

საქართველოს განათლებისა და მეცნიერების სამინისტრო

ქუთაისის ნ. მუსხელიშვილის სახელობის სახელმწიფო ტექნიკური
უნივერსიტეტი

ამირან უგულავა

ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივის ცვალებადობის გავლენა
გრავიმეტრის ჩვენებაზე და მისი თავიდან აცილების
საშუალებები

სპეციალობა: 05.11.13. – გარემოს, ნივთიერების, მასალებისა და
ნაწარმის კონტროლის საშუალებები და მეთოდები
ტექნიკის მეცნიერებათა კანდიდატის
სამეცნიერო ხარისხის მოსაპოვებლად წარმოდგენილი

დ ი ს ე რ ტ ა ც ი ა

სამეცნიერო ხელმძღვანელი:

კარლო მაგლობლიშვილი – ტექნიკის
მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი

ქუთაისი 2006

შინაარსი

შესავალი.

1. გრავიმეტრულ გაზომვათა მეთოდებისა და აპარატების ზოგადი მიმოხილვა.

- 1.1. გრავიმეტრიის განვითარების მოკლე ისტორიული მიმოხილვა.
- 1.2. გრავიმეტრიის განვითარება საქართველოში.
- 1.3. გრავიმეტრულ გაზომვათა საფუძვლები და პირველი აპარატები.
- 1.4. გრავიმეტრიის პირდაპირი და შებრუნებული ამოცანები.
- 1.5. ქანქარის რხევის თეორია.
- 1.6. საქანი – გნოსეოპლოგიური ხელსაწყო.
- 1.7. მოსაბრუნებელ საქანიანი აპარატები.
 - 1.7.1. კეტერის აპარატი.
 - 1.7.2. რეფსოლდის აპარატი.
- 1.8. ბალისტიკური გრავიმეტრიის თეორია.
- 1.9. ბალისტიკური გრავიმეტრები.
- 1.10. სიმძიმის ძალის ფარდობითი განსაზღვრა საქანიანი ხელსაწყოთი.
- 1.11. შტუკრატის ოთხსაქანიანი აპარატი.
- 1.12. სიმძიმის ძალის განსაზღვრის სტატიკური მეთოდები.
- 1.13. სტატიკური გრავიმეტრების მიმოხილვა.

ლომონოსოვის უნივერსალური ბარომეტრი.

 - 1.13.2. ჰაალკის გრავიმეტრი.
 - 1.13.3. ნორგარდის გრავიმეტრი.
 - 1.13.4. გრაფის გრავიმეტრი.
 - 1.13.5. ბიფილარული გრავიმეტრი.
 - 1.13.6. გრავიმეტრი «ჩრდილო ამერიკა».
 - 1.13.7. გრავიმეტრი ГАГ- 2 .
 - 1.13.8. გრავიმეტრი ГНУ – К1 .
- 1.14. გრავიმეტრების გამოკვლევა.
 - 1.14.1. გრავიმეტრების დაყენება დახრისადმი მგრძნობიარობის მინიმუმზე.
 - 1.14.2. გრავიმეტრის სკალის დანაყოფის ფასის განსაზღვრა.
 - 1.14.3. გრავიმეტრის ტემპერატურული კოეფიციენტის განსაზღვრა.
 - 1.14.4. გრავიმეტრის ნულპუნქტის გამოკვლევა.

2. ზოგიერთი გარემო ფაქტორის გავლენა გრავიმეტრის მუშაობაზე და მათი გამორიცხვის მეთოდები.

- 2.1. გარემოს ტემპერატურის ცვლილების გავლენა გრავიმეტრის მუშაობაზე.
- 2.2. ატმოსფერული წნევის ცვლილების გავლენა.
- 2.3. მაგნიტური ველის ცვლილების გავლენა.
- 2.4. ატმოსფერული ჰაერის წნევის ცვლილების გავლენა სიმძიმის ძალაზე.

3. ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივის ცვლილების გავლენა გრავიმეტრის ჩვენებაზე და მისი კომპენსირება.

- 3.1. ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივის ცვლილების გავლენა გრავიმეტრის ჩვენებაზე – პირდაპირი მიზიდულობის ეფექტი.
- 3.2. არაერთგვაროვანი სიმკვრივის მქონე ჰაერის ბირთვის სიმძიმის ცენტრის განსაზღვრის ექსპერტიმენტული მეთოდი.
- 3.3. ჰაერის ბირთვის ოპტიმალური რადიუსის შერჩევისა და სენსორის მასაზე მისი მოქმედების მაქსიმალური მნიშვნელობის დადგენა.
- 3.4. ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის გრავიმეტრის ჩვენებათა შემასწორებელი ცხრილის შედგენა.
- 3.5. გრავიკომპენსატორი .
- 3.6. გრავიკომპენსატორის ოპტიმალური მასის, ფორმისა და ნივთების შერჩევა.
- 3.7. სენსორ – კომპენსატორის ურთიერთქმედებაში თითოეული მიკროგალი ცვლილებისათვის კომპენსატორის შესაბამისი გადაადგილების განსაზღვრა.
- 3.8. სენსორ – კომპენსატორის ურთიერთქმედების ექსპერიმენტული შემოწმება.
- 3.9. ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის გრავიმეტრის ჩვენებათა შემასწორებელი ცხრილის ექსპერიმენტული შემოწმება.
- 3.10. ჰაერის სიმკვრივის ცვალებადობაზე უწყვეტი დაკვირვების ჰი-დრომექანიკური მეთოდი.

4. გაზომვათა ცდომილებები.

- 4.1. პირდაპირი გაზომვების ცდომილებათა ანალიზი.
- 4.2. უმცირეს კვადრატთა მეთოდი.
- 4.3. ექსპერიმენტის შედეგთა მეტროლოგიური დამუშავება.
 - 4.3.1. გრავიმეტრის ჩვენების დამოკიდებულება ჰაერის სიმკვრივის ცვალებადობაზე.

რავიმეტრის ჩვენების დამოკიდებულება სენსორ – კომპენსატორს შორის მანძილის ცვლილებებზე.

ძირითადი დასკვნები.

გამოყენებული ლიტერატურა.

შ ე ს ა ვ ა ლ ი

თემის აქტუალობა. დედამიწის გრავიტაციული ველის შესწავლა, რომელიც გრავიმეტრის ძირითად ამოცანას წარმოადგენს, მდიდარ მასალას იძლევა მის შინაგან აგებულებაზე, კერძოდ კი, მასში სხვადასხვა სიმკვრივის ქანების, მინერალური წყლების, კარსტული მღვიმეების, სეისმო-ტექტონური ზონებისა და სასარგებლო წიაღისეულ სიმდიდრეთა შესახებ. გარდა ამისა, იძლევა ციური სხეულების, ხელოვნური თანამგზავრებისა და კოსმოსური ხომალდების მოძრაობის შესწავლის საშუალებას.

მეცნიერულ-ტექნიკური პროგრესი წარმოუდგენელია აღნიშნული დარგებისა თუ მიმართულებების განვითარების გარეშე, რაც, თავის მხრივ, დღის წესრიგში აყენებს გრავიმეტრულ გაზომვათა მეთოდების სისტემატური სრულყოფისა და დახვეწის აუცილებლობას.

დედამიწის წიაღში დიდ სიღრმეებზე განლაგებული მადანშემცველი სტრუქტურები, როგორც წესი, ძალიან მცირე გრავიტაციული ანომალიებით ხასიათდება, ამიტომ მათი აღმოჩენა და დაფიქსირება დაბალი სიზუსტის მქონე მზომი აპარატებით, ცხადია, შეუძლებელია. გარდა ამისა გრავიტაციულ გაზომვათა სიზუსტის, რომელიც დღეისათვის 1 მიკროგალს შეადგენს, ამაღლება და გაზომვის შედეგებზე გარემო ფაქტორების გავლენათა მაქსიმალური გამორიცხვა საშუალებას იძლევა დაფიქსირდეს უმცირესი გრავიტაციული ეფექტები, დასრულდეს დედამიწის გლობალური ტექტონიკური დარაიონება, გადაწყდეს სიმძიმის ძალის საუკუნეობრივი ვარიაციის საკითხი და მიწიერი გრავიმეტრის პარალელურად დაიწყოს მისი გამოყენება მთვარესა და მზის სისტემის სხვა პლანეტებზე.

კვლევის საგანი და პრობლემატიკა. კვლევის საგანს წარმოადგენს სიმძიმის ძალის აჩქარების საზომი ხელსაწყო – გრავიმეტრი და მისი მეშვეობით დედამიწის მოცემულ წერტილში სიმძიმის ძალის აჩქარების შესაძლო

მაქსიმალური სიზუსტით გაზომვა მზომ ხელსაწყოზე ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივის ცვალებადობის გავლენის გამორიცხვის მეთოდით. აღნიშნული მიმართულებით მთავარ პრობლემას წარმოადგენს გრავიკომპენსატორის ოპტიმალური კონსტრუქციის შექმნა, აგრეთვე მზომი ხელსაწყოს მიმართ მისი ზუსტად დაყენება და შემდგომი რეგულირება ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივის ცვალებადობის მიხედვით.

კვლევის მიზანი და ამოცანები. სამუშაოს მიზანია სიმძიმის ძალის აჩქარების გაზომვის ისეთი მეთოდის შემუშავება, რომელიც საშუალებას მოგვცემს გრავიმეტრის ჩვენებაში გამოირიცხოს ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივის ცვალებადობით გამოწვეული ცდომილება, რაც ჰაერის მხრიდან გრავიმეტრის მგრძნობიარე ელემენტზე (სენსორზე) უშუალო გრავიტაციული მიზიდულობით არის გამოწვეული. აღნიშნული მიზნის მისაღწევად ჩამოყალიბებულ იქნა შემდეგი ამოცანები:

- ატმოსფერულ ჰაერში, სიმაღლის მიხედვით, სიმკვრივეთა განაწილების შესწავლა და მისი გათვალისწინებით გრავიმეტრის ზემოთ არსებული ჰაერის ბირთვის ოპტიმალური რადიუსის განსაზღვრა.
- ოპტიმალური რადიუსისა და არაერთგვაროვანი სიმკვრივის მქონე ჰაერის ბირთვის მასისა და სიმძიმის ცენტრის მდებარეობის განსაზღვრა.
- ჰაერის ბირთვის საშუალო სიმკვრივის ყოველი $0,01 \text{ კგ/მ}^3$ – ით ცვლილებისას მისი მასის ცვლილების განსაზღვრა და აღნიშნული მასის გრავიმეტრის მგრძნობიარე ელემენტზე მოქმედების ეფექტის გამოთვლა.
- მიღებული ეფექტების გათვალისწინებით გრავიკომპენსატორის ტვირთის ოპტიმალური მასის, მასალის, რადიუსისა და ვერტიკალური მოძრაობის დიაპაზონის დადგენა.

