეცდომების არსებობის შესამოწმებლად განისაზღვრა სტიუდენტის კოეფიციენტი - $t_{\max} = \frac{|q_i - \bar{q}|}{S}$.

პირველი გუფისთვის მოცემული სიდიდის მნიშვნელობამ შეადგინა $t_{\max}=0,7202$, ხოლო მეორე ჯგუფისთვის - $t_{\max}=1,2584$. $\alpha=0,95$ სარწმუნო

ალბათობისა და $k_1=7-1=6$ თავისუფლების ხარისხის პირობებში (პირველი ჯგუფისთვის) სტიუდენტის კოეფიციენტის მნიშვნელობა ტოლია $t_{(0,95;6)}=2,45$, ხოლო იგივე სარწმუნო ალბათობისა და $k_2=5-1=4$ თავისუფლების ხარისხის პირობებში (მეორე ჯგუფისთვის) სტიუდენტის კოეფიციენტის მნიშვნელობა ტოლია $t_{(0,95;5)}=2,78$. გაზომვების ორივე ჯგუფისთვის შესრულებულია პირობა - $t_{\max} < t$, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ როგორც პირველი, ისე მეორე ჯგუფის მონაცემები არ შეიცავს უხეშ შეცდომას [5].

ცხრილი 4

ბენზოინის ჟავას ატესტაციის შედეგები მეორე ჯგუფისთვის

i	თბოუნარიანობა	თბოუნარიანობის საშუალო მნიშვნელობა	თბოუნარიანობის მნიშვნელობის გადახრა	თბოუნარიანობის მნიშვნელობის გადახრის კვადრეტი	მეორე ჯგუფის გაზომვის დისპერსია,	მეორე ჯგუფის გაზომვის სტანდარტული გადახრა,	საშუალო არითმეტიკული სიდიდის დისპერსია	საშუალო არითმეტიკული სიდიდის სტანდარტული გადახრა
	q_i	\bar{q}	$\delta_i = q_i - \bar{q}$	δ_i^2	S^2	S		
	ჯ/გ	ჯ/გ	ჯ/გ	ჯ ² /გ ²	ჯ ² /გ ²	ჯ/გ	ჯ/გ	ჯ/გ
1	26373,01	26546,49	-173,48	30095,31	33512,64	±183,07	6702,53	±81,87
2	26756,04		209,55	43911,20				
3	26463,22		-83,27	6933,89				
4	26776,85		230,36	53065,73				
5	26363,32		-183,17	33551,25				

საშუალო არითმეტიკული სიდიდის გაზომვის ზღვრული ცდომილება პირველი ჯგუფისთვის ტოლია $\Delta_1=2,45 \cdot 154,72=379,06$ ჯ/გ. ანუ, თბოუნარიანობის ცვლილების ინტერვალია $25979,48 \div 26737,60$ ჯ/გ. პირველი ჯგუფისთვის საბოლოო შედეგი ზღვრული ცდომილების მიხედვით ტოლი იქნება $\bar{q}_1=26358,50 \pm 1,44\%$.

მეორე ჯგუფისთვის საშუალო არითმეტიკული სიდიდის გაზომვის ზღვრული ცდომილება ტოლია $\Delta_2=2,78 \cdot 81,87=227,60$ ჯ/გ, თბოუნარიანობის ცვლილების ინტერვალია $26318,90 \div 26774,10$ ჯ/გ. მეორე ჯგუფისთვის

საბოლოო შედეგი ზღვრული ცდომილების მიხედვით ტოლი იქნება $\bar{q}_2 = 26546,50 \pm 0,86\%$.

პირველი და მეორე ჯგუფის მონაცემების მიხედვით თბოუნარიანობის საშუალო შეწონილი მნიშვნელობა ტოლი იქნება [5]

$$q_{\text{ა}} = \frac{n_1}{n} \cdot \bar{q}_1 + \frac{n_2}{n} \cdot \bar{q}_2 = \frac{7}{12} \cdot 26358,54 + \frac{5}{12} \cdot 26546,48 = 26436,85 \text{ ჯ/გ.}$$

მოცემულ ფორმულაში n_1 და n_2 პირველ და მეორე ჯგუფებში გაზომვების რაოდენობაა შესაბამისად, ხოლო n , გაზომვების საერთო რაოდენობა.

პირველი და მეორე ჯგუფის დისპერსიების დასაშვებ ზღვრებში არსებობა შემოწმდა ფიშერის კრიტერიუმის გამოყენებით. პირველი და მეორე ჯგუფების დისპერსიების ფარდობა ტოლია $\frac{S_1^2}{S_2^2} = 5$. პირველი ჯგუფის

მოცემული თავისუფლების ხარისხის ($k_1=6$), მეორე ჯგუფის მოცემული თავისუფლების ხარისხის ($k_2=4$) და $\alpha=0,95$ სარწმუნო ალბათობის პირობებში ფიშერის კრიტერიუმის ზედა ზღვარი ტოლია $F_{\alpha}=9,2$. ფიშერის კრიტერიუმის ქვედა ზღვარისთვის მივიღებთ: $F_{\beta}=1/9,2=0,109$. პირველი და მეორე განსხვავებული დისპერსიები დასაშვებად ჩაითვლება, თუ სრულდება პირობა:

$$P\left(F_{\beta} < \frac{S_1^2}{S_2^2} < F_{\alpha}\right) = \alpha.$$

კონკრეტულ შემთხვევაში $0,109 < 5 < 9,2$. ანუ, პირველი და მეორე ჯგუფების მონაცემების გაბნევა დასაშვებ ზღვრებშია [5].

პირველი და მეორე ჯგუფების საშუალო არითმეტიკული მნიშვნელობების მონაცემების გაბნევა ტოლია [5]:

$$t = |\bar{q}_1 - \bar{q}_2| \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 - 2)}{(n_1 - n_2) \cdot (n_1 \cdot S_1^2 + n_2 \cdot S_2^2)}} = 0,877.$$

$\alpha = 0,95$ სარწმუნო ალბათობისა და $k = n_1 + n_2 - 10$ თავისუფლების ხარისხისთვის სტიუდენტის კოეფიციენტის მნიშვნელობა ტოლია 2,23.

ვინაიდან $0,877 < 2,23$, ამიტომ ამ ჯგუფების საშუალო არითმეტიკული მნიშვნელობების გაზნევა დასაშვებ ზღვრებშია. ამრიგად, ორივე ჯგუფის მონაცემები თანაბრად გაზნეულია და ამიტომ საშუალო არითმეტიკული სიდიდის სტანდარტული გადახრისთვის მივიღებთ:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N(m-1)} \cdot \sum_{i=1}^2 n_j (\bar{q}_j - q_{\text{წ}})^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{12(2-1)} \cdot [7 \cdot (26358,54 - 26436,85)^2 + 5 \cdot (26546,48 - 26436,85)^2]} = 92,66 \text{ ჯ/გ.}$$

აქედან გამომდინარე, სანიმუშო ნივთიერების თბოუნარიანობის საშუალო არითმეტიკული სიდიდის ზღვრული ცდომილება და თბოუნარიანობის ცვლილების ინტერვალი შესაბამისად იქნება $\Delta q = 2,23 \cdot (\pm 92,66) = \pm 206,62$ ჯ/გ და $26230,20 \div 26643,50$ ჯ/გ.

მაშასადამე, ძირითადი ნივთიერების მიხედვით 99,24% სისუფთავის ბენზოინის მჟავას ბაზაზე შექმნილი სანიმუშო ნივთიერება „სტუ-1“-ის თბოუნარიანობის მნიშვნელობაა $(26436,8 \pm 206,6)$ ჯ/გ. ანუ სანიმუშო ნივთიერების თბოუნარიანობის განსაზღვრის ცდომილება შეადგენს 0,78% - ს.

მოცემული სანიმუშო ნივთიერების საატესტაციო გაზომვების სიზუსტისა და ამ ნივთიერებით XRY-1C კალორიმეტრის კალიბრების სიზუსტის გათვალისწინებით საკვლევი ნივთიერების თბოუნარიანობის გაზომვის ექსპერიმენტული ცდომილების მნიშვნელობა 1,2%-ის ტოლია.

4.3. სათბობის ტენიანობის განსაზღვრა

ტენიანობა სათბობის მნიშვნელოვანი ტექნიკური მახასიათებელია. იგი განსაზღვრავს სათბობის ხარისხს და ახდენს მისი სხვადასხვა დანიშნულებით გამოყენების შესაძლებლობის რეგლამენტირებას. ტენიანობა იცვლება სათბობის მოპოვების, გადამუშავების და შენახვის დროს და მნიშვნელოვან წილადაა დამოკიდებული ნიმუშის შერჩევის და

ანალიზისთვის მომზადების მეთოდზე. სხვადასხვა სათბობის მუშა ტენიანობა მერყეობს რამდენიმე პროცენტთან 60-ზე მეტ პროცენტამდე.

მაღალი ტენიანობა იწვევს სათბობის დაწვის სითბოს შემცირებას და მისი ხარჯის გაზრდას, წვის აირადი ნაწილის მოცულობის გადიდებას და, აქედან გამომდინარე, წარმავალი აირებით სითბოს დანაკარგის გაზრდას, აძლიერებს ხურების ზედაპირების კოროზიას, აუარესებს ფხვიერებას, ზამთრის პერიოდში წარმოადგენს ქვანახშირების შეყინვის მიზეზს. მაღალტენიანი სათბობის დაწვისას წყლის აორთქლებაზე და წარმოქმნილი ორთქლის გახურებაზე დახარჯული სითბოს გამო მნიშვნელოვნად მცირდება წვის ტემპერატურა. ქვანახშირის ტენიანობა მკაცრად რეგლამენტირებულია მისი კოქსირებისას [38,39].