კვლევის მეთოდები. დასმული ამოცანების გადაწყვეტის მიზნით გამოყენებულ იქნა გეომეტრიული კვთების მეთოდი, ექსტრაპოლაციის მეთოდი, მათემატიკური მოდელირებისა და სიმძიმის ცენტრის განსაზღვრის ექსპერიმენტული მეთოდი.

ეფექტების ანგარიში ჩატარებულია წმინდა ფიზიკრი მეთოდებით. მიღებული შედეგები დამუშავებულ იქნა მათემატიკური სტატისტიკის მეთოდებით.

ნაშრომების მეცნიერული სიახლე. ნაშრომში შემუშავებულია სიმძიმის ძალის აჩქარების გაზომვის ახალი მეთოდი, რომლის სიახლე დადასტურებულია საქართველოს პატენტით. წარმოდგენილი მეთოდი საშუალებას იძლევა გრავიმეტრის ჩვენებაში გამორიცხული იქნას ცდომილება, რომელიც განპირობებულია ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივის ცვალებადობით. კერძოდ, შედგენილია სპეციალური ცხრილები, რომელთა გამოყენებაც შესაძლებელია ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის სათანადო შესწორებები იქნას შეტანილი გრავიმეტრის ჩვენებაში. გარდა ამისა, შექმნილია გრავიკომპენსატორის კონსტრუქცია, რომლის გამოყენება შესაძლებლობას იძლევა, ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივის ცვალებადობის მიუხედავად, სათანადო ცდომილების გარეშე იქნას გაზომილი სიმძიმის ძალის აჩქარების სიდიდე.

სამუშაოს პრაქტიკული მნიშვნელობა. ნაშრომში წარმოდგენილი სიმძიმის ძალის აჩქარების განსაზღვრის ახალი მეთოდი საშუალებას იძლევა გამოირიცხოს გრავიმეტრის ჩვენებაზე ატმოსფეროს მხრიდან უარყოფითი ზეგავლენა, რომლის ცვლილების დიაპაზონი 30 მიკროგალს აღწევს. ეს კი, თავის მხრივ, საშუალებას იძლევა გაცილებით უფრო ზუსტად განისაზღვროს, როგორც დედამიწის შინაგანი სტრუქტურა, ასევე მასში სასარგებლო წიაღისეულ სიმდიდრეთა მდებარეობა, რაც თავიდან აგვაცილებს შეცდომებს რამდენიმე კილომეტრი სიღრმის ჭაბურღილების გათხრისას.

დაცვაზე გამოტანილი დებულებები.

- გრავიკომპენსატორის კონსტრუქცია; გრავიკომპენსატორის ტვირთის ოპტიმალური მასის, მასალის, რადიუსისა და ვერტიკალური მოძრაობის დიაპაზონის განსაზღვრის მეთოდი; სენსორ-კომპენსატორის ურთიერთქმედებაში თითოეული მიკროგალი ცვლილებისათვის კომპენსატორის ტვირთის შესაბამისი გადაადგილების განსაზღვრის მეთოდი.
- ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივის ცვალებადობის გრავიმეტრის ჩვენებაზე გავლენის განსაზღვრის მეთოდი; არაერთგვაროვანი სიმკვრივის მქონე ჰაერის ბირთვის სიმძიმის ცენტრის განსაზღვრის ექსპერიმენტული მეთოდი; ჰაერის ბირთვის ოპტიმალური რადიუსის შერჩევის, მისი

საშუალო სიმკვრივისა და სენსორის მასაზე ჰაერის ბირთვის მოქმედების მაქსიმალური მნიშვნელობის დადგენის მეთოდი.

- ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივის ცვალებადობაზე უწყვეტი დაკვირვების მეთოდი.

სამეცნიერო შედეგების საიმედოობა და დასაბუთება. მიღებული შედეგების საიმედოობა და დასაბუთება უზრუნველყოფილია თანამედროვე კვლევის მეთოდების გამოყენებით, თეორიული შედეგების ექსპერიმენტული შემოწმებით, თეორიული და ექსპერიმენტული შედეგების იდენტურობით. სხვაობა თეორიულ და ექსპერიმენტულ შედეგებს შორის არ სცილდება დასაშვები ცდომილების ფარგლებს. ექსპერიმენტით მიღებული ცდომილება ნაანგარიშებია 0,95 ალბათობით.

სამუშაოს შედეგების რეალიზაცია. ნაშრომში ჩამოყალიბებული სამეცნიერო დებულებებისა და შედეგების რეალიზაცია განხორციელებულია გრავიკომპენსატორზე, რომლის სიახლე დადასტურებულია საქართველოს პატენტით.

კვლევის ობიექტი. კვლევის ობიექტს წარმოადგენს გრავიმეტრის მოსათავსებელი მექანიკური მოწყობილობა – “გრავიკომპენსატორი”, რომელზეც საქართველოს საპატენტო დეპარტამენტის მიერ მიღებულია დადებითი გადაწყვეტილება სასარგებლო მოდელზე პატენტის გასაცემად.

ნაშრომის აპრობაცია. სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი დებულებები მოხსენებულია და განხილულია ქუთაისის ნ. მუსხელიშვილის სახელობის სახელმწიფო ტექნიკური უნივერსიტეტის “მეტროლოგიის, სტანდარტიზაციისა და სერტიფიკაციის” კათედრის სხდომაზე (2006წ). მიღებულია დადებითი გადაწყვეტილება სასარგებლო მოდელზე პატენტის გაცემაზე “გრავიკომპენსატორი” (2006წ).

პუბლიკაციები. დისერტაციის მასალები გამოქვეყნებულია 4 სამეცნიერო სატატიოში და მიღებულია დადებითი გადაწყვეტილება სასარგებლო მოდელზე საქართველოს პატენტის გაცემაზე.

ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა. ნაშრომი შედგება შესავლისაგან, 4 თავისაგან, ძირითადი დასკვნებისაგან, გამოყენებული ლიტერატურის 116 დასახელებისაგან, სამუშაო წარმოდგენილია 125 გვერდზე, შეიცავს 28 ნახაზსა და 7 ცხრილს.

1. გრავიმეტრიულ გაზომვათა მეთოდებისა და აპარატების ზოგადი მიმოხილვა

1.1. გრავიმეტრიის განვითარების მოკლე ისტორიული მიმოხილვა

გრავიმეტრია გეოფიზიკური მეცნიერების ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი დარგია. იგი ორი სიტყვისგან წარმოდგება: ლათინურიდან *gravitas* – სიმძიმე და ბერძნულიდან *metron* (Μετρον) – ზომა, რაც ზუსტი თარგმნით ნიშნავს სიმძიმის ძალის გაზომვას. მაგრამ მისი ნამდვილი შინაარსი მნიშვნელოვნად ფართოა. გრავიმეტრია არის მეცნიერება სიმძიმის ძალისა და მისი წარმოებულების სიდიდეთა გაზომვებზე და ამ მონაცემების გეოფიზიკაში, გეოლოგიაში, გეოდეზიაში, ასტრონომიაში, კოსმონავტიკაში და მეცნიერებისა და ტექნიკის სხვა დარგებში გამოყენების შესახებ. [2]

დედამიწის გრავიტაციული ველი სიმძიმის ძალის ველია. სიმძიმის ძალა წარმოადგენს დედამიწის მიზიდულობისა და ცენტრიდანული ძალების ტოლქმედს. დედამიწის ზედაპირზე გაზომილი სიმძიმის ძალის სიდიდე დამოკიდებულია დედამიწის ფიგურაზე (ფორმაზე) და მის შიგნით მასების სიმკვრივის განაწილებაზე. ამიტომ დედამიწის გრავიტაციული ველის შესწავლა გვამღებს მდიდარ მასალას დედამიწის შინაგან აგებულებაზე, სასრებლო წიაღისეულთა განლაგებაზე, დედამიწის ფიგურისა და შვეულის გადახრის განსასაზღვრავად, ცირ სხეულთა, ხელოვნური თანამგზავრებისა და კოსმოსური ხომალდების მოძრაობის დასადგენად და ა.შ. [1; 14]

თანამედროვე გრავიმეტრიული მეთოდების ჩამოყალიბების დასაწყისად შეიძლება ჩათვალოს XVII საუკუნის პირველი ნახევარი, როცა გალილეო გალილეიმ 1638 წ. აღმოაჩინა სხეულთა თავისუფლად ვარდნის კანონი და შექმნა სიმძიმის ძალის აბსოლიტური მნიშვნელობის განსაზღვრის ყველაზე ბუნებრივი მეთოდი.

უფრო მოგვიანებით ჰოლანდიელმა მეცნიერმა ჰიუგენსმა (1673 წ.) დაამუშავა მათემატიკური საქანის თეორია, რომელიც შემდგომში საბოლოოდ ჩამოაყალიბეს შვეიცარიელმა მეცნიერებმა იაკობ, ივანე და დანიელ ბერნულებმა (1691-1726 წწ.). აღსანიშნავია, რომ ფიზიკური საქანი ძალზე მოსახერხებელი აღმოჩნდა სიმძიმის ძალის აბსოლიტური და ფარდობითი მნიშვნელობის გასაზომად.

გენიალურმა ინგლისელმა მეცნიერმა ისააკ ნიუტონმა, კეპლერის კანონების განზოგადების საფუძველზე 1686წ. ჩამოაყალიბა მსოფლიო მიზიდულობის კანონი, რომელიც იქცა ქვაკუთხედად მომავალი გრავიმეტრიული მეთოდებისა. ნიუტონმა პირველმა გამოიყენა ეს კანონი დედამიწის ფიგურის განსაზღვრისათვის და ამით საფუძველი ჩაუყარა, განსხვავებით გეოდეზიური (გეომეტრიული) მეთოდისა, დედამიწის ფიგურის შესწავლის პრინციპულად ახალ (ფიზიკურ) მეთოდს, რომელიც დედამიწის ფიგურის თეორიის სახელწოდებითაა ცნობილი. მანვე გამოთქვა აზრი დედამიწის ხელოვნური თანმგზავრის შექმნის შესაძლებლობის შესახებ და სათანადო გაანგარიშებებიც ჩაატარა. გარდა ამისა ახსნა მიმოქცევითი მოვლენების ფიზიკური არსი და შექმნა სათანადო სტატისტიკური თეორია. [4]

ამ პერიოდიდან მოყოლებული განსაკუთრებული ყურადღება მიექცა დედამიწის ფიგურის თეორიის პრობლემის დამუშავებას (კლერო, სტოქსი, პუანკარე, ლიაპუნოვი, ვენინგ მენესი, მოლოდენსკი), რასაც ხელს უწყობდა კვლევის მათემატიკური მეთოდების განვითარება, კერძოდ, პოტენციალის თეორიის შექმნა (ლაგრანჟი, ლაპლასი, გრინი, გაუსი, დირიხლე, ნეიმანი). [1]

კლასიკური გამოკვლევები დედამიწის ფიგურის თეორიაში ეკუთვნის ფრანგ მათემატიკოსს კლეროს, რომელმაც 1743 წ. დაამყარა დამოკიდებულება სიმძიმის ძალასა და გეოგრაფიულ განედს შორის, ერთი მხრივ და დედამიწის კუმშვისა და სიმძიმის ძალის ფარდობით სიჭარბეს შორის პოლუსზე ეკვატორთან შედარებით, მეორე მხრივ.

კლეროს თეორიებმა და გაზომილი სიმძიმის ძალის მნიშვნელობათა საფუძველზე ჰელმერტმა 1884 წ. გამოიყვანა ნორმალური სამძიმის ძალის ფორმულა და დამოიანგარიშა დედამიწის კუმშვა. ეს ფორმულა მან (1901-1909 წწ.) დააზუსტა და იგი დღესაც გამოიყენება. [2; 15; 16]

ნიუტონის მსოფლიო მიზიდულობის ფორმულაში შემავალი გრავიტაციული მუდმივა პირველად განსაზღვრა ინგლისელმა მეცნიერმა კავენდიშმა. მანვე განსაზღვრა დედამიწის საშუალო სიმკვრივე და მასა.

ფრანგმა მეცნიერებმა ბუგემ და ლაკონდამინმა 1740 წელს შეამჩნიეს, რომ მთის მახლობლად გაზომილი შვეულის გადახრის სიდიდე ნაკლებია თეორიულად გამოთვლილზე და გამოთქვეს მოსაზრება, რომ მთის ქვეშ ქერქი ნაკლებ მკვრივია, ვიდრე მოსაზღვრე დაბლობის ქვეშ. ასიოდე წლის შემდეგ იგივე მოვლენა შეამჩნიეს ინდოეთშიც ჰიმალაის მთების მახლობლად, რომლის ასახსნელად მეცნიერებმა პრატმა და ერიმ ანალოგიური მოსაზრების საფუძველზე ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად წამოაყენეს თეორია დედამიწის ქერქის აგებულების შესახებ. შემდგომში მას იზოსტაზიის ანუ ქერქის წონასწორობის თეორია უწოდეს. [21]

XVIII საუკუნის 30-იანი წლებიდან იწყებს განვითარებას სიმძიმის ძალის განსაზღვრის აბსოლიტური (ლაკონდამინი, ბორდა, კასინი, კეტერი, ბესელი, რეფსოლდი) და ფარდობითი (პაროტი, შტერნევი, შტუკრატი, ვენინგ მენესი, სოროკინი, ფედინსკი) საქანიათი მეთოდები. სიმძიმის ძალის პირველი გაზომვები საქანიათი აპარატებით რუსეთში ჩაატარეს ადმირალმა ფ. ლიტკემ პროფესორებმა: ფ. აპროტმა, ბ. შვეიცარმა, ი. სტებნიუტსკიმ, ფ. სლუდსკიმ და სხვებმა.

მეოცე საუკუნის 60-ანი წლებიდან მოყოლებული საქანიათი ხელსაწყოების კლასი მნიშვნელოვნად ამაღლდა. გაუმჯობესდა დაკვირვების ტექნიკა და მასალების დამუშავების მეთოდიკა. რამაც რამდენჯერმე გაზარდა სიმძიმის ძალის აბსოლიტური და ფარდობითი გაზომვის სიზუსტე. ასეთი აპარატურა ყოფილ საბჭოთა კავშირში (ბულანჟე, ხეიფეცი), ამერიკაში (მენდენჰოლი), კანადაში (დომინიონის ობსერვატორია), საფრანგეთში (ტულინი), ინგლისში, იაპონიაში და სხვაგან. [16; 24; 26]

ბევრად უფრო მარტივი და ეკონომიურია სიმძიმის ძალის ფარდობითი განსაზღვრის სტატიკური მეთოდი. მისი მამამთავარი იყო გამოჩენილი რუსი მეცნიერი მ. ლომონოსოვი, რომელმაც XVIII საუკუნის შუა წლებში გამოიგონა დიფერენციალური ბარომეტრი (სინდიციან-აირიანი გრავიმეტრი) და გამოიყენა იგი სიმძიმის ძალის პერიოდული ცვლილების შესასწავლად.

XX საუკუნის დასაწყოსში გერმანელმა მეცნიერმა ჰეკერმა ბარომეტრული მეთოდით ჩაატარა გაზომვები ზღვებზე, რომლითაც დასაბამი მიეცა აკვატორიუმების გრავიტაციული ველის შესწავლას. სტატიკურ მეთოდს წილად ხვდა სწრაფი განვითარება. შეიქმნა სხვადასხვა სახის სტატიკური გრავიმეტრები: ჰაალკის, გრაფის, ისინგის, ბოლიდენის, ნორგარდის, მოლოდენსკის, ბულანჟეს, ჩრდილო ამერიკის, მოტსმიტის, უორდენის, შარპის, ლაკოსტას და სხვათა, რომლებიც გამოიყენება ხმელეთზე, ზღვის ფსკერზე, ჭაბურღილებში, შახტებსა და ჰაერში დაკვირვებებისათვის. [4; 46; 49]

XX საუკუნის 20-იანი წლებიდან მკვეთრად გაფართოვდა გრავიმეტრიული მეთოდით გეოლოგიური ამოცანის გადაჭრის პერსპექტივა და, ამასთან დაკავშირებით, დამუშავდა მიზიდულობის პოტენციალის პირდაპირი და შებრუნებული ამოცანები სიმბიმის ძალის ანომალიის რაოდენობითი ინტერპრეტაციის მიზნით.

გასული საუკუნის 40-იანი წლებიდან მოყოლებული მაღალი სიზუსტის და დიდი წარმადობის მქონე სტატიკურმა გრავიმეტრებმა არსებითად შეამცირა საქნიანი აპარატების როლი ხმელეთზე და ზღვაზე. ამჟამად მაღალი კლასის საქნიან აპარატებს იყენებენ საყრდენი პუნქტების გაიშვიათებული ქსელების შესაქმნელად.

პირველი მსოფლიო ომის შემდეგ გრავიმეტრიული სამუშაოები უფრო მიზანდასახული გახდა, რომელსაც ორი ძირითადი მიმართულება ახასიათებდა:

1. გეოდეზიური – დედამიწის ფიგურისა და მისი კუმშვის სდიდის განსაზღვრა;
2. გეოლოგიური – დედამიწის ქერქის აგებულების შესწავლა, გეოტექტონიკური დარაიონება, სასარგებლო წარმოების ძებნა-ძიება და სხვა. [52; 55; 69]

1932 წელს ყოფილ საბჭოთა კავშირის ტერიტორიაზე დაიწყო ზოგადი გრავიმეტრიული აგეგმვა საქნიანი აპარატებით. ამავე პერიოდიდან მოყოლებული გრავიმეტრიული გაზომვები შიგა და გარე ზღვებზეც დაიწყო. განსაკუთრებული დამსახურება ამ საქმეში მიუძღვით: ი. გუბკინს, პ. ლაზარევს, ო. შმიდტს, ი. არხანგელსკის და ა. მისაილოვს. აკადემიის წევრ კორესპონდენტებს პ. ნიკოფოროვს და ვ. ფედონსკის. პროფესორებს ბ.ნუმეროვს, ლ. სოროკინს და სხვებს.

შემდგომში მზარდი ტემპით ცალკეული რეგიონების დეტალური გრავიმეტრიული აგეგმვა და ამ მონაცემების საფუძველზე მრავალი საყურადღებო მეთოდურ და გეოლოგიური გამოკვლევა ჩატარდა, რომლებიც ეძღვნებოდა დედამიწის ქერქისა და ზედა მანტიის აგებულების შესწავლას.

XX საუკუნის 60-იანი წლებიდან მოყოლებული ინტენსიურად წარიმართა გამოკვლევები გრავიმეტრიული ველის ტრანსფორმაციისა და რაოდენობითი ინტერპრეტაციის მიზნით მექანიკური ხერხების დამუშავება – გამოყენებით, ერთი მხრივ, და მაღალი სიზუსტის გრავიმეტრიული აპარატურის შექმნის მიზნით, მეორე მხრივ.

დედამიწის ხელოვნური თანამგზავრების შექმნასთან დაკავშირებით წარმოიშვა დიდი შესაძლებლობა დედამიწის გლობალური ველის შესწავლისა. ამ მონაცემებს დიდი მნიშვნელობა აქვს გეოდის ფორმისა და დედამიწის შინაგანი აგებულების დადგენისათვის. [53;66]

ამგვარად, გრავიმეტრიას ენიჭება უმნიშვნელოვანესი როლი გეოდეზიისა და გეოლოგიის პრობლემების შესწავლის საქმეში. გარდა ამისა საკუთრივ გრავიმეტრიის დარგში მიმდინარე ინტენსიური მუშაობა რეალურს ხდის ახალი აღმოჩენების პერსპექტივებს. [79]

1.2. გრავიმეტრიის განვითარება საქართველოში

თბილისი წარმოადგენს ერთ-ერთ უძველეს გეოფიზიკურ ცენტრს მსოფლიოში. 1844 წელს აქ დაარსდა ფიზიკური (1926 წლიდან-გეოფიზიკური) ობსერვატორია, სადაც თავდაპირველად ორგანიზებულ იქნა მაგნიტური და მეტეოროლოგიური დაკვირვებები. გარდა ამისა სპორადულად მიმდინარეობდა დაკვირვებები სხვა გეოფიზიკურ ელემენტებზეც მაგალითად, 1829-1833 წლებში ფ. პაროტმა პირველად გაზომა საქართველოში სიმძიმის ძალის მნიშვნელობა საქანიანი აპარატით. 1879-1893 წლებში ი.სტებნიცკიმ და პ.კულბერგმა რეფსოლდის საქანიანი ხელსაწყოს საშუალებით ჩაატარეს სიმძიმის ძალის აბსოლიტური გაზომვები ვლადიკავკასში, ბათუმში, გუდაურსა და ღუშეთში და განსაზღვრეს შვეული ხაზის გადახრა თბილისი-ვლადიკავკასის მიმართულებაზე.

ი. სტებნუცკიმ გამოიყენა ეს მონაცემები კავკასიონის ამ განედზე დედამიწის ქერქის აგებულების შესახებ წარმოდგენის შესამუშავებლად, რაც დღემდე ძალაშია.