სათბობის ტენი იყოფა ორ ნაწილად - გარეგანი და შინაგანი.

სათბობის მოპოვების, გადაზიდვის და შენახვის დროს მასში მოხვედრილი გრუნტის წყლებისა და ატმოსფერული ნალექების გარკვეული რაოდენობა მექანიკურად შეკავდება სათბობის ნამსხვრევების გარე ზედაპირზე. სწორედ ეს არის გარეგანი ტენიანობა. მექანიკურად შეკავებული გარეგანი ტენის რაოდენობა დამოკიდებულია სათბობის ფრაქციულ შემადგენლობაზე - მისი რაოდენობა იზრდება სათბობის ნამსხვრევების ზომების შემცირებით. გარეგანს განეკუთვნება აგრეთვე კაპილარული ტენი, ანუ ტენი, რომელიც ავსებს სათბობის კაპილარებსა და ფორებს, რომელთა რაოდენობა განსაკუთრებით დიდია ტორფსა და მურა ნახშირში.

შინაგანს მიეკუთვნება კოლოიდური და ჰიდრატული ტენი.

კოლოიდური ტენი წარმოადგენს სათბობის შემადგენელ ნაწილს. მისი რაოდენობა დამოკიდებულია სათბობის ქიმიურ ბუნებაზე, მის შენადგენლობაზე და ატმოსფერული ჰაერის ტენშემცველობაზე. კოლოიდური ტენის დიდ რაოდენობას შეიცავს ტორფი, მნიშვნელოვნად ნაკლებია იგი მურა ნახშირებში და ძალზე ცოტა ქვანახშირებსა და ანთრაციტში.

ჰიდრატული, ანუ საკრისტალიზაციო ტენი ქიმიურად არის დაკავშირებული სათბობის მინერალურ მინარევებთან, ძირითადად კალციუმკარბონატთან ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) და ალუმინსილიკატთან ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). მისი რაოდენობა სათბობში უმნიშვნელოა და შესაძენევად იზრდება მხოლოდ უხვნაცრიან სათბობებში.

სათბობის შეშრობის დროს მთლიანად ორთქლდება გარეგანი (მექანიკურად შეკავებული და კაპილარული), ხოლო ნაწილობრივ კოლოიდური ტენი. ჰიდრატული ტენის რაოდენობა, რომლის მოშორება შესაძლებელია მხოლოდ მაღალი ტემპერატურის პირობებში (დაახლოებით 800°C) პრაქტიკულად უცვლელი რჩება.

ტენიანობას, რომელიც გააჩნია $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ ტემპერატურისა და $(65 \pm 5)\%$ ფარდობითი ტენიანობის პირობებში ჰაერზე შემშრალ სათბობს, ჰიგროსკოპული ტენიანობა ეწოდება, ხოლო ჰიგროსკოპულ ტენიანობამდე მიყვანილ სათბობს ეწოდება ჰაერზე შემშრალი სათბობი [40].

ლაბორატორიულ პირობებში ჰაერის ტემპერატურისა და ფარდობითი ტენიანობის ცვლილება დიდი არ არის და მათი მნიშვნელობა უახლოვდება ზემოთ მოყვანის სიდიდეებს. ამიტომ ლაბორატორიული გამოკვლევის დროს განსაზღვრული ე.წ. ლაბორატორიული ($W_{\text{ლ}}$) ტენი დაახლოებით შეესაბამება სათბობის ჰიგროსკოპულ ტენს ($W_{\text{ჰ}}$).

არსებობს მყარი სათბობის ტენიანობის განსაზღვრის ორი მეთოდი - პირდაპირი და არაპირდაპირი. პირდაპირი მეთოდის შემთხვევაში იზომება სათბობიდან გამოყოფილი წყლის მოცულობა. არაპირდაპირი მეთოდი მდგომარეობს სათბობის სინჯის გამოშრობაში მუდმივი ტემპერატურის პირობებში. ამ შემთხვევაში ტენიანობა განისაზღვრება სინჯის აწონვით. ამ შემთხვევაში ტენიანობა განისაზღვრება სათბობის სინჯის წონის შემცირების საფუძველზე.

არაპირდაპირი მეთოდის შემთხვევაში 1-2 გ მასის წმინდად დაფქვილ სათბობს ათავსებენ წინასწარ აწონილ მინის ხუფიან ჭურჭელში, რომლის მოცულობა არ უნდა აღემატებოდეს $100-120 \text{ სმ}^3$ -ს. მჭიდროს დახურულ

ნიმუშიან ჭურჭელს წონიან. შემდეგ ჭურჭელზე ხუფს ოდნავ ადებენ და დგამენ საშრობ კარადაში, რომელიც წინასწარ გახურებულია (105-110)°C ტემპერატურამდე. შრობა მიმდინარეობს მუდმივი ტემპერატურის პირობებში ერთი საათის განმავლობაში ქვნიშირისთვის და ორი საათის განმავლობაში ანთრაციტისა და მურა ნახშირისთვის.

სათბობის გამოშრობის შემდეგ მინის ჭურჭელს მთლიანად ახურავენ ხუფს და ექსიკატორში აცივებენ ოთახის ტემპერატურამდე. გაცივებულ მინის ჭურჭელს საანალიზო ნიმუშთან ერთად წონიან. ამის შემდეგ ახდენენ ნიმუშის საკონტროლო გამოშრობას, ანუ ისევ დგამენ ნიმუშიან ჭურჭელს ნახევარი საათით საშრობ კარადაში და შემდგომ წონიან. ამას იმეორებენ იმდენჯერ, სანამ მომდევნო ორ აწონვას შორის სხვაობა 0,001 გ-ზე ნაკლები არ იქნება.

აორთქლებული ტენის რაოდენობას საზღვრავენ ფორმულით

$$W_{\text{ლ}} = W_3 = \frac{b}{a} \cdot 100\% ,$$

სადაც b არის აორთქლებული ტენის წონა, ანუ საანალიზო სათბობის სინჯის წონის დანაკარგი, ხოლო a - საანალიზო სათბობის სინჯის საწყისი წონა.

4.4. სათბობის ნაცრიანობის განსაზღვრა

ნაცარი ეწოდება წვის პროცესში სათბობის მინერალური მინარევების სრული გარდაქმნის შედეგად მიღებულ მყარ არასაწვავ ნარჩენს.

სათბობის საერთო ნაცრიანობა განისაზღვრება მისი შინაგანი და გარეგანი ნაცრიანობით. შინაგანი ნაცარი შედგება ორი ნაწილისგან: პირველადი და მეორადი ნაცარი. პირველადი ნაცარი მიიღება სათბობწარმომქმნელ ნივთიერებათა შედგენილობაში შემავალი მინერალური მინარევებისაგან, მეორადი ნაცარი კი სათბობის წარმოშობის პროცესში მიწისქვეშა წყლებით შემოტანილი მინერალური მინარევებისგან. გარეგანი ნაცარი წარმოადგენს საშობის მოპოვების დროს მასში მოხვედრილ მინერალურ ქანებს.

მინერალური მინარევეები საწვავი კომპონენტების წილის შემცირებასა და მინერალური მასის გახურებასა და დნობაზე სითბოს ხარჯვის გაზრდასთან დაკავშირებით ადაბლებს სათბობის დაწვის სითბოს.

გარდა ამისა, მასში შემავალი სხვადასხვა ნაერთები: სილიკატები, სულფატები, სულფიდები, კარბონატები, ფოსფატები, ქლორიდები, ლითონთა ქვეყანგი, ტუტე ლითონების მარილები და სხვა, სათბობის წვის პროცესში განიცდიან მთელ რიგ გარდაქმნებს და ძალზე ართულებენ ორთქლგენერატორების ექსპლოატაციის პირობებს. ასე მაგალითად, ნაცარში კალციუმის ნაერთების დიდი რაოდენობით არსებობა განაპირობებს ორთქლგენერატორის ხურების ზედაპირზე ძნელად მოსაცილებელი მკვრივი დანალექების წარმოქმნას, ასევე უწყობენ ხელს მათ წარმოშობას ადვილდნობადი ტუტეები და ქლორიდები, ხოლო ვანადიუმის ნაერთები, რომლებსაც დნობის დაბალი ტემპერატურა აქვთ, ილექებიან ორთქლგადამეტმხურებლის ხურების ზედაპირებზე და მის ინტენსიურ კოროზიას იწვევენ. ნაცრის მნიშვნელოვან მახასიათებელს წარმოადგენს აგრეთვე მისი აბრაზიულობა: რაც მაღალია ნაცრის აბრაზიულობის ხარისხი, მით ძლიერია ხურების ზედაპირის ცვეთა.

მაშასადამე, ორთქლგენერატორების და თბოელექტროსადგურების მოწყობილობების ექსპლოატაციის და დაპროექტების დროს ნაცრის რაოდენობის განსაზღვრა აუცილებელ პირობას წარმოადგენს.

მყარი სათბობის ნაცრიანობის განსაზღვრა შესაძლებელია ორი მეთოდით - ნელი და სწრაფი. ამა თუ იმ მეთოდის გამოყენება დამოკიდებულია ადგილობრივ პირობებზე [41].

ნელი განაცრიანების დროს წინასწარ აწონილ ფაიფურის ტიგელში ათავსებენ სათბობის საანალიზო სინჯის წონაკს (1-2 გ) და წონიან ტიგელს წონაკთან ერთად. ტიგელს წონაკით ათავსებენ მუფელის ღუმელში, რომლის ტემპერატურა არ უნდა აღემატებოდეს 300°C-ს. 1-1,5 საათის განმავლობაში ღუმელს თანდათანობით ახურებენ (800±25)°C-მდე. განაცრიანების დამთავრების შემდეგ ხურავენ ღუმელს და იმავე

ტემპერატურის პირობებში ახდენენ მიღებული ნაცრის გავარვარებას 1-2 საათის განმავლობაში. შემდეგ ნაცრიან ტიგელს ამოიღებენ ღუმელიდან, აცივებენ ჯერ ჰაერზე 5 წუთის განმავლობაში, ხოლო შემდეგ - ექსიკატორში ოთახის ტემპერატურამდე და წონიან. აწონვის შემდეგ ნაცრიან ტიგელს საკონტროლო გავარვარებისთვის კვლავ ათავსებენ 800°C-მდე გახურებულ ღუმელში. 30 წუთის შემდეგ ტიგელს კვლავ აცივებენ და წონიან. ამ პროცესს იმეორებენ ვიდრე სინჯიანი ტიგელის წონის შემცირება არ გახდება 0,001 გ-ზე ნაკლები.

სწრაფი განაცრიანების დროს მუფელის ღუმელს თავიდანვე ახურებენ (800±25)°C-მდე. წონაკიან ტიგელს თავდაპირველად დგამენ ღია კარიან ღუმელის კიდეზე და ახურებენ 10 წუთის განმავლობაში. შემდეგ ტიგელს ღრმად შეწევენ ღუმელში, ხურავენ ღუმელის კარს და ახურებენ იმავე ტემპერატურის პირობებში. 40 წუთის შემდეგ ნაცრიან ტიგელს იღებენ ღუმელიდან, აცივებენ 5 წუთის განმავლობაში ჰაერზე, შემდეგ - ექსიკატორში, ვიდრე მისი ტემპერატურა არ გაუტოლდება ჰაერის ტემპერატურას. და წონიან ტიგელს.

საბოლოოდ აწარმოებენ რამდენიმე 15 წუთიან საკონტროლო გახურებას, ვიდრე ტიგელის წონის შემცირება არ გახდება 0,001 გ-ზე ნაკლები.

ნაცრის რაოდენობა სინჯში განისაზღვრება ფორმულით

$$A = \frac{b}{a} \cdot 100\% ,$$

სადაც b არის ნაცრის წონა, ხოლო a - წონაკის წონა.

4.5. ნიმუშის მომზადება

თბოუნარიანობის გამოსაკვლევ ექსპერიმენტები ჩატარდა ტყიბულ-შაორის საბადოს მინდელის სახელობის შახტის პირველი, მეორე და მეოთხე უბნების სხვადასხვა ფენის რიგითი ქვანახშირისა და ღია წესთ მოპოვებული ქვანახშირის ნიმუშებზე. საკვლევ ნიმუში წარმოადგენს ფხვიერ ქვანახშირს (კლასი 1-100 მმ).



სურათი 17. სათბობის გამოსაშრობი დანადგარი RADWAG – MA 50.R და ექსიკატორი ნიმუშებით

წინასწარ მოხდა საკვლევი ნიმუშების გამოშრობა. ეს პროცესი განხორციელდა RADWAG – MA 50.R მარკის სპეციალურ დანადგარზე 105°C - 110°C ტემპერატურის პირობებში ნიმუშის მასის შემცირებს შეწყვეტამდე. ხელსაწყოს სიზუსტე მასის განსაზღვრის მიმართ შადგენს 10⁻³ გ-ს. გამომშრალი ნიმუშები ინახებოდა ექსიკატორში (სურათი 17).

განსაზღვრულ იქნა ქვანახშირის ნიმუშების ნაცრიანობა.

ცხრილი 5

კალორიმეტრული ხელსაწყოს კალიბრების მონაცემი.

Calibration

Time	10/19/2015 12:59:11 AM	Formula	Bunte
Mass(g)	0.4700	Calorific(J/g)	26462

Capacity(J/K)	13734
---------------	-------

Operator :

კალორიმეტრული ხელსაწყოს კალიბრება ჩატარდა უმაღლესი თანრიგის სანიმუშო ნივთიერებით, რომლის შედეგად დადგინდა, რომ კალორიმეტრული ხელსაწყოს თბური ექვივალენტი ტოლია - $H=13734$ ჯ/კელ (ცხრილი 5).

ყოველი კონკრეტული ფენის რიგითი ქვანახშირისთვის ექსპერიმენტი ჩატარდა ხუთ ნიმუშზე. ყოველი ნიმუშისთვის ხორციელდებოდა ნიმუშის მომზადება, მისი გამოშრობა, აწონვა, კონტეინერში მოთავსება, სანაპერწკლე მავთულის მონტაჟი და კალორიმეტრული სისტემის თერმოსტატირება. პრაქტიკულად ეს ნიშნავს, რომ გვაქვს გაზომვების ხუთი დამოუკიდებელი კომპლექსი, რაც განაპირობებს გაზომვების სისტემატური ხასიათის ცდომილების მინიმუმამდე შემცირებას.

4.6. პირველი უბნის მე-4 ფენის ქვანახშირის უმაღლესი თბოუნარიანობის ექსპერიმენტული მონაცემები.

ცხრილი 6

ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 1, ფენი 4) - ცდა 1

Determination

SampleName: **cd-6-qvanaxshir** Operator:

SampleMass(g)	1.7600	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutoID	Fore period	Main period	After period
1	17.117	17.172	19.441
2	17.118	17.478	19.439
3	17.118	17.900	19.438
4	17.118	18.263	19.437
5	17.118	18.593	19.435
6	17.119	18.873	19.433
7		19.046	19.432
8		19.122	19.430
9		19.232	19.428
10		19.276	19.426
11		19.316	
12		19.356	
13		19.370	
14		19.394	
15		19.409	
16		19.420	
17		19.428	
18		19.432	
19		19.435	
20		19.438	
21		19.440	
22		19.442	
23		19.443	
24		19.442	
25		19.443	
26		19.442	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
18400	18337	18337
Time:	10/20/2015 12:39:20 AM	

ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 1, ფენი 4) - ცდა 2

DeterminationSampleName: **ada-7-qvanaxshir** Operator:

SampleMass(g)	1.9700	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutolD	Fore period	Main period	After period
1	17.406	17.526	20.042
2	17.407	17.805	20.041
3	17.407	18.157	20.039
4	17.407	18.507	20.038
5	17.406	18.828	20.037
6	17.407	19.110	20.035
7		19.304	20.033
8		19.493	20.031
9		19.630	20.029
10		19.750	20.027
11		19.819	
12		19.880	
13		19.923	
14		19.952	
15		19.980	
16		19.993	
17		20.009	
18		20.018	
19		20.029	
20		20.035	
21		20.038	
22		20.039	
23		20.041	
24		20.042	
25		20.043	
26		20.042	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
18617	18554	18554
Time:	10/21/2015 3:00:24 AM	

ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 1, ფენი 4) - ცდა 3

DeterminationSampleName: **ცდა-8-ყვანახშირ** Operator:

SampleMass(g)	2.1700	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutoID	Fore period	Main period	After period
1	17.657	17.732	20.557
2	17.657	18.058	20.556
3	17.657	18.440	20.554
4	17.656	18.777	20.552
5	17.656	19.110	20.549
6	17.656	19.416	20.547
7		19.697	20.545
8		19.888	20.542
9		20.019	20.540
10		20.172	20.537
11		20.289	
12		20.368	
13		20.415	
14		20.456	
15		20.482	
16		20.506	
17		20.520	
18		20.533	
19		20.540	
20		20.547	
21		20.552	
22		20.554	
23		20.558	
24		20.559	
25		20.559	
26		20.559	
27		20.558	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
18686	18623	18623
Time:	10/22/2015 1:23:37 AM	

ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 1, ფენი 4) - ცდა 4

DeterminationSampleName: **cda-9-qvanaxshir** Operator:

SampleMass(g)	1.5000	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutoID	Fore period	Main period	After period
1	17.022	17.100	19.039
2	17.023	17.364	19.038
3	17.023	17.733	19.037
4	17.024	18.067	19.036
5	17.025	18.335	19.035
6	17.025	18.549	19.034
7		18.688	19.033
8		18.778	19.032
9		18.839	19.031
10		18.883	19.029
11		18.927	
12		18.950	
13		18.973	
14		18.990	
15		19.002	
16		19.011	
17		19.019	
18		19.027	
19		19.032	
20		19.034	
21		19.036	
22		19.038	
23		19.039	
24		19.040	
25		19.040	
26		19.040	
27		19.040	
28		19.040	
29		19.039	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
18684	18621	18621

ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 1, ფენი 4) - ცდა 5

Determination

SampleName: აღ-10-qvanash		Operator:	
SampleMass(g)	1.4900	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutoID	Fore period	Main period	After period
1	17.382	17.432	19.346
2	17.383	17.595	19.345
3	17.383	17.776	19.344
4	17.383	17.936	19.343
5	17.383	18.133	19.343
6	17.384	18.308	19.342
7		18.410	19.341
8		18.545	19.339
9		18.699	19.338
10		18.780	19.337
11		18.876	
12		18.969	
13		19.042	
14		19.091	
15		19.145	
16		19.184	
17		19.219	
18		19.252	
19		19.266	
20		19.287	
21		19.300	
22		19.313	
23		19.321	
24		19.328	
25		19.333	
26		19.338	
27		19.341	
28		19.343	
29		19.344	
30		19.345	
31		19.346	
32		19.346	
33		19.347	
34		19.346	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
18348	18285	18285
Time:		10/26/2015 12:18:00 AM

4.7. მე-2 უბნის მე-4 ფენის ქვანახშირის უმაღლესი თბოუნარიანობის
ექსპერიმენტული მონაცემები.