XX საუკუნის დასაწყისიდან სიმძიმის ძალის ფარდობითი გაზომვები საქართველოში შტერნეკის ტიპის საქანიანი ხელსაწყოებით წარმოებდა. საყრდენ პუნქტად კავკასიონის რეგიონისათვის შერჩეულ იქნა ფიზიკური ობსერვატორიის ახლად დაარსებული (1899წ.) სეისმოლოგიური განყოფილების სარდაფი. ეს პუნქტი, რომელიც დღემდე შემონახულია, დაკავშირებულია პოტსდამის საერთაშორისო საყრდენ პუნქტთან ერთხელ უშუალოდ და მრავალჯერ პულკოვოს, მოსკოვის, პოლტავის და ყაზანის ძირითადი საყრდენი პუნქტების მეშვეობით. პროფესორმა პარიისკიმ, 1949 წელს ეს გაზომვები გაათანაბრა უმცირეს კვადრატთა მეთოდით და დაადგინა თბილისის პუნქტში სიმძიმის ძალის ყველაზე ალბათური მნიშვნელობა პოტსდამის მიმართ. [12; 27; 40; 51]

საქართველოში გრავიმეტრულ გაზომვებს სისტემატიური ხასიათი მიეცა ოცდაათიანი წლების დასაწყისიდან და მან სახელმწიფო მნიშვნელობა მოიპოვა. თავდპირველად ამ საქმეში ჩაება მოსკოვისა და ლენინგრადის ასტრონომიული, გეოდეზიური და გეოფიზიკური ორგანიზაციები. საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის გეოფიზიკის ინსტიტუტი, რომელიც დაარსდა 1933 წელს სსრკ მეცნიერებათა აკადემიის საქართველოს ფილიალის სისტემაში. მონაწილეობდა საქართველოს ტერიტორიის გრავიმეტრიულ აგეგმვაში 1935 წლიდან (ნ.პარიისკი, ა. ბულანჟე, მ. აბაკელია და ვ. ჯიქია). ამ სახის ძველი და ახალი მონაცემების საფუძველზე შედგა საქართველოს და კავკასიის გრავიმეტრიული რუკები, რომლებიც გამოყენებულ იქნა გეოლოგიური და გეოდეზიური პრობლემების შესასწავლად.

1934 წლიდან იწყებს განვითარებას ვარიაციული გრავიმეტრია სასარგებლო ნამარხთა (ნავთობის, ნახშირის) ძებნა-ძიების მიზნით. ამ გამოკვლევებს თან სდევდა სიმძიმის ძალის პოტენციალის მეორე რიგის წარმოებულების პირდაპირი და შებრუნებული ამოცანების ამოხსნა, მეთოდური საკითხების დამუშავება და სხვა. (ბ.ბალავაძე, ვ. ჯიქია). [13; 68; 83; 96]

გრავიმეტრების პრაქტიკაში დანერგვამ კიდევ უფრო გააფართოვა ექსპერიმენტული და თეორიული გამოკვლევები. გრავიმეტრიულმა აგეგმვამ მოიცვა მთელი კავკასია და შავი ზღვის აკვატორიუმი. ამ მონაცემებით შედგენილი რუკების საფუძველზე ჩატარდა დედამიწის ქერქის აგებულების

შესწავლა ხსენებულ რეგიონზე და დამუშავდა სიმძიმის ძალის ანომალიის ოდენობითი ონტერპრეტაციის მეთოდი (ბ.ბალავაძე, გ.შენგელია, კ.მ. ქართველიშვილი ვ. აბაშიძე, პ. მინდელი). [1; 19; 25]

დიდი ყურადღება დაეთმო სიმძიმის ძალის ანომალიის სიმაღლეზე გადათვლისა და პოტენციალის მაღალი რიგის წარმოებულების გამოთვლას, რასაც მნიშვნელოვნად შეუწყო ხელი საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის გამოთვლითი მათემატიკის ინსტიტუტის დაინტერესებასაც აღნიშნული პრობლემით (ა.ალექსიძე, კ.მ.ქართველიშვილი, პ. მინდელი და სხვები).

XX საუკუნის 60-იანი წლებიდან გეოფიზიკის ინსტიტუტში საფუძველი ჩაეყარა სიმძიმის ძალის პერიოდული და საუკუნოვანი ვარიაციების შესწავლას (ბ. ბალავაძე, კ.ზ. ქართველიშვილი, ვ.აბაშიძე). დედამიწის შინაგანი აგებულებისა და ქერქის ვერტიკალური მოძრაობის გამოკვლევის ამ მიმართულებებს კარგი სამეცნიერო ბაზა – მიწისქვეშა ლაბორატორია გააჩნია, რომელიც ერთხანს წარმოადგენდა ყოფილი დემოკრატიული ქვეყნების საერთაშორისო ცენტრს დახრის ზომათა მონაცემების უნიფიკაციის დარგში. ამ მეთოდებით აგრეთვე ფართოდ შეისწავლებოდა დედამიწის ქერქის თანამედროვე მოძრაობა ენგურჰესის კაშხლის მშენებლობის რაიონში, რასაც დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს წყალსაცავის უშიშარი ექსპლუატაციისათვის.

ძიების გრავიმეტრიული მეთოდი წარმატებით გამოიყენება აგრეთვე «საქნავთბეოფიზიკის» ტრესტისა და გეოლოგიური სამმართველოს გეოფიზიკური ექსპედიციის მიერ, რომელთა მიზანია სასარგებლო ნამარხთა ძებნა-ძიება. გრავიმეტრიის დარგში კადრებს ამზადებს თსუ ფიზიკის ფაკულტეტის გეოფიზიკის კათედრა და გეოგრაფია – გეოლოგიის ფაკულტეტის ძიების გეოფიზიკური მეთოდების კათედრა. [4]

1.3. გრავიმეტრიულ გაზომვათა საფუძვლები და პირველი აპარატები

გრავიმეტრიის ძირითადი ცნებები ჩამოყალიბდა ჯერ კიდევ მაშინ, როცა მისი გაზომვითი მხარე სრულებით არ იყო განვითარებული. გრავიმეტრიის როგორც მეცნიერების საწყისად ითვლება გალილეო გალილეის (1554-1642 წ.)

მიერ თავისუფლად ვარდნილ სხეულზე წარმოებული ცდები და ისააკ ნიუტონის მიერ (1643-1727 წწ.) მსოფლიო მიზიდულობის კანონის აღმოჩენა.

აღსანიშნავია, რომ გრავიმეტრიაში სიმძიმის ძალის აჩქარების ერთეულად მიღებულია «გალი». ეს სახელწოდება მას მიეცა გალილეის პატივსაცემად, რომელმაც პირველმა გაზომა იგი. [8]

გალი ეს არის აჩქარება, რომელსაც ანიჭებს 1 გრამი მასის მქონე სხეულს 1 დინი ძალა. პრაქტიკაში ხმარებისათვის უფრო მოსახერხებელია გალის მეათასედი ნაწილი (10^{-3} გალი), რომელსაც მილიგალი ეწოდება. თუმცა უკანასკნელ დროს გაზომვის სიზუსტე იმდენად გაიზარდა, რომ საჭირო გახდა მოკროგალის (10^{-6} გალი) ცნების შემოღება.

სიმძიმის ძალის აჩქარების განსაზღვრის მიზნით გალილეიმ ისარგებლა მის მიერვე აღმოჩენილი თავისუფლად ვარდნილი სხეულის მოძრაობის კანონით

$$S = \frac{1}{2}gt^2$$

სადაც S – სხეულის მიერ t – დროის განმავლობაში თავისუფალი ვარდნით გავლილი მანძილია, ხოლო g – სიმძიმის ძალის აჩქარება, რომელსაც ეს სხეული მოიპოვებს გრავიტაციულ ველში. გალილეის ეს ექსპერიმენტი არ იყო ზუსტი, რადგან იმდროინდელი ტექნიკა არ იძლეოდა საშუალებას S და t სიდიდეების საჭირო სიზუსტით გაზომვისა. ამ სიდიდეების გაზომვის სიზუსტეითა დადგენისთვის ეს ფორმულა ჯერ გავალოგარიტმით და შემდეგ გავადიფერენციალთ. მივიღეთ:

$$\frac{dS}{S} = \frac{dg}{g} + 2\frac{dt}{t}$$

საიდანაც ნათელია, რომ ფარდობითი სიზუსტე დროის განსაზღვრისა უნდა იყოს ორჯერ მაღალი, ვიდრე სიმძიმის ძალის აჩქარებისა. სახელდობრ, თუ მოითხოვება გაიზომოს სიმძიმის ძალა 0,1 მგლ. სიზუსტით, მაშინ თავისუფლად ვარდნილი სხეულის მიერ გავლილი 1მ გზა უნდა გაიზომოს 0,1 მიკრონის და დრო კი 05×10^{-8} წმ. სიზუსტით. გაზომვის ასეთი მაღალი სიზუსტეები მიღწეულია მხოლოდ ამ ბოლო დროს, ე. წ. ბალისტიკური გრავიმეტრიის საშუალებით. [12]

ნიუტონის თანამედროვემ ჰოლანდიელმა მეცნიერმა ჰიუგენსმა 1673 წელს აღმოაჩინა მიახლოებითი დამოკიდებულება საქანის პერიოდისა (T), მის სიგრძესა (l) და სიმძიმის ძალის აჩქარებას (g) შორის. მას აქვს სახე:

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

ამ გამოსახულებაში 2π –ს ნაცვლად აღებულია π , რადგან გრავიმეტრიაში განიხილება ნახევარი პერიოდი, რომელსაც პირობითად პერიოდს უწოდებენ. [4; 99; 103]

აღინშნული დამოკიდებულება T –სა და l –ს შორის საფუძვლად დაედო სიმძიმის ძალის აჩქარების გაზომვას საქანიანი ხელსაწყოებით, რომლებმაც დროთა განმავლობაში განიცადეს მნიშვნელოვანი განვითარება. პირველი საქანები, რომლებითაც სარგებლობდნენ გამოჩენილი მეცნიერები: ბორდა, კასინი, ბესელი, ლაკონდამინი და სხვები, თუმცა კონსტრუქციულად მათემატიკურ საქანს უახლოვდებოდნენ, მაინც არსებითად ფიზიკურ საქანს წარმოადგენდნენ. ამ დროს ფიზიკური საქანის სრული თეორია უკვე დამუშავებული იყო ცნობილი მათემატიკოსების იაკობ, ივანე და დანიელ ბერნულების მიერ, მაგრამ ფიზიკური საქანის აგებამ თითქმის მთელი საუკუნით დაიგვიანა. მხოლოდ XIX ს-ის დასაწყისში ერთდროულად რამდენიმე მეცნიერის მიერ იქნა წამოყენებული მოსაბრუნებელი საქანის იდეა რხევისათვის ორი დასაკიდით.

ინგლისელი ფიზიკოსის კეტერის მიერ გამოგონებული პირველი ასეთი საქანი აგებული იქნა 1818 წელს.

XIX საუკუნის II ნახევარში ცნობილმა მექანიკოსმა რეფსოლდმა ააგო მნიშვნელოვნად გაუმჯობესებული მოსაბრუნებელი საქანიანი ხელსაწყო. ერთ-ერთი ასეთი საქანი შეიძინა რუსეთის მეცნიერებათა აკადემიამ, რომელსაც ფართოდ იყენებდა კავკასიაში ეს იყო პერიოდი როცა მთელ მსოფლიოში ფეხს იკიდებდა სიმძიმის ძალის აჩქარების, ანუ როგორც გრავიმეტრიაშია მიღებული სიმძიმის ძალის განსაზღვრის აბსოლუტური და ფარდობითი მეთოდები. როცა უშუალოდ იზომება სიმძიმის ძალის აჩქარების სრული მნიშვნელობა მას გაზომვის აბსოლუტური მეთოდი ჰქვია. ხოლო როცა იზომება სიმძიმის ძალის

აჩქარების ნაზრდი, რომელიდაც საყრდენი, გამოსავალი პუნქტის მიმართ, მაშინ მას გაზომვის ფარდობით მეთოდს უწოდებენ. [9]

უნდა აღინიშნოს, რომ საქანიანი ხელსაწყოებით დაკვირვება საერთოდ რთულია და მაღალ კვალიფიკაციას მოითხოვს დამკვირვებლისაგან. საკუთრივ ხელსაწყოს მასაც 100 კგ-ს აღწევს; გარდა ამისა საჭიროა ზუსტი ქრონომეტრი, რადიომიმღები, ფსიქრომეტრი, აკუმულატორები და სხვა წვრილმანი მოწყობილობა. ამიტომ დღის წესრიგში დადგა შედარებით მარტივი და სავლე პირობებში ადვილად სამომრად გრავიმეტრების შექმნის აუცილებლობა. და მართლაც შეიქმნა კიდევ გრეხითი სასწორის პრინციპზე მომუშავე სავლე გრავიმეტრები, რომლებიც სულ რამდენიმე ერთეულ კილოგრამს იწონიან და მეტად მოხერხებულია გაზომვების ჩასატარებლად. არსებობს მცირე დიაპაზონის მქონე კვარცის ასტაზირებული გრავიმეტრების, სიზუსტის მხრივ თანდათანობით გაუმჯობესებული, სხვადასხვა მდიფიკაცია როგორც უცხოეთში ასევე საქართველოში. ეს გრავიმეტრებია: რუსული წარმოების ГАК-3М¹, ГАК-4М, ГАК-7Т, ГНУ-К1², ГНУ-К2, ამერიკული «უორდენი», «ლა-კოსტე რომბერგი», «უესტერნი», «ჩრდილო ამერიკა», კანადური «შარპი» და სხვა. ამ გრავიმეტრების დრეკადი სისტემა დამზადებულია გადამდნარი სუფთა კვარცისაგან. ხელსაწყოზე ანათვალი აიღება მას შემდეგ, როცა კვარცის ზამბარების დრეკადობის ძალა გაწონასწორდება გასაზომი სიმძიმის ძალით. ამიტომ ჰქვია ამ ხელსაწყოებს სტატიკური გრავიმეტრები. მათი კონსტრუქცია ისეთია, რომ უზრუნველყოფს ხელსაწყოს ჰერმეტიზებას და თბოიზოლაციას. ამ ხელსაწყოებით იზომება სიმძიმის ძალის ნაზრდი (მგრ) გამოსავალი (საყრდენი) პუნქტის მიმართ, ამიტომ გაზომვის ეს მეთოდი ფარდობითია. [13]

¹ ГАК-3М – Гравиметр астазированной кварцевый, модель 3

² ГНУ-К1 – Гравиметр наземный узкодиапазонный, класс 1

1.4. გრავიმეტრიის პირდაპირი და შებრუნებული ამოცანები

სიმძიმის ძალის ანომალიის გეოლოგიური ინტერპრეტაციის საკითხს მივყავართ გრავიმეტრიის პირდაპირი და შებრუნებული ამოცანების განხილვამდე.

პირდაპირი ამოცანა მდგომარეობს იმაში, რომ მოცემულია ანომალური მასა (მისი ფორმა, სიდიდე, ჩაწოლის სიღრმე, სიმკვრივე და საჭიროა ვიპოვიოთ მის მიერ გამოწვეული გრავიტაციული ველი. პირდაპირი ამოცანა ცალსახად ამოიხსნება. ე.ი. არ არსებობს ორი ან მეტი ერთმანეთთან განსხვავებული ველი, რომელსაც ქმნიდეს მასა რომელიმე სისტემაში. პირდაპირი ამოცანის ამოხსნასთან დაკავშირებული გამოთვლები ადვილად სრულდება ზოგიერთი მარტივი იზოგომეტრიული ფორმისა და ერთგვაროვანი სიმკვრივის მქონე სხეულებისათვის. რთული ფორმის სხეულების შემთხვევაში მიმართავენ მათ დაშლას მარტივი ფორმის სხეულებად და აწარმოებენ ჯამური ეფექტის გამოთვლას. [52; 96; 98]

შებრუნებული ამოცანა გულსხმობს, რომ მოცემულია გრავიტაციული ველი და უნდა განვსაზღვროთ მისი გამომწვევი გეოლოგიური ფაქტორი. ამ ამოცანას კი საზოგადოდ ცალსახა ამოხსნა არა აქვს. ე.ი. ამოცანა არაკორექტულია ე.ი. მუდამ შეიძლება წარმოვადგინოთ ანომალური მასის სხვადასხვა განაწილება, რომელსაც ერთი და იგივე გრავიტაციული ველი შეესაბამება. მაგრამ ამ ამოხსნებიდან გეოლოგიურად გამართულია და მისაღები მხოლოდ ერთი მათგანი, რომლის პოვნა შესაძლებელია თუ მკვლევარს მოეპოვება სხვა (გეოფიზიკური და გეოლოგიური) მონაცემებიც, რომლებიც გარკვეულ წარმოდგენას იძლევიან სხეულის ფორმასა, ჩაწოლის სიღრმესა და სიმკვრივეზე.

გრავიმეტრიის შებრუნებული ამოცანის ამოხსნას სხვაგვარად სიმძიმის ძალის პოტენციალის პირველი (Δg), მეორე (U_{xz}, U_{yz}, \dots) ან უფრო მაღალი რიგის წარმოებულების ანომალიის გეოლოგიური ინტერპრეტაცია ეწოდება. ინტერპრეტაციის ხერხი ორგვარია: შერჩევის და ანალიზური.

პირველი მათგანი მდგომარეობს ანომალური სხეულის ფორმის, სიღრმის (ან როგორც ხშირად ამბობენ სხეულის ჩაწოლის ელემენტებისა და ჭარბი სიმკვრივის სათანადოდ შერჩევაში. შერჩევა (ე. ი. მოდელის დაზუსტება)

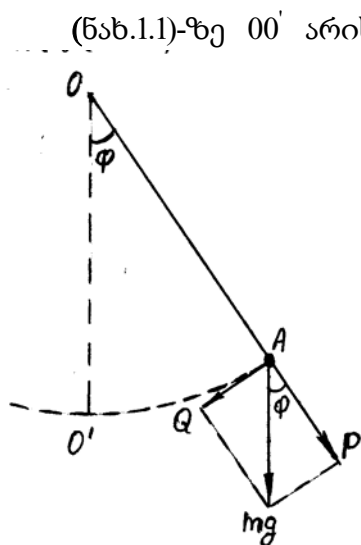
გრძელდება მანამ სანამ გამოთვლილი გრავიტაციული მრუდი დამაკმაყოფილებლად არ დაემთხვევა დანაკვირვებს.

მეორე ხერხის ძირითად თავისებურებას წარმოადგენს გრავიტაციული მრუდის მახასიათებელი წერტილების კოორდინატების გამოყენება ანომალური სხეულის ჩაწოლის ელემენტებისა და სიმკვრივის გამოსავლენად. სიზუსტე ამ ხერხისა დამოკიდებულია იმაზე თუ რამდენად თავისუფალია დანაკვირვები მრუდი რელიევის ან ზედაპირული მასების არაერთგვაროვნების გავლენისაგან. [2]

1.5. ქანქარის რხევის თეორია

როგორც ცნობილია, ფიზიკაში, საქანის ქვეშ იგულისხმება მყარი სხეული, რომელსაც სიმძიმის ძალის მოქმედებით შეუძლია შეასრულოს რხევითი მოძრაობა უძრავი წერტილის ან ღერძის მიმართ. განასხვავებენ მათემატიკურ და ფიზიკურ საქანებს.

მათემატიკური საქანი ეწოდება უწონო და უჭიმად ძაფზე დაკიდებულ წერტილოვანი m – მასის მქონე ტვირთს, რომელსაც თავისუფლად შეუძლია რხევა O – დაკიდების წერტილის ირგვლივ (ნახ. 1.1).



ნახ.1.1. მათემატიკური საქანი

მდგენელად, რომელთაგან ერთი AP –ემთხვევა OA –ს გაგრძელებას, ხოლო მეორე AQ მისი მართობულია ე.ი. ემთხვევა AO' – რკალის

(ნახ.1.1)-ზე OO' არის შვეულის მიმართულება და იგი შეესაბამება საქანის წონასწო რობის მდგომარეობას. თუ საქანი ირხევა თავისი წონასწორობის ირგვლივ, მაშინ ცხადია დროის რომელიმე მომენტში იგი იქნება გადახრილი OO' -დან φ კუთხით, რომელსაც საქანის გადახრის, ანუ ელონგაციის კუთხე ეწოდება.

A – წერტილში მოთავსებულ m – მასის მქონე სხეულზე მოქმედებს სიმძიმის ძალა, რომელიც mg -ს ტოლია და მიმართულია ქვემოთ OO' -ის პარალელურად. დავშალოთ ეს ძალა ისეთ ორ

მხებს A – წერტილში და მიმართულია მოძრაობის მხარეს. AQ – ნდგენელის მოქმედება გაწონასწორებულია ძაფის დრეკადობის ძალით, ხოლო AQ – მდგენელი ცდილობს დააბრუნოს საქანი წონასწორობის მდებარეობაში და მოძრაობას აჩქარებს, რომელიც ტოლია:

$$a = \frac{AQ}{m} \quad (1.1)$$

სადაც AQ – არის mg – ძალის მდგენელი ძალა, რომელიც საქანს აბრუნებს წონასწორობისკენ, (ნახ. 1.1) –დან ცხადია, რომ

$$\frac{AQ}{mg} = \sin \varphi \quad \text{აქედან}$$

$$\frac{AQ}{m} = g \sin \varphi$$

$$\text{მაშინ (1.1) ფორმულა მიიღებს სახეს: } a = g \sin \varphi \quad (1.2)$$

მეორეს მხრივ, რადგან φ ჩვეულებრივ მცირე კუთხეა, ამიტომ იმავე ნახაზიდან ვღებულობთ:

$$\overset{\cup}{AO'} = l \sin \varphi = l\varphi \quad (\text{რადგან მცირე კუთხეებისთვის } \sin \varphi \approx \varphi)$$

როგორც ვიცით რკალზე მოძრავი სხეულის კუთხური აჩქარება ტოლია

$\varepsilon = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$ ხოლო კავშირს კუთხურ და ტანგენციალურ აჩქარებებს შორის აქვს

სახე:

$$a_\tau = \varepsilon r$$

სადაც r ბრუნვის რადიუსია.