ცხრილი 11

ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 2, ფენი 4) - ცდა 1

Determination

SampleName: cda-11-qvanash		Operator:	
SampleMass(g)	1.5000	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutoID	Fore period	Main period	After period
1	16.569	16.715	18.860
2	16.570	17.254	18.859
3	16.571	17.666	18.858
4	16.572	18.068	18.858
5	16.573	18.302	18.856
6	16.574	18.453	18.855
7		18.563	18.853
8		18.615	18.853
9		18.686	18.851
10		18.728	18.850
11		18.759	
12		18.788	
13		18.803	
14		18.817	
15		18.831	
16		18.838	
17		18.845	
18		18.850	
19		18.854	
20		18.857	
21		18.858	
22		18.860	
23		18.861	
24		18.861	
25		18.861	
26		18.862	
27		18.861	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
21163	21100	21100
Time:		10/27/2015 1:25:14 AM

ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 2, ფენი 4) - ცდა 2

DeterminationSampleName: **oda-12-qvanaxsh** Operator:

SampleMass(g)	1.5400	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutoID	Fore period	Main period	After period
1	17.161	17.265	19.364
2	17.161	17.563	19.363
3	17.161	18.016	19.362
4	17.161	18.347	19.361
5	17.161	18.640	19.359
6	17.161	18.813	19.358
7		18.971	19.356
8		19.085	19.355
9		19.153	19.353
10		19.200	19.351
11		19.240	
12		19.275	
13		19.294	
14		19.316	
15		19.329	
16		19.338	
17		19.347	
18		19.352	
19		19.358	
20		19.360	
21		19.362	
22		19.364	
23		19.365	
24		19.365	
25		19.364	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
19917	19854	19854
Time:	10/27/2015 11:40:55 PM	

ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 2, ფენი 4) - ცდა 3

DeterminationSampleName: **cda-13-qvanash**

Operator:

SampleMass(g)	1.4700	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutolD	Fore period	Main period	After period
1	16.880	16.958	19.072
2	16.880	17.430	19.071
3	16.880	17.903	19.069
4	16.880	18.281	19.068
5	16.880	18.509	19.066
6	16.880	18.655	19.065
7		18.767	19.063
8		18.844	19.061
9		18.911	19.060
10		18.952	19.057
11		18.986	
12		19.009	
13		19.026	
14		19.043	
15		19.050	
16		19.057	
17		19.062	
18		19.067	
19		19.070	
20		19.072	
21		19.074	
22		19.074	
23		19.074	
24		19.074	
25		19.073	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
20816	20753	20753
Time:	10/28/2015 11:10:12 PM	

ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 2, ფენი 4) - ცდა 4

DeterminationSampleName: **oda-14-qvanaxsh** Operator:

SampleMass(g)	1.5500	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutoID	Fore period	Main period	After period
1	16.285	16.366	18.739
2	16.286	16.798	18.738
3	16.286	17.409	18.737
4	16.286	17.810	18.735
5	16.287	18.101	18.733
6	16.287	18.278	18.732
7		18.398	18.730
8		18.495	18.728
9		18.554	18.726
10		18.600	18.724
11		18.639	
12		18.666	
13		18.686	
14		18.701	
15		18.714	
16		18.722	
17		18.729	
18		18.733	
19		18.736	
20		18.739	
21		18.740	
22		18.741	
23		18.741	
24		18.741	
25		18.740	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
22038	21975	21975
Time:	10/29/2015 11:34:11 PM	

ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 2, ფენი 4) - ცდა 5

DeterminationSampleName: **oda-21-qvanash** Operator:

SampleMass(g)	1.5200	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutoID	Fore period	Main period	After period
1	13.462	13.573	15.810
2	13.462	14.035	15.810
3	13.462	14.616	15.808
4	13.463	14.976	15.807
5	13.463	15.204	15.805
6	13.463	15.365	15.804
7		15.475	15.802
8		15.557	15.801
9		15.617	15.799
10		15.665	15.797
11		15.698	
12		15.726	
13		15.748	
14		15.765	
15		15.776	
16		15.787	
17		15.794	
18		15.800	
19		15.805	
20		15.807	
21		15.810	
22		15.811	
23		15.812	
24		15.812	
25		15.812	
26		15.812	
27		15.811	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
21568	21505	21505
Time:	11/10/2015 10:54:35 PM	

4.8. მე-2 უბნის მე-6 ფენის ქვანახშირის უმაღლესი თბოუნარიანობის
ექსპერიმენტული მონაცემები.

ცხრილი 16

ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 2, ფენი 6) - ცდა 1

Determination

SampleName: **ცდა-15-ყვანახში**

Operator:

SampleMass(g)	1.5200	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutoID	Fore period	Main period	After period
1	15.841	15.886	18.408
2	15.841	16.478	18.408
3	15.842	17.050	18.406
4	15.841	17.474	18.405
5	15.842	17.745	18.404
6	15.842	17.934	18.402
7		18.061	18.400
8		18.152	18.398
9		18.218	18.397
10		18.270	18.395
11		18.303	
12		18.331	
13		18.354	
14		18.369	
15		18.381	
16		18.389	
17		18.396	
18		18.401	
19		18.404	
20		18.406	
21		18.408	
22		18.409	
23		18.408	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
23430	23367	23367
Time: 10/30/2015 10:25:37 PM		

ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 2, ფენი 6) - ცდა 2

DeterminationSampleName: **cda-16-qvanaxsh** Operator:

SampleMass(g)	1.5300	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutoID	Fore period	Main period	After period
1	13.752	13.894	16.180
2	13.752	14.425	16.179
3	13.752	15.063	16.178
4	13.753	15.426	16.176
5	13.753	15.622	16.175
6	13.753	15.742	16.173
7		15.878	16.172
8		15.941	16.170
9		15.994	16.168
10		16.041	16.167
11		16.075	
12		16.101	
13		16.117	
14		16.134	
15		16.147	
16		16.157	
17		16.163	
18		16.168	
19		16.172	
20		16.176	
21		16.179	
22		16.181	
23		16.181	
24		16.181	
25		16.182	
26		16.182	
27		16.181	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
22096	22034	22034
Time: 11/4/2015 12:14:43 AM		

ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 2, ფენი 6) - ცდა 3

DeterminationSampleName: **cda-17-qvanash** Operator:

SampleMass(g)	1.5500	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutoID	Fore period	Main period	After period
1	13.683	13.856	16.197
2	13.683	14.377	16.196
3	13.684	15.037	16.195
4	13.684	15.400	16.194
5	13.685	15.616	16.192
6	13.685	15.786	16.190
7		15.876	16.189
8		15.958	16.187
9		16.025	16.186
10		16.069	16.184
11		16.098	
12		16.122	
13		16.142	
14		16.153	
15		16.169	
16		16.177	
17		16.183	
18		16.187	
19		16.191	
20		16.194	
21		16.197	
22		16.198	
23		16.198	
24		16.198	
25		16.197	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
22527	22464	22464
Time:	11/4/2015 11:01:19 PM	

ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 2, ფენი 6) - ცდა 4

DeterminationSampleName: **cd1-23-qvanash** Operator:

SampleMass(g)	1.5000	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutID	Fore period	Main period	After period
1	12.935	13.016	15.382
2	12.935	13.545	15.381
3	12.935	14.144	15.379
4	12.936	14.501	15.378
5	12.936	14.757	15.376
6	12.936	14.935	15.374
7		15.048	15.373
8		15.133	15.371
9		15.199	15.369
10		15.246	15.367
11		15.282	
12		15.309	
13		15.328	
14		15.343	
15		15.356	
16		15.364	
17		15.371	
18		15.376	
19		15.379	
20		15.381	
21		15.383	
22		15.384	
23		15.384	
24		15.384	
25		15.384	
26		15.383	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
22737	22674	22674
Time:	11/12/2015 10:46:41 PM	

ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 2, ფენი 6) - ცდა 5

DeterminationSampleName: **oda-26-qvanaxsh** Operator:

SampleMass(g)	1.5900	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutoID	Fore period	Main period	After period
1	12.286	12.354	14.908
2	12.287	12.739	14.907
3	12.288	13.430	14.907
4	12.288	13.869	14.906
5	12.289	14.158	14.905
6	12.290	14.368	14.904
7		14.513	14.902
8		14.605	14.900
9		14.678	14.899
10		14.740	14.897
11		14.778	
12		14.812	
13		14.835	
14		14.853	
15		14.868	
16		14.880	
17		14.888	
18		14.895	
19		14.899	
20		14.903	
21		14.905	
22		14.907	
23		14.908	
24		14.909	
25		14.908	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
22821	22759	22759
Time:	11/16/2015 10:47:55 PM	

4.9. მე-4 უბნის მე-4 ფენის ქვანახშირის უმაღლესი თბოუნარიანობის
ექსპერიმენტული მონაცემები.