მაშინ ვღებულობთ:

$$a_\tau = \frac{d^2\varphi}{dt^2} \cdot r$$

ჩვენი შემთხვევისათვის გვექნება:

$$a_\tau = -l \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} \quad (1.3)$$

სადაც ნიშანი მინუსი იმის მაჩვენებელია, რომ AQ – ძალა ამცირებს საქანის ენოლგაციის კუთხეს. (1.3) და (1.2) ფორმულებით გამოთვლილი აჩქარებები ერთმანეთის ტოლია და ამიტომ ვწერთ:

$$-l \frac{d^2\varphi}{dt^2} = g \sin \varphi$$

$$\text{ანუ} \quad \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{g}{l} \sin \varphi = 0 \quad (1.4)$$

(1.4) გამოსახავს მათემატიკური საქანის რხევის მეორე რიგის დიფერენციალურ განტოლებას უწინააღმდეგო არეში. ამ განტოლებიდან შეიძლება განვსაზღვროთ საქანის რხევის პერიოდი T . ე.ი. დრო, რომელიც დასჭირდება საქანს ერთი უკიდურესი მდებარეობიდან მეორე უკიდურეს მდებარეობაში გადასანაცვლებლად. (1.4) დიფერენციალური განტოლების ამოხსნიდან ვრწმუნდებით, რომ T -ს გამოსახულება ასეთია:

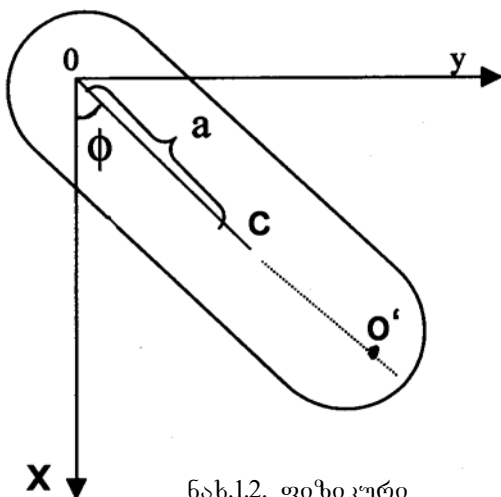
$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left[1 + \left(\frac{l}{2}\right)^2 \sin^2 \frac{a}{2} + \left(\frac{l \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 \sin^4 \frac{a}{2} + \left(\frac{l \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)^2 \sin^6 \frac{a}{2} + \dots \right] \quad (1.5)$$

სადაც a - საქანის მაქსიმალური გადახრის კუთხეა ($|\varphi| \leq a$), რომელსაც რხევის ამპლიტუდა ეწოდება. l - საქანის სიგრძეა.

თუ რხევის ამპლიტუდა ძალიან მცირეა მაშინ (1.4) გამოსახულება მარტივდება და ღებულობს სახეს:

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (1.6)$$

უნდა აღინიშნოს, რომ მათემატიკური საქანი, რომელიც დააკმაყოფილებს მის მიმართ წაყენებულ ყველა მოთხოვნას პრაქტიკულად განუხორციელებელია, რადგან ფაქტიურად საქანი ყველა ფიზიკურია, რომელიც უსასრულოდ მრავალი



ნახ.12. ფიზიკური საქანი

ერთი საკიდის მქონე მათემატიკური საქანების ერთობლიობას წარმოადგენს. მისი სგრძე შეესაბამება ისეთი მათემატიკური საქანების სიგრძეს, რომლის რხევის პერიოდი ფიზიკური საქანის რხევის პერიოდის ტოლია.

გამოვიყვანოთ ფიზიკური საქანის რხევის განტოლება. ამისათვის ავირჩიოთ

მართკუთხა კოორდინატა სისტემა, რომლის ცენტრი 0 საქანის დაკიდების წერტილში მოვათავსოთ. OX – ღერძი მივმართოთ შვეულის გასწვრივ. Oy–ღერძი კი ჰორიზონტალურად საქანის რხევის სიბრტყეში (იხ. ნახ. 1.2) მექანიკიდან ცნობილია, რომ მყარი სხეულის რხევის განტოლება უძრავი ღერძის ირგვლივ ასე გამოისახება:

$$I \cdot \frac{d\omega}{dt} = P_x$$

სადაც I – სხეულის ინერციის მომენტია ბრუნვის ღერძის მიმართ, ω – ბრუნვის კუთხური სიჩქარეა, P_x -არის OX–ღერძის მიმართ მოქმედ ძალთა მომენტი.

ვთქვათ φ –არის საქანის ელონგაციის კუთხე შედგენილი OX- ღერძთან, c - საქანის სიმძიმის ცენტრია და OC=a. თუ საქანის მასას ავღნიშნავთ M-ით, მაშინ საქანზე მოქმედ ძალთა მომენტი P–ტოლ იქნება:

$$P = mg \sin \varphi \quad (1.7)$$

რადგან ω –კუთხური სიჩქარეა, ამიტომ თანახმად აღნიშვნისა ვღებულობთ:

$$\omega = -\frac{d\varphi}{dt} \quad \text{და} \quad \frac{d\omega}{dt} = -\frac{d^2\varphi}{dt^2} \quad (1.8)$$

(1.7) და (1.8) გამოსახულებები შევიტანოთ (1.6) ფორმულაში მივიღებთ:

$$-I \frac{d^2\varphi}{dt^2} = Mg \sin \varphi$$

$$\text{ანუ} \quad \frac{d^2\varphi}{dt^2} = -\frac{g}{\frac{I}{Ma}} \sin \varphi \quad (1.9)$$

ადვილად დავრწმუნდებით, რომ (1.9) განტოლება ეთანადება (1.4) განტოლებას თუ მივიღებთ რომ

$$\frac{I}{Ma} = l \quad (1.10)$$

$\frac{I}{Ma}$ - სიდიდე მუდმივია მოცემული ფიზიკური საქანისათვის, ისევე როგორც l -მუდმივია მათემატიკური საქანისათვის. ფიზიკური საქანისათვის l -სიდიდეს საქანის დაყვანილი სიგრძე ეწოდება.

გადავზომოთ დაყვანილი სიგრძე OC -მიმართულებაზე და მივიღებთ O' -წერტილს, რომელსაც რხევის ცენტრი ეწოდება. ფიზიკური საქანი შეიძლება შევცვალოთ ისეთი მათემატიკური საქანით, რომლის სიგრძე უდრის ფიზიკური საქანის $OO'=l$ დაყვანილ სიგრძეს, ხოლო მთელი მისი მასა O' -წერტილშია თავმოყრილი.

თეორიული მექანიკიდან ცნობილია, რომ თუ I_0 -არის ფიზიკური საქანის ინერციის მომენტი მისი სიმძიმის C -ცენტრში გავლებული ღერძის მიმართ, რომელიც რხევის სიბრტყის მართობულია, მაშინ

$$I = I_0 + a^2 M$$

შევიტანოთ ეს გამოსახულება (1.10) –ფორმულაში და მივიღებთ:

$$l = \frac{I_0}{aM} + a \quad (1.11)$$

ეს ფორმულა საშუალებას გვაძლევს გავარკვიოთ მოსბრუნებელი საქანის თვისებები. მართლაც, ვთქვათ საქანს ვარხევთ არა O -წერტილში, არამედ O' -წერტილში გავლებული ღერძის მიმართ. ეს ღერძები ურთიერთპარალელურია საქანის შესაბამისი დაყვანილი სიგრძე იყოს l , ხოლო პერიოდი T , მაშინ (1.11) – ფორმულის თანახმად, რადგან $O'C=l-a$ (იხ. ნახ. 1.2), გვექნება:

$$l' = \frac{I_0}{(l-a)M} + (l-a)$$

(1.11)-ფორმულიდან განვსაზღვროთ $(l-a)$ -გამოსახულება და შევიტანოთ იგი უკანასკნელ ტოლობაში. მივიღებთ:

$$l' = \frac{I_0}{aM} + a$$

ამრიგად, გამოდის რომ $l=l'$ და ამიტომ $T=T'$. ამ თვისების გამო O და O' -წერტილებს, რომელთა შორის მანძილი ფიზიკური საქანის დაყვანილ სიგრძეს უდრის, შეუღლებული წერტილები ეწოდება. სწორედ ეს თვისება იძლევა საშუალებას ავაგოთ მოსბრუნებელი საქანი ე.ი. ისეთი საქანი, რომელსაც ორი O და O' დასაკიდი წერტილი აქვს. [4]

1.6. საქანი – გნოსეოლოგიური ხელსაწყო

სიმძიმის ძალის გაზომვისათვის ყველაზე მოხერხებული ინსტრუმენტი აღმოჩნდა საქანი. ცნობილმა რუსმა ასტრონომმა ა. სლუდსკიმ საქანს უწოდა გნოსეოლოგიური, ე.ი. შემეცნებითი, და სინმდვილეშიც, ამ ხელსაწყომ საშუალობა მოგვცა შეგვესწავლა ბევრი ფიზიკური მოვლენა, პირველ ყოვლისა, რხევითი პროცესი, დრო და მისი ცვლილება და ბოლოს კი სიმძიმის ძალა. ჩვენ ამჯერად სწორედ ეს უკანასკნელი გვაინტერესებს.

რხევად საქანს გააჩნია შესანიშნავი თვისებები. პირველი საქანის რხევის პერიოდი დაკავშირებულია სიმძიმის ძალასთან უმარტივესი დამოკიდებულებით. ამ დამოკიდებულებას პირველი მიახლოებით გააჩნია შემდეგი სახე:

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

მაშასადამე, თუ გავზომავთ საქანის რხევის T -პერიოდს და მის l -სიგრძეს, შეიძლება განვსაზღვროთ სიმძიმის ძალის g -აბსოლიტური მნიშვნელობა:

$$g = \frac{\pi^2 l}{T^2}$$

მეორე თვისება ისაა, რომ რხევადი საქანი ფლობს იზოქრონულობის თვისებებს. ე.ი. მისი პერიოდი ყოველთვის მუდმივია და დამოკიდებულია მხოლოდ საქანის სიგრძეზე და სიმძიმის ძალის განსაზღვრის ადგილზე.