ცხრილი 21

ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 4, ფენი 4) - ცდა 1

Determination

SampleName: **oda-19-qvanaxsh**

Operator:

SampleMass(g)	1.5700	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutoID	Fore period	Main period	After period
1	13.593	13.674	15.918
2	13.594	14.034	15.917
3	13.594	14.541	15.915
4	13.594	14.966	15.914
5	13.594	15.268	15.913
6	13.595	15.420	15.911
7		15.555	15.910
8		15.659	15.908
9		15.707	15.907
10		15.759	15.905
11		15.801	
12		15.830	
13		15.853	
14		15.871	
15		15.882	
16		15.893	
17		15.900	
18		15.906	
19		15.911	
20		15.913	
21		15.916	
22		15.917	
23		15.918	
24		15.918	
25		15.919	
26		15.918	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
20592	20529	20529
Time: 11/8/2015 11:34:20 PM		

ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 4, ფენი 4) - ცდა 2

DeterminationSampleName: **cda-20-qvanaxsh** Operator:

SampleMass(g)	1.4900	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutID	Fore period	Main period	After period
1	13.570	13.682	15.714
2	13.571	14.178	15.714
3	13.571	14.578	15.713
4	13.571	14.899	15.712
5	13.571	15.173	15.711
6	13.572	15.318	15.710
7		15.420	15.709
8		15.490	15.708
9		15.551	15.706
10		15.594	15.704
11		15.621	
12		15.646	
13		15.659	
14		15.675	
15		15.687	
16		15.694	
17		15.700	
18		15.706	
19		15.710	
20		15.711	
21		15.712	
22		15.714	
23		15.715	
24		15.714	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
19941	19878	19878
Time:	11/9/2015 11:45:31 PM	

ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 4, ფენი 4) - ცდა 3

DeterminationSampleName: **cd1-22-qvanash** Operator:

SampleMass(g)	1.4900	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutoID	Fore period	Main period	After period
1	13.349	13.378	15.474
2	13.349	13.678	15.473
3	13.349	14.175	15.472
4	13.349	14.528	15.471
5	13.349	14.832	15.469
6	13.349	14.991	15.468
7		15.114	15.467
8		15.208	15.465
9		15.271	15.463
10		15.331	15.461
11		15.365	
12		15.393	
13		15.412	
14		15.428	
15		15.442	
16		15.453	
17		15.459	
18		15.464	
19		15.469	
20		15.471	
21		15.474	
22		15.475	
23		15.476	
24		15.476	
25		15.476	
26		15.475	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
19889	19826	19826
Time: 11/11/2015 10:49:42 PM		

ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 4, ფენი 4) - ცდა 4

DeterminationSampleName: **oda-24-qvanaxsh** Operator:

SampleMass(g)	1.5200	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutolD	Fore period	Main period	After period
1	12.808	12.860	15.067
2	12.809	13.137	15.065
3	12.809	13.589	15.064
4	12.810	13.986	15.063
5	12.809	14.292	15.062
6	12.809	14.521	15.060
7		14.654	15.059
8		14.766	15.057
9		14.836	15.055
10		14.891	15.053
11		14.929	
12		14.963	
13		14.989	
14		15.007	
15		15.024	
16		15.036	
17		15.045	
18		15.052	
19		15.057	
20		15.061	
21		15.064	
22		15.066	
23		15.067	
24		15.068	
25		15.068	
26		15.068	
27		15.067	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
20722	20659	20659
Time:	11/13/2015 10:26:58 PM	

ექსპერიმენტული მონაცემები (უბანი 4, ფენი 4) - ცდა 5

DeterminationSampleName: **oda-28-qvanash** Operator:

SampleMass(g)	1.5900	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutolD	Fore period	Main period	After period
1	12.313	12.349	14.770
2	12.314	12.646	14.769
3	12.315	13.195	14.768
4	12.315	13.649	14.767
5	12.316	13.977	14.765
6	12.317	14.197	14.764
7		14.333	14.762
8		14.443	14.761
9		14.519	14.759
10		14.583	14.758
11		14.627	
12		14.661	
13		14.688	
14		14.708	
15		14.724	
16		14.737	
17		14.747	
18		14.754	
19		14.760	
20		14.764	
21		14.767	
22		14.770	
23		14.771	
24		14.772	
25		14.772	
26		14.772	
27		14.772	
28		14.771	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
21460	21397	21397
Time:	11/18/2015 10:52:13 PM	

**4.10. მე-4 უბნის მე-4 ფენის ქვანახშირის უმაღლესი
თბოუნარიანობის ექსპერიმენტული მონაცემები.**

ცხრილი 26

ექსპერიმენტული მონაცემები (ღია წესით მოპოვებული) - ცდა 1

Determination

SampleName: **ცდა-25-ყვანახ** Operator:

SampleMass(g)	1.6100	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutolD	Fore period	Main period	After period
1	12.163	12.222	14.310
2	12.163	12.613	14.309
3	12.163	13.090	14.308
4	12.163	13.442	14.307
5	12.163	13.701	14.306
6	12.163	13.847	14.305
7		13.960	14.303
8		14.042	14.301
9		14.109	14.300
10		14.153	14.298
11		14.193	
12		14.217	
13		14.241	
14		14.259	
15		14.273	
16		14.283	
17		14.292	
18		14.297	
19		14.302	
20		14.306	
21		14.309	
22		14.311	
23		14.311	
24		14.312	
25		14.312	
26		14.312	
27		14.311	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
18585	18522	18522
Time:	11/15/2015 11:26:00 PM	

ექსპერიმენტული მონაცემები (ღია წესით მოპოვებული) - ცდა 2

DeterminationSampleName: **oda-27-qvanaxsh** Operator:

SampleMass(g)	1.5000	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutoID	Fore period	Main period	After period
1	12.355	12.389	14.481
2	12.355	12.842	14.479
3	12.355	13.353	14.479
4	12.355	13.641	14.477
5	12.355	13.891	14.476
6	12.355	14.057	14.474
7		14.166	14.472
8		14.244	14.471
9		14.305	14.469
10		14.352	14.468
11		14.384	
12		14.407	
13		14.426	
14		14.444	
15		14.455	
16		14.463	
17		14.469	
18		14.474	
19		14.477	
20		14.479	
21		14.481	
22		14.481	
23		14.482	
24		14.482	
25		14.481	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
19743	19681	19681
Time:	11/17/2015 10:59:24 PM	

ექსპერიმენტული მონაცემები (ღია წესით მოპოვებული) - ცდა 3

DeterminationSampleName: **oda-29-qvanash** Operator:

SampleMass(g)	1.5100	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutolD	Fore period	Main period	After period
1	13.398	13.472	15.653
2	13.400	14.019	15.652
3	13.401	14.559	15.652
4	13.402	14.865	15.651
5	13.404	15.064	15.650
6	13.405	15.221	15.649
7		15.322	15.649
8		15.405	15.648
9		15.459	15.647
10		15.500	15.646
11		15.533	
12		15.560	
13		15.579	
14		15.596	
15		15.610	
16		15.620	
17		15.628	
18		15.635	
19		15.640	
20		15.644	
21		15.646	
22		15.649	
23		15.651	
24		15.652	
25		15.653	
26		15.654	
27		15.654	
28		15.654	
29		15.653	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
20652	20589	20589

ექსპერიმენტული მონაცემები (ღია წესით მოპოვებული) - ცდა 4

Determination

SampleName: oda-30-qvanaxsh		Operator:	
SampleMass(g)	1.5100	Formula	Bunte
Capacity(J/K)	13734		
Mad(%)	0	Mt(%)	0
Sb,ad(%)	0	Had(%)	0

AutoID	Fore period	Main period	After period
1	14.995	15.036	16.898
2	14.996	15.285	16.898
3	14.998	15.605	16.898
4	14.999	15.931	16.898
5	15.000	16.165	16.897
6	15.002	16.353	16.897
7		16.480	16.896
8		16.581	16.896
9		16.647	16.895
10		16.700	16.895
11		16.739	
12		16.775	
13		16.798	
14		16.818	
15		16.835	
16		16.849	
17		16.858	
18		16.867	
19		16.874	
20		16.879	
21		16.884	
22		16.887	
23		16.890	
24		16.893	
25		16.894	
26		16.896	
27		16.897	
28		16.898	
29		16.898	
30		16.899	
31		16.898	

Qb,ad(J/g)	Qgr,ad(J/g)	Qnet,ar(J/g)
17297	17234	17234
Time: 11/20/2015 10:26:20 PM		

4.11. ექსპერიმენტის შედეგები

ცხრილ 30-ში მოცემულია უმაღლესი თბოუნარიანობის გაზომვის შედეგები უბნების მიხედვით [42].

ცხრილი 30

ტყიბულ-შაორის საბადოს მინდელის სახელობის შახტის და ღია წესით მოპოვებული ქვანახშირის უმაღლესი თბოუნარიანობა უბნების მიხედვით

#	უბანი 1 ფენი 4	უბანი 2 ფენი 4	უბანი 2 ფენი 6	უბანი 4 ფენი 4	ღია წესით მოპოვებული
1	18400	21163	23430	20592	18585
2	18617	19917	22096	19941	19743
3	18686	20816	22527	19889	20652
4	18684	22038	22737	20722	17297
5	18348	21568	22821	21460	-
Q _{უმ.საშ.}	18547	21104	22722	20521	19060

ცალკეული გაზომვების დისპერსია განსაზღვრული იქნა ფორმულით

$$S_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_{უმ,i} - q_{უმ.საშ})^2,$$

და მისი მნიშვნელობები ნიმუშების მიხედვით მოცემულია ცხრილ 31-ში [5,43].