ეს თვისება მეტად ხელსაყრელია g -ს განსაზღვრის სიზუსტის ამაღლებისათვის. თუ ჩვენ გვსურს გავზომოთ სიმძიმის ძალა მემილიონედი ნაწილის სიზუსტით, მაშინ ასეთივე სიზუსტით უნდა განისაზღვროს საქანის პერიოდი და სიგრძე. ცხადია პერიოდის გაზომვა წამის მემილიონედი სიზუსტით არც თუ იოლი საქმეა, მაგრამ აქ ძლიერ გვეხმარება საქანის იზოქრონულობის თვისება. [53; 105]

ერთი პერიოდის ნაცვლად შეიძლება გავზომოთ, მაგალითად, საქანის 10000 რხევის ინტერვალი. მაშინ, იმისათვის, რომ განვსაზღვროთ ერთი რხევა 10^{-6} სიზუსტით, საკმარისია ეს ინტერვალი გაიზომოს 10^4 -ჯერ უხეშად ე.ი. წამის მესამედი სიზუსტით. ერთი რხევის პერიოდს მივიღებთ თუ მთელ ამ ინტერვალს გავყოფთ რხევათა რიცხვზე; ამასთან მიღწეული იქნება საჭირო სიზუსტე.

გვრჩება საქანის სიგრძის 10^{-6} რიგის სიზუსტემდე გაზომვის სიძნელე, რომელიც კიდევ უფრო იზრდება იმითაც, რომ ფიზიკური საქანისათვის რთულდება სიგრძის ცნება. მხოლოდ იდიალიზებულ მათემატიკურ საქანში სიგრძე განისაზღვრება როგორც მანძილი დაკიდების წერტილიდან წერტილოვან მასამდე, რომელიც უწონადი ძაფის ბოლოზეა მიმაგრებული. ნებისმიერ რეალურ ფიზიკურ საქანში სიგრძის როლს თამაშობს ე.წ. დაყვანილი სიგრძე, რომელიც ტოლია დაკიდების ღერძის მიმართ სხეულის ინერციის მომენტის (I_0) შეფარდებისა მასისა და ამ ღერძიდან მასების ცენტრამდე მანძილის ნამრავლთან (aM)

$$\text{ე.ი. } l = \frac{I_0}{aM}$$

ცხადია, რომ სიგრძის მემილიონედი ნაწილის სიზუსტით გაზომვა პრაქტიკულად ძალიან ძნელია. დამხმარედ გვევლინება საქანის შესანიშნავი თვისება – ნებისმიერ საქანში რხევის შეუღლებული ცენტრების არსებობა, რომლებიც მასების ცენტრის საწინააღმდეგო მხარესაა განლაგებული. თუ ამ ცენტრებს მივიღებთ რხევის ღერძადად, მაშინ რხევის პერიოდები ამა თუ ცენტრის გარშემო იქნება თანატოლი, მაშასადამე, თუ საქანის შიგნით ვიპოვოთ წერტილებს, რომელთა გარშემო რხევის პერიოდები ტოლია, მაშინ ამ წერტილთა შორის მანძილი იქნება საქანის სიგრძე.

ეს თვისება საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ ფიზიკური საქანის სიგრძე, მაგრამ საჭირო სიზუსტის მიღწევაში მაინც ვერ გვიწვევს სათანადო დახმარებას. ამიტომ სიმძიმის ძალის აბსოლიტური მნიშვნელობის განსაზღვრა საქანის საშუალებით პრაქტიკულად ისევე ძნელია როგორც თავისუფალ ვარდნაზე დაკვირვებით. მიუხედავად ამისა ამ პრინციპზე აგებულ იქნა მოსაბრუნებელი საქანი და განსაზღვრული იქნა სიმძიმის ძალის მნიშვნელობა მრავალ სხვადასხვა პუნქტში.

საქანი საშუალებას გვაძლევს ადვილად განვსაზღვროდ სიმძიმის ძალის ფარდობითი მნიშვნელობა. ე.ი. განვსაზღვროთ მოცემულ პერიოდში არა სიმძიმის ძალის მნიშვნელობა, არამედ სიმძიმის ძალის სხვაობა ორი წერტილისათვის, რომლებშიაც წარმოებს გაზომვა. ამისათვის სამარისია განვსაზღვროთ ერთი და

იგივე საქანის პერიოდი ორი გამოსაკვლევი წერტილისათვის და ამ დროს მიღებული განტოლებებიდან გამოვრიცხოთ უცვლელი სიგრძე l .

დავწეროთ საქანის რხევის პერიოდის ფორმულები ორი წერტილისათვის:

$$T_1 = \pi \sqrt{\frac{l}{g_1}} \quad \text{და} \quad T_2 = \pi \sqrt{\frac{l}{g_2}}$$

ამ პერიოდთა შეფარდება მოგვცემს სიმძიმის ძალის და პერიოდის დამაკავშირებელ დამოკიდებულებას:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{g_2}{g_1}$$

საიდანაც

$$g_2 = g_1 \frac{T_1^2}{T_2^2}$$

ამ უკანასკნელი ფორმულის საშუალებით ადვილია გნვსაზღვროთ სიმძიმის ძალის მნიშვნელობა ნებისმიერ წერტილში, თუ გვეცოდინება ამავე წერტილში T_2 და გამოსავალ წერტილში g_1 და T_1 მნიშვნელობები. ამ მეთოდში მნიშვნელოვანია შევინარჩუნოთ საქანის სიგრძის უცვლელობა, მაგრამ სრულადაც არ მოგვეთხოვება მისი გაზომვა.

1.7. მოსაბრუნებელსაქანიანი აპარატები

1.7.1. კეტერის აპარატი

სიმძიმის ძალის აბსოლიტური მნიშვნელობის განსაზღვრა ძალიან მოხერხებული აღმოჩნდა ე.წ. მოსაბრუნებელი საქანით, რომელსაც ორი დასაკიდი აქვს შეუღლების წერტილებში. მანძილი ამ წერტილს შორის წარმოადგენს საქანის დაყვანილ სიგრძეს (l) და იგი უშუალოდ გაზომვით განისაზღვრება, ხოლო რხევის პერიოდი T განისაზღვრება ორივე საკიდი წერტილის ირგვლივ რიგრიგობით რხევით. ამგვარად, ვიცით რა l და T სიდიდეები მოცემულ პუნქტში შეგვიძლია გამოვთვალოთ სიმძიმის ძალის აბსოლიტური მნიშვნელობა ცნობილი (1.5)-ფორმულით:



ნახ. 1.3. კეტერის
აპარატი

$$g = \pi^2 \frac{l}{T^2}$$

პირველი მოსაბრუნებელი საქანი 1818 წელს შექმნა ინგლისელმა ფიზიკოსმა კეტერმა და მის სახელსაც ატარებს. [4]

განვიხილოთ კეტერის საქანის მოწყობილობა რომლის სქემა მოცემულია (ნახ. 1.3) –ზე იგი წარმოადგენს ლითონის ღეროს, რომლის O და O' წერტილში უძრავადაა ჩასმული ერთმანეთის პარალელურად და ერთმანეთისკენ წვეროებით მიმართული ორი პრიზმა. პრაქტიკულად, ცხადია, O და O' წერტილები არ შეიძლება ზუსტად ემთხვეოდნენ შეუღლებულ წერტილებს ამიტომ $OO' \approx l$

კეტერის საქანს სამი დამატებითი ტვირთი აქვს: A , A' და B . პირველი ორის დანიშნულებაა, მათი გადაადგილებით საქანის ღეროს გასწვრივ, მოვახდინოთ O და O' წერტილების შეუღლებულ წერტილებთან შეთავსება. B –ტვირთი უძრავადაა დამაგრებული საქანს ერთ-ერთ ბოლოზე და მიზნად ისახავს მნიშვნელოვნად განასხვავოს ერთმანეთისაგან a_1 და a_2 სიდიდეები.

რხევის დროს საქანი იკიდება ჯერ ერთი და მერე მეორე პრიზმის წიბოზე, რომელთა შორის მანძილის გასაზომად სარგებლობენ სპეციალური კომპარატორით. მას აქვს ორი მიკროსკოპი ოკულარული მოკრომეტრებით, რომელთა საშუალებით ხდება საქანის პრიზმის წიბოების დამზერა და ამგვარად ხდება OO' -მანძილის გადაზომვა კომპარატორზე საიდანაც ხდება მისი ათვლა. რაც შეეხება საქანის რხევის პერიოდის გამოთვლას, მას ზემოთ მიღებული მონაცემების მიხედვით ანგარიშობენ ბესელის ფორმულით, რომელსაც აქვს სახე:

$$T = T_1 + \frac{a_2}{a_1 - a_2} (T_1 - T_2)$$

მივიღებთ რა T -ს მნიშვნელობას (1.12) ფორმულის გამოყენებით ადვილად ვიანგარიშებთ სიმძიმის ძალის მნიშვნელობასაც.

1.7.2. რეფსოლდის აპარატი

კეტერის აპარატს ახასიათებს მრავალი კონსტრუქციული ნაკლი, რაც უარყოფითად მოქმედებს დაკვირვების სიზუსტეზე. ამ ნაკლზე მიუთითებდა ცნობილი გერმანელი მეცნიერი ბესელი, რომელმაც უჩვენა კიდევ გზები მათგან განთავისუფლებისა. კერძოდ, ეს შეეხება რხევის ნამდვილი პერიოდის გამოთვლის მიუხედავად შეუღლებულ წერტილებში რხევის პერიოდების სხვადასხვაობას. ბესელის იდეა შემდეგში მდგომარეობს: ვთქვათ ვარხიეთ საქანის მისი შეუღლებული წერტილების ირგვლივ და მივიღეთ პერიოდები T_1 და T_2 , რომელთაც შეესაბამება დაყვანილი სიგრძეები l_1 და l_2 . დავუშვათ, რომ საქანის იდეალური პერიოდია T , როცა მისი დაყვანილი სგრძეა l .

ჩამოთვლილი სიდიდეებიდან ცნობილია: T_1, T_2 და l , ხოლო უცნობებია: l_1, l_2, T . საბოლოო ჯამში ჩვენ გვინტერესებს საქანის პერიოდი T .