ცხრილი 31

ცალკეული გაზომვების დისპერსიის მნიშვნელობა ნიმუშების მიხედვით

უბანი 1 ფენი 4	უბანი 2 ფენი 4	უბანი 2 ფენი 6	უბანი 4 ფენი 4	ღია წესით მოპოვებული
26050	645745	235298	415747	484959862

ცალკეული გადახრების სტანდარტული გადახრა განსაზღვრულია ფორმულით

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_{უმ,i} - q_{უმ.საშ})^2},$$

და მისი მნიშვნელობები ნიმუშების მიხედვით მოცემულია ცხრილ 32-ში [5,42].

ცალკეული გადახრების სტანდარტული გადახრის მნიშვნელობა ნიმუშების მიხედვით

უბანი 1 ფენი 4	უბანი 2 ფენი 4	უბანი 2 ფენი 6	უბანი 4 ფენი 4	ღია წესით მოპოვებული
161,40	803,58	485,10	644,78	22067,20

თბოუნარიანობის საშუალო მნიშვნელობის დისპერსია განსაზღვრულია ფორმულით

$$S_{\text{დ.მ.საშ}}^2 = \frac{S_i^2}{n},$$

და მისი მნიშვნელობები ნიმუშების მიხედვით მოცემულის ცხრილ 33-ში [5,43].

თბოუნარიანობის საშუალო მნიშვნელობის დისპერსია ნიმუშების მიხედვით

უბანი 1 ფენი 4	უბანი 2 ფენი 4	უბანი 2 ფენი 6	უბანი 4 ფენი 4	ღია წესით მოპოვებული
32,28	160,72	97,01	129,00	5516,80

თბოუნარიანობის საშუალო მნიშვნელობის სტანდარტული გადახრა განისაზღვრება ფორმულით

$$S_{\text{დ.მ.საშ}} = \frac{S_i}{\sqrt{n}},$$

და მისი მნიშვნელობები ნიმუშების მიხედვით მოცემულის ცხრილ 34-ში [5,43].

თბოუნარიანობის საშუალო მნიშვნელობის დისპერსია ნიმუშების მიხედვით

უბანი 1 ფენი 4	უბანი 2 ფენი 4	უბანი 2 ფენი 6	უბანი 4 ფენი 4	ღია წესით მოპოვებული
5,68	12,68	9,85	11,36	74,28

კრიტერიუმი t_{max} გამოითვლება ფორმულით

$$t_{\text{max}} = \left| \frac{Q_{\text{უმ.}} - Q_{\text{დ.მ.საშ}}}{S_i} \right|,$$

და მისი მნიშვნელობები ნიმუშების მიხედვით მოცემულის ცხრილ 35-ში [5,43].

ცხრილი 35

კრიტერიუმ t_{\max} -ის მნიშვნელობა ნიმუშების მიხედვით

უბანი 1 ფენი 4	უბანი 2 ფენი 4	უბანი 2 ფენი 6	უბანი 4 ფენი 4	ღია წესით მოპოვებული
1,233	1,473	1,459	1,457	0,080

სტიუდენტის კოეფიციენტის (t) მნიშვნელობა $\alpha=0,95$ სარწმუნო ინტერვალისთვის და $k=n-1$ თავისუფლების ხარისხისთვის ნიმუშების მიხედვით მოცემულია ცხრილ 36-ში.

ცხრილი 36

სტიუდენტის კოეფიციენტის (t) მნიშვნელობა $\alpha=0,95$ სარწმუნო ინტერვალისთვის და $k=n-1$ თავისუფლების ხარისხისთვის ნიმუშების მიხედვით

უბანი 1 ფენი 4	უბანი 2 ფენი 4	უბანი 2 ფენი 6	უბანი 4 ფენი 4	ღია წესით მოპოვებული
2,78	2,78	2,78	2,78	3,18

როგორც მოცემული ცხრილიდან ჩანს ყოველი ნიმუშისთვის სრულდება პირობა:

$$t_{\max} < t,$$

რაც იმაზე მიუთითებს, რომ გაზომვების დროს უხეში შეცდომები არ არის დაშვებული.

თბოუნარიანობის საშუალო არითმეტიკული სიდიდის ზღვრული ცდომილება განისაზღვრება ფორმულით

$$\Delta_{\text{ტუმ.საშ}} = t_{(0,95;k)} \cdot S_{\text{ტუმ.საშ}},$$

და მისი მნიშვნელობები ნიმუშების მიხედვით მოცემულია ცხრილ 37-ში.

ცხრილი 37

თბოუნარიანობის საშუალო არითმეტიკული სიდიდის ზღვრული ცდომილება (კჯ/კგ) ნიმუშების მიხედვით

უბანი 1 ფენი 4	უბანი 2 ფენი 4	უბანი 2 ფენი 6	უბანი 4 ფენი 4	ღია წესით მოპოვებული
15,79	1,47	27,38	31,57	236,20

საშუალო არითმეტიკული სიდიდის ზღვრული ცდომილება გამოითვლება ფორმულით

$$\frac{\Delta_{\text{ემ.საშ}}}{Q_{\text{ემ.საშ}}} \cdot 100\% ,$$

და მისი მნიშვნელობები ნიმუშების მიხედვით მოცემულია ცხრილ 38-ში

ცხრილი 38

საშუალო არითმეტიკული სიდიდის ზღვრული ცდომილება (%) ნიმუშების მიხედვით

უბანი 1 ფენი 4	უბანი 2 ფენი 4	უბანი 2 ფენი 6	უბანი 4 ფენი 4	ღია წესით მოპოვებული
0,09	0,17	0,12	0,15	1,24

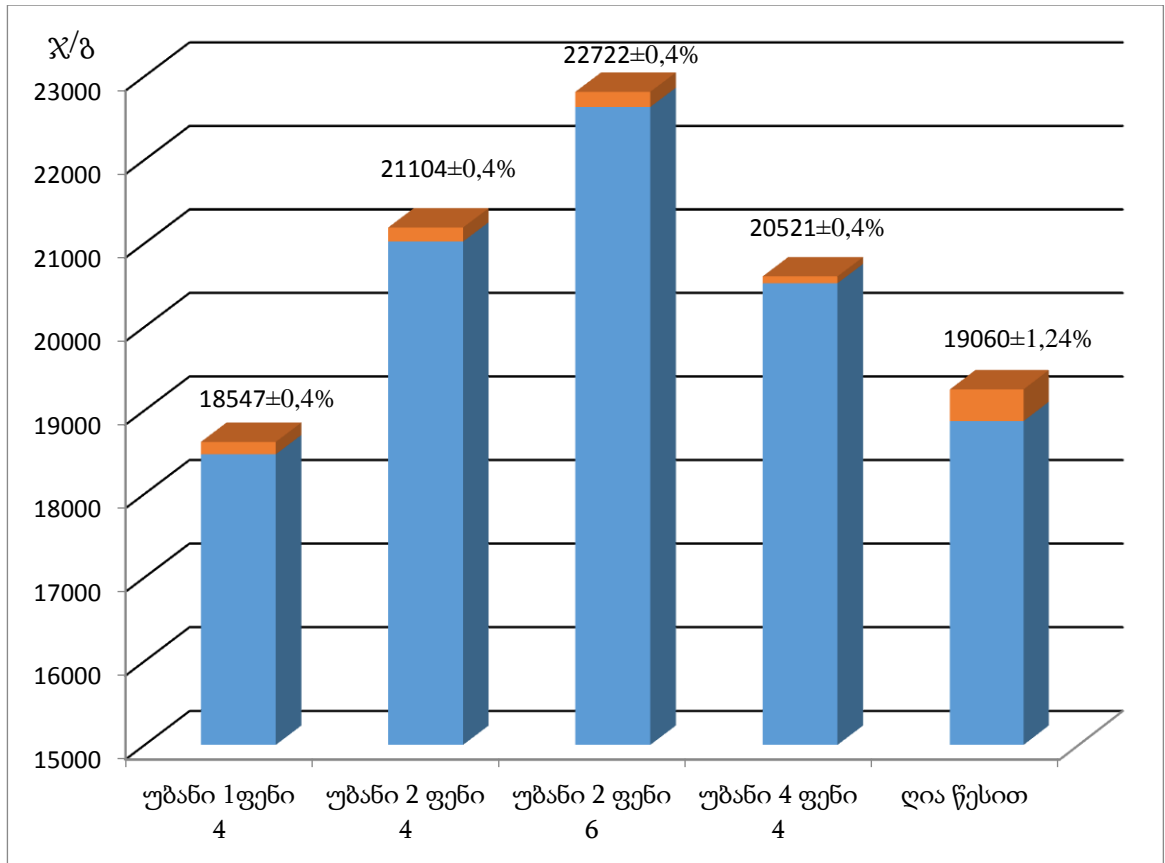
ნახაზ 18-ზე მოცემულია ტყიბულ-შაორის საბადოს სხვადასხვა ფენის ქვანახშირის თბოუნარიანობის ექსპერიმენტული მონაცემები გარფიკული სახით. ცისფერი სვეტი შეესაბამება ნიმუშის თბოუნარიანობას, ყავისფერი კი გაზომვების ცდომილებას.