(1.5) – ფორმულის სფუძველზე ვწერთ:

$$T_1 = \pi \sqrt{\frac{l_1}{g}}, \quad T_2 = \pi \sqrt{\frac{l_2}{g}} \quad \text{და} \quad T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

საიდანაც ვღებულობთ:

$$\frac{T_1^2}{T^2} = \frac{l_1}{l} \quad \text{და} \quad \frac{T_2^2}{T^2} = \frac{l_2}{l} \quad (1.12)$$

აღვნიშნოთ მანძილი პრიზმის ერთი წიბოდან საქანის სიმძიმის ცენტრამდე a_1 -ით, ხოლო მანძილი მეორე წიბოდან იმავე, ცენტრამდე a_2 -ით. მაშინ

$$l = a_1 + a_2$$

გარდა ამისა (1.11) ფორმულის მიხედვით ვწერთ:

$$l_1 = a_1 + \frac{I_0}{a_1 M} \quad \text{და} \quad l_2 = a_2 + \frac{I_0}{a_2 M}$$

ჩავსვათ ეს მნიშვნელობები (1,12) ტოლობებში. მივიღებთ:

$$(a_1 + a_2)T_1^2 = \left(a_1 + \frac{I_0}{a_1 M} \right) T^2$$

$$(a_1 + a_2)T_2^2 = \left(a_2 + \frac{I_0}{a_2 M} \right) T^2$$

გამოვირიცხოთ ამ ტოლობებიდან $\frac{I_0}{M}$, რისთვისაც პირველი მათგანი გავამრავლოთ a_1 -ზე, ხოლო მეორე კი a_2 -ზე და შემდეგ შევკრიბოთ ისინი. გვექნება:

$$(a_1 + a_2)(T_1^2 a_1 - T_2^2 a_2) = T^2(a_1^2 - a_2^2)$$

ანუ

$$T_1^2 a_1 - T_2^2 a_2 = T^2(a_1 - a_2)$$

საიდანაც

$$T^2 = \frac{T_1^2 a_1 - T_2^2 a_2}{a_1 - a_2} \quad (1.13)$$

T_1 მცირედ განსხვავება T_2 -საგან, ამიტომ თუ ავღნიშნავთ რომ

$$T_2 = T_1 + \Delta T$$

ხოლო უკანასკნელ ტოლობას ავახარისხებთ კვადრატში და ΔT^2 -წევრს, როგორც უსასრულოდ მცირეს, უგულვებელყოფთ, მაშინ პირველი რიგის უსასრულოდ მცირე სიდიდის სიზუსტით გვექნება:

$$T_2^2 = T_1^2 + 2T_1 \Delta T$$

ჩავსვათ ეს გამოსახულება (1.13)-ტოლობაში. მივიღებთ:

$$T^2 = \frac{T_1^2 a_1 - T_1^2 a_2 - 2T_1 \Delta T a_2}{a_1 - a_2}$$

ანუ

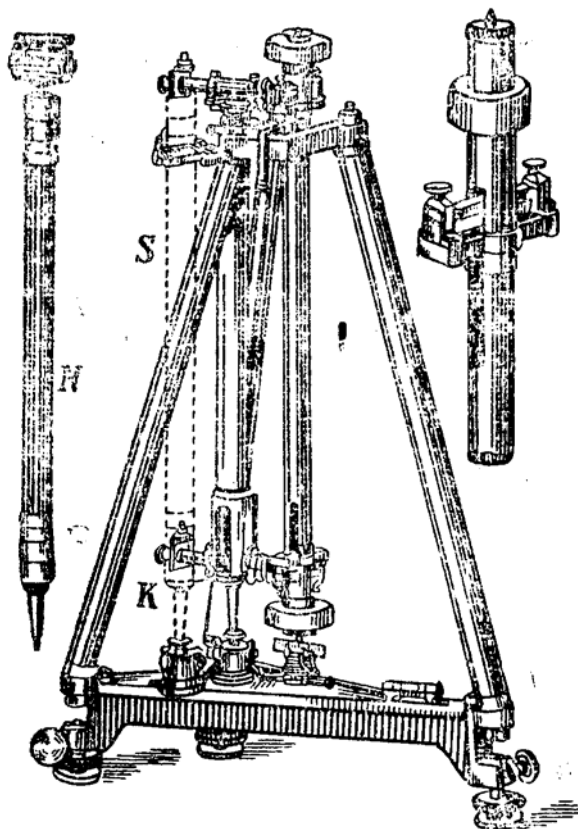
$$T = T_1 \left(1 - 2 \frac{a_1}{a_1 - a_2} \cdot \frac{\Delta T}{T} \right)^{\frac{1}{2}}$$

თუ უკანასკნელ ტოლობაში ფრჩხილებში მოთავსებულ გამოსახულებას გავშლით ბინომის ფორმულით და შევინარჩუნებთ ΔT -ს მხოლოდ პირველი ხარისხის შემცველ წევრებს, გვექნება:

$$T = T_1 \left(1 - \frac{a_2}{a_1 - a_2} \cdot \frac{\Delta T}{T} \right)$$

ანუ საბოლოოდ ვღებულობთ:

$$T = T_1 + \frac{a_2}{a_1 - a_2}(T_1 - T_2) \quad (1.14)$$



ნახ. 14. რეფსოლდის საქანიანი აპარატი

უკანასკნელი ტოლობა წარმოადგენს ბესელის ფორმულას,, რომელიც გვაძლევს საშუალებას დაკვირვებით მიღებული ერთმანეთისაგან მცირედ განსხვავებული T_1 და T_2 პერიოდების საფუძველზე გამოვითვალოთ იდეალური T პერიოდის მნიშვნელობა პრიზმების წიბოებს შორის გაზომილი l დაყვანილი სიგრძისათვის.

თუ $T_1=T_2$ მაშინ (1.14) –ფორმულაში მეორე წევრი ნულის ტოლი გახდება და ამგვარად, დაკვირვებული პერიოდები იდეალურის ტოლი აღმოჩნდება, რაც ასეც უნდა იყოს.

(1.14) –ფორმულიდან ახლა ცხადია თუ რატომაა, რომ მოსაბურუნებელ საქანებში სიმძიმის ცენტრი მაქსიმალურად უნდა იყოს გადაწეული საქანის გეომეტრიული ცენტრიდან B -ტვირთის დახმარებით. ეს გარემოება მეორე წევრს ხდის მცირეს და ამით ამართლებს იმ ფაქტს, რომ T_1 და T_2 დიდად არ

განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან. თუ $a_1=a_2$ მაშინ მეორე წევრი უსასრულოდ დიდი იქნებოდა ე.ი. T_1 და T_2 -ს შორის განსხვავება უსასრულოდ დიდი აღმოჩნდებოდა, რაც რა თქმა უნდა, შეუძლებელია. [4;105]

მოსაბრუნებელი საქანის კონსტრუქციის გნვითარებაში მნიშვნელოვანი როლი ითამაშა ბესელის გამოკვლევებმა. XIX საუკუნის 60-იანი წლების მიწურულში გამოჩენილმა მექანიკოსმა რეფსოლდმა ეს გამოკვლევები საფუძვლად დაუდო თავის მოსაბრუნებელ საქანს, რომელიც კეტერის საქანის მნიშვნელოვან გაუმჯობესებას წარმოადგენს. (ნახ.1.4)

რეფსოლდის ხელსაწყოს მთავარ ნაწილს ერთწამიანი პერიოდის საქანი შეადგენს. იგი დამზადებულია თითბრის მილისაგან, რომლის დიამეტერია 4სმ. ხოლო სიგრძე 125 სმ. საქანის ორივე ბოლოში ჩაბმულია აქატის მახვილწიბოიანი პრიზმები, რომლითაც იგი რხევის დროს ეყრდნობა ჰორიზონტალურ ბაქანს. საქანის ბოლოებზე მოთავსებულია ორი ერთნაირი ზომის ცილინდრი, რომელთაგან ერთი ღრუა ხოლო მეორე მასიური. ღრუ საქანი გარეგნულ სიმეტრიას იცავს, მასიური კი იწვევს საქანის იმძიმის ცენტრის მაქსიმალურ გადაადგილებას საქანის გეომეტრიული ცენტრიდან.

1.8. ბალისტიკური გრავიმეტრიის თეორია

ზემოთ აღვნიშნეთ, რომ სიმძიმის ძალის აბსოლუტური მნიშვნელობის განსაზღვრა პირველად ჩაატარა გალილეო გალილეიმ მის მიერვე აღმოჩენილი სხეულის თავისუფლად ვარდნის კანონის საფუძველზე

$$S = \frac{gt^2}{2} \quad (1.15)$$

სადაც S -არის სხეულის მიერ თავისუფალი ვარდნით t -დროში გავლილი მანძილი, მაგრამ ეს მეთოდი უკანასკნელ დრომდე არ გამოიყენებოდა, რადგან არ არსებობდა ტექნიკური საშუალებები S და t სიდიდეების ისეთი მაღალი

სიზუსტით გასაზომად, რომელიც უზრუნველყოფდა გ–ს განსაზღვრის საჭირო სიზუსტეს. მაგრამ უკანასკნელი დროის ტექნიკურმა მიღწევებმა შესაძლებელი გახადა გალილეის იდეისადმი მიბრუნება. [93; 94; 103]

ცნობილია, რომ თავისუფლად ვარდნილი სხეულის მოძრაობის განტოლებას აქვს სახე:

$$m \cdot \frac{d^2 S}{dt^2} = F$$

სადაც m -ვარდნილი სხეულის მასაა, $\frac{d^2 S}{dt^2}$ -მისი აჩქარება ხოლო F – სხეულზე მოქმედი სიმძიმის ძალა.

m -მასის სხეულის მიერ გავლილი გზის ყოველ წერტილში F -ძალა შეიძლება წარმოვიდგინოთ შემდეგი ჯამის სახით;

$$F = mg_0 + mW_{zz}S$$

სადაც W_{zz} -ვერტიკალური გრადიენტია, ხოლო $W_{zz}S$ -შემასწორებელი წევრი. ამ უკანასკნელი ტოლობის გათვალისწინებით ვწერთ:

$$m \frac{d^2 S}{dt^2} = mg_0 + mW_{zz}S$$

$$\text{ანუ} \quad \frac{d^2 S}{dt^2} = g_0 + W_{zz}S \quad (1.16)$$

თუ (1.16) ფორმულაში ბოლო წევრს სიმცირის გამო უგულებელვყოფთ და დარჩენილ გამოსახულებას ორჯერ ვაინტეგრებთ დროის მიხედვით, მივიღებთ:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= g_0 t + C_1 \\ S &= \frac{1}{2} g_0 t^2 + C_1 t + C_2 \end{aligned} \quad (1.17)$$

C_1 და C_2 მუდმოვების განსაზღვრისათვის დავუშვათ: როცა $t=0$, $S=S_0$ და $\left(\frac{dS}{dt}\right)_0 = V_0$ მაშინ $C_1=V_0$, $C_2=S_0$ ამიტომ (1.17) ფორულა ასე გადაიწერება:

$$S = S_0 + V_0 t + \frac{g_0 t^2}{2} \quad (1.18)$$

აქვე შევნიშნოთ, რომ ეს იგივე გალილეის კანონია როცა $S_0=0$ და $V_0=0$

(1.16) განტოლების ზოგადი ამოხსნა W_{zz} მცირე პარამეტრის მიხედვით, თუ შემოვიფარგლებით დაშლის მეორე წევრით, შეიძლება წარმოვიდგინოთ შემდეგი სახით:

$$S(t, W_{zz}) = S_1(t) + W_{zz} S_2(t) \quad (1.19)$$

ამავე დრო