როგორც გრაფიკიდან ჩანს, თბოუნარიანობის მნიშვნელობა ფენების მიხედვით იცვლება 18547 ჯ/გ-დან 22450 ჯ/გ-მდე საშუალო მნიშვნელობით 20595 ჯ/გ. გაზომვების ცდომილება შეადგენს 0,4%-ს. სხვადასხვა ფენის ქვანახშირის თბოუნარიანობის მნიშვნელობაში განსხვავდება შეადგენს (4 - 21)%-ს.

გასული საუკუნის 70-იანი წლების გამოკვლევის მონაცემებით ტყიბულ-შაორის საბადოს ქვანახშირის საშუალო უდაბლესი მუშა თბოუნარიანობა ტოლია 4420 კკალ/კგ, ანუ საცნობარო მასალაში მითითებული შედგენილობის მიხედვით არსებული წყალბადის და ტენის შემცველობის გათვალისწინებით მიღებული უმაღლესი მუშა თბოუნარიანობა 22635 კკალ/კგ-ის ტოლი იქნება [1,4].

ჩვენს მიერ ჩატარებული კვლევების შედეგები დაახლოებით 9%-ით განსხვავდება ადრე ჩატარებული კვლევების შედეგებისგან. ეს განსხვავება შეიძლება გამოწვეული იყოს ქვანახშირის მოპოვების არეალის ცვლილებით.

ჩვენს მიერ ჩატარებული კვლევების შედეგების მიხედვით შეიძლება ითქვას, რომ მხოლოდ თბოუნარიანობის პარამეტრის მიხედვით უკეთესი მონაცემები გააჩნია მე-2 უბნის მე-6 ფენის ქვანახშირს (უმაღლესი მუშა თბოუნარიანობა 22450 კჯ/კგ).

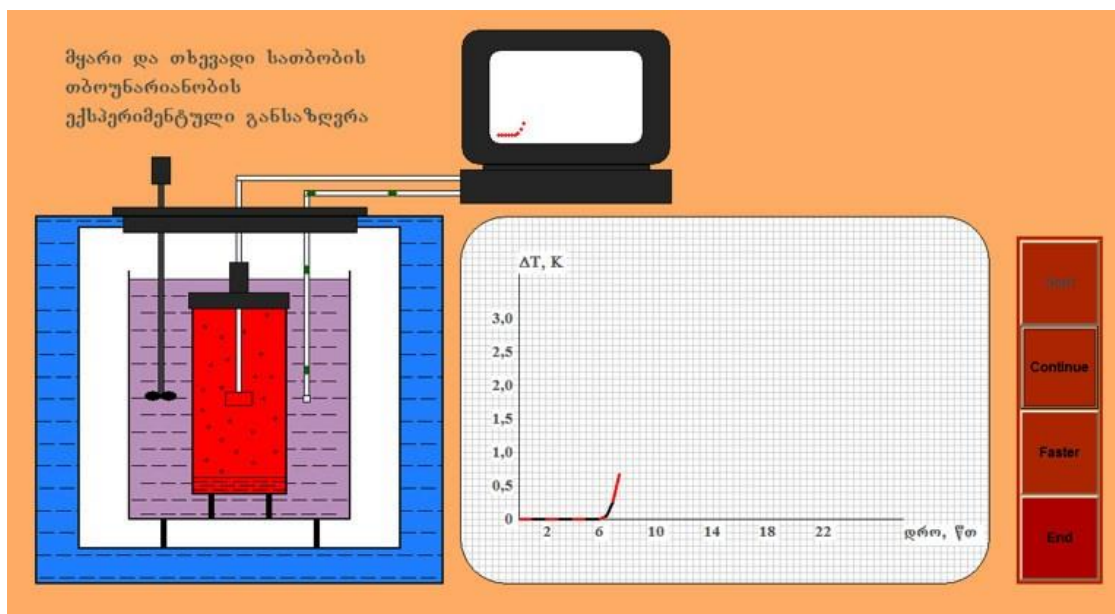


ნახაზი 18. ტყიბულ-შაორის საბადოს ქვანახშირის თბოუნარიანობის ექსპერიმენტული მონაცემები

4.12. ვირტუალური ამოცანა - სათბობის თბოუნარიანობის განსაზღვრა

მოცემული სამუშაოს ფარგლებში შეიქმნა ვირტუალური ამოცანა, რომელშიც თვალნათლივ ჩანს თბოუნარიანობის განსაზღვრის კალორიმეტრული მეთოდის მიმდინარეობა. ვირტუალური ამოცანა გათვალისწინებულია სტუდენტებისთვის და დაეხმარება მათ აღნიშნული მეთოდის შესწავლაში [44].

არსებობს თბოუნარიანობის განსაზღვის კალორიმეტრული მეთოდის შესასწავლი სტანდარტული ლაბორატორიული სამუშაო სტუდენტებისთვის, მაგრამ მისი ჩატარება ლაბორატორიული მეცადინეობის დროს გარკვეულ პრობლემებთანაა დაკავშირებული. კერძოდ, კალორიმეტრთან მუშაობა მოითხოვს სპეციალურ მომზადებას, რაც ერთი ლაბორატორიული მეცადინეობის განმავლობაში პრაქტიკულად შეუძლებელია; ამოცანა მოითხოვს მაღალი წნევის ჟამბადის გამოყენებას, რაც გარკვეულ საფრთხეებთანაა დაკავშირებული, და ა.შ. ვირტუალური ლაბორატორიული სამუშაო უსაფრთხოების ყველა პრობლემას ხსნის. გარდა ამისა, მისი საშუალებით შესაძლებელია ყურადღების გამახვილება თბური პროცესის იმ ნაწილზე, რომელიც რეალური ამოცანის შესრულებისას დაფარულია. ვირტუალური ამოცანა შესრულებულია პროგრამა Visual Basic-ში. მისი

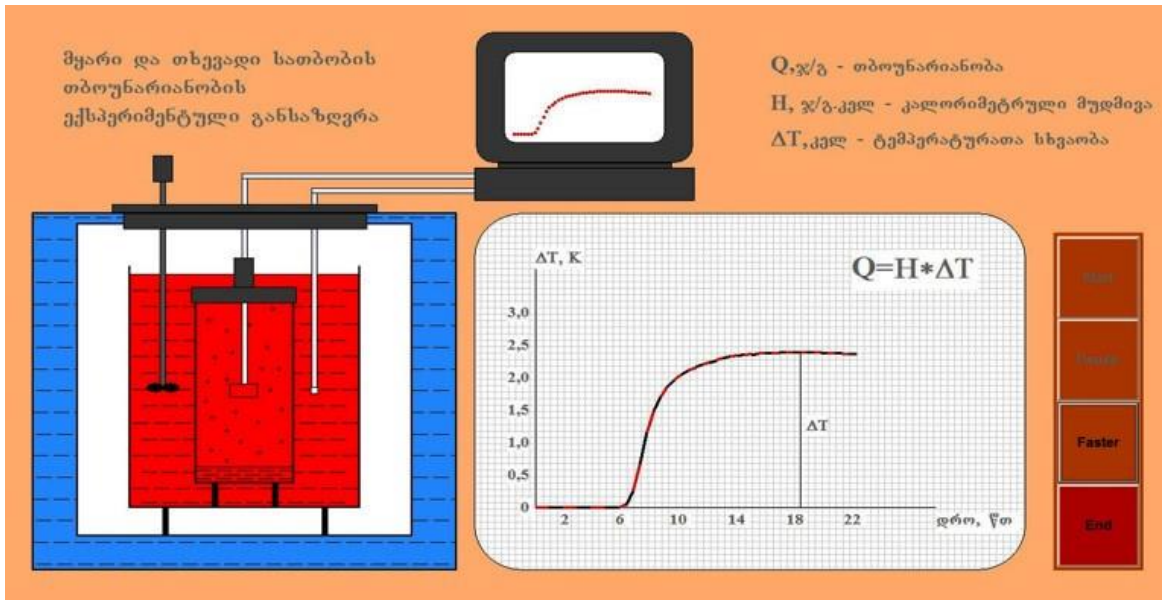


სურათი 19. კალორიმეტრული სისტემის მდგომარეობა ნიმუშის დაწვისთანავე

მსვლელობა ნათლად წარმოაჩენს რეალურ თბურ პროცესს. ვირტუალურ ამოცანაში თვალნათლივ ჩანს კვლევის პროცესის მართვა კალორიმეტრის თერმომეტრის მონაცემების საფუძველზე, „ნაპერწკლის“ წარმოქმნის მომენტი, ნიმუშის დაწვა და მაღალი წნევის „ბომბის“ და კალორიმეტრული

ჭურჭლის ტემპერატურის ცვლილება როგორც ფერებში ასევე გრაფიკულად [45,46].

სურათ 19-ზე მოცემულია კალორიმეტრული ჭურჭლის მდგომარეობა



სურათი 20. კალორიმეტრული სისტემის მდგომარეობა პროცესის დასრულებისას

ნიმუშის დაწვისთანავე, ხოლო სურათ 20-ზე კალორიმეტრული ჭურჭლის მდგომარეობა პროცესის დასრულების შემდე, ანუ, მას შემდეგ, რაც ტემპერატურა მიაღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას.

ძირითადი დასკვნები

1. შექმნილია მყარი და თხევადი სათბობის თბოუნარიანობის საზომი პრეციზიული ექსპერიმენტული სისტემა ცდომილებით 0,4%.
2. შექმნილია მყარი და თხევადი სათბობის თბოუნარიანობის საზომი სასწავლო-მეთოდური ვირტუალური ამოცანა
3. შექმნილია სათბობის თბოუნარიანობის გასაზომად მეორე თანრიგის სანიმუშო ნივთიერება-ბენზონის მჟავა (თბოუნარიანობით $26358,50 \pm 0,4\%$);
4. გამოკვლეულია ტყიბულ-შაორის ქვანახშირის საბადოს პირველი, მეორე და მეოთხე უბნების მე-4 და მე-6 ფენების ნიმუშების, და ღია წესით მოპოვებული ნიმუშების თბოუნარიანობა.
5. კვლევის შედეგების თანახმად ტყიბულ-შაორის ქვანახშირის თბოუნარიანობის საშუალო მნიშვნელობა 9%-ით განსხვავდება ლიტერატურაში არსებული მონაცემებისგან. ეს ფაქტი შესაზღვებელია განპირობებული იყოს ქვანახშირის მოპოვების არეალის ცვლილებით, გასაშუალების წესით და თანამედროვე ხელსაწყოების მაღალი სიზუსტით.
6. ჩვენს მიერ ჩატარებული კვლევების შედეგების მიხედვით შეიძლება ითქვას, რომ მხოლოდ თბოუნარიანობის პარამეტრის მიხედვით უკეთესი მონაცემები გააჩნია მე-2 უბნის მე-6 ფენის ქვანახშირს (უმაღლესი მუშა თბოუნარიანობა 22450 კჯ/კგ).
7. შექმნილი ექსპერიმენტული კალორიმეტრული სისტემა და ვირტუალური სასწავლო-მეთოდური ამოცანა გამოყენებული იქნება ენერგეტიკის ფაკულტეტის სტუდენტებისათვის, როგორც სასწავლო-კვლევითი ბაზა.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. Щеголев М.М., Гусев Ю.Л., Иванова М.С. Котельные установки. Москва: Издательство литературы по строительству, 1972, с. 384.
2. Попов М.М. Термометрия и калориметрия. М: изд-во МГУ, 1954, 942 с.
3. Скуратов С.М., Колесов В.П., Воробьев А.Ф. Термохимия. М: Изд-во МГУ, ч.1, 1964, 302 с.; ч.2, 1966, 434 с.
4. ყოფშიძე მ., ჯიშკარიანი თ., არაბიძე გ., ახალაია გ. საქვავბე დანადგარები. თბილისი: ტექნიკური უნივერსიტეტი, 2000, გვ.391.
5. Олейник Б.Н. Точная калориметрия. Москва, изд.стандарты, 1964, 160 с.
6. Лыков А.В. Теория теплопроводности. Москва: Высшая школа, 1967, 600с.
7. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Москва: энергоиздат, 1981, с.417.
8. Кондратьев Г.М. Металлический шаровой блок-калориметр смешения свободно охлаждаемый. Сб. статей ЛИТМО, 1957, 21, В кн.: «Исследования в области тепловых измерений и приборов». Сб. статей ЛИТМО, вып.21.Л., 1957, с.98.
9. Олейник Б.Н. В сб.: «Исследования в области тепловых и температурных измерений». Труды ВНИИМ, вып. 63(123). М.-Л., Стандартгиз, 1962, с.134.
10. Олейник Б.Н. В сб.: «Новые научно-исследовательские работы по метрологии». Инф.сб. №1. М.-Л., Изд-во стандартов, 1964, 116.
11. Harper D. R. Thermometric lag. "Bull. NBS", 1913, v.8, p.659.
12. Hoar F. E. The radiation correction in calorimetry. "Phil. Mag.", ser. 7, 1940, v. 29, p. 52.
13. Jessup R.S. Note on temperature correction methods in colorimetry.. "J. App. Phys", 1942, v.13, p.125
14. King A., Grover H. Temperature correction methods in calorimetry. "J. App. Phys.", 1941, v. 12, p.557.
15. Pfaundler L. Uber die Warmecapacitat. "Ann Phys. Chem. Pogg.", 1866, B. 129, S. 102.
16. Dickinson H.C. Combustion calorimetry. "Bull. NBS", 1915, #11, p.189.
17. Experimental thermochemistry, v. I., Ed.by F.D.Rossini, Int.Publ., New York: 1956, с. 243.
18. Микина В.Д. В сб.: «Исследования в области тепловых и температурных измерений». Труды ВНИИМ, вып.63(123). М.Л-Л., Стандартгиз, 1962, с.134.
19. Шураков А.Н. Испытание теплотворной способности топлива методом сжигания его в сдвленном кислороде. Л: Научн. химико-техническое издательство, 1928, с. 263.
20. Schwab F., Wichers E. Preparation of benzoic acid high purity. "J. Res. NBS.", 1940, v.25, p. 747
21. Jessup R.S., Green C.B. Heat of combustion of standard sample benzoic acid. "J. Res. NBS", 1934, v.13, p.469.
22. Taylor J.K., Smith W. Precise coulometric titration of acids and basis. "J. Res. NBS.", 1959, v. 63, p. 153.
23. Schwab F., Wichers E. Freezing temperature of benzoic acid as a fixed point in thermometry. "J. Res. NBS.", 1945, v.34, p. 333.

24. Weaver E.R. Benzoic acid as standard material. "J. Amer. Chem. Soc.", 1913, v.35, p. 1309.
25. Jessup R.S. Heat of combustion of benzoic acid with special reference to the standartization of bomb calorimeters. "J. Res. NBS", 1942, v.29, p.247
26. Coohs J., Adriaanse N., van Nes K. The absolute heat of combustion of btznzoic acid. "Res. Trav. Chim. Pays-Bas", 1956, v. 75, p. 237.
27. Premier rapport de la Comission Permanente de Thermochemie. Paris, 1934.
28. Keffler L. J. P. Research upon prospective standard substances for bomb calorimetry. A stuby of succinic acid. "J. Phys. Chem.", 1934, v. 38, p. 717.
29. Verkade P., Coops J. Notes on the standard substances. "Res. Trav. Chim. Pays-Bas", 1924, v. 43, p. 561.
30. Verkade P. E., Hartman H., Coops J. The molecular heat of combustion of successive terms of homologous series. "Proc. Acad. Sci. Amst.", 1924, v. 27, p. 859.
31. Roth W.A., Becker G. Bernsteinsäure als secundäre Eichsubstanz für Verbrennungs bomben. "Z. Phys. Chem.", 1937, B. A179, S. 450.
32. Revue analytique et critique de thermochemie organique. Appendices au premier de la Comission Permanente de Thermochemie. Paris, 1936, c. 274.
33. ჩხიკვაძე ქ. სათბობის თბოუნარიანობის საკვლევი ხელსაწყოს თბური ექვივალენტის განსაზღვრა. სტუ-ს შრომები, 2014, #4(494), 19-22
34. ჩხიკვაძე ქ., კილურაძე ო., ჩხიკვაძე თ. თხევადი და მყარი სათბობის თბოუნარიანობის საზომი ხელსაწყოს გამოკვლევა. სტუ-ს არჩილ ელიაშვილის მართვის სისტემების ინსტიტუტის შრომათა კრებული, 2014, 18, 111-115.
35. ჩხიკვაძე ქ. ადგილობრივი სათბობის - ტყიბულ-შაორის ქვანახშირის თბოუნარიანობა. ქუთაისი, საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის „მდგრადი ენერგეტიკა: გამოწვევები და განვითარების პერსპექტივები“ მოხსენებათა კრებული, 2015, 104-108
36. კილურაძე ო., ჩხიკვაძე ქ., ჩხიკვაძე თ. სათბობის თბოუნარიანობის სანიმუშო ნივთიერების შექმნა ბენზოინის მჟავას ბაზაზე. სტუ-ს შრომები. 2014, 3(493), 15-18.
37. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии. Москва: Изд.стандартов, 1972, 318с.
38. ლომინაძე შ., ყიფშიძემ., ჯიშკარიანი თ. სათბობის ტექნიკური ანალიზი და ორთქლგენერატორების საექსპლუატაციო გამოცდა (დამხმარე სახელმძღვანელო). თბილისი, გამ.სპი, 1979, გვ.82
39. Левашова А.И., Маслов С.Г. Технический анализ твердых горючих ископаемых. Томск: изд.ТПУ (Томский политехнический университет), 2015, с.23
40. Равич М.Б., Топлива и эффективность его использования. М.: Наука, 1971, с.358.
41. Зикеев Т.А., Корелин А.И. Анализ энергетического топлива. М.-Л.: ГЭИ, 1948, с.328.

42. ჩხიკვაძე ქ., კილურაძე ო., ჩხიკვაძე თ. ტყიბულ-შაორის საბადოს სხვადასხვა დონის ნიშნულების ქვანახშირის თბოუნარიანობა. ენერჯია, 2016, 1(77), 38-41
43. Долинский Е.Ф. Обработка результатов измерений. Москва: Изд.стандартов. 1973, 192с.
44. ჩხიკვაძე ქ., კილურაძე ო., კეჭერაძე ნ. ორი ვირტუალური ამოცანა - სათბობის თბოუნარიანობის განსაზღვრა და ნამწვი აირების ანალიზი. ენერჯია. 2015, 4(76), 32-35.
45. Браун С. Visual Basic. Санкт-Петербург: изд.Питер, 2002, с.573
46. მაჭარაძე თ., წვერაიძე ზ. ინფორმატიკის საფუძვლები. თბილისი, ტექნიკური უნივერსიტეტი, 2003, გვ.320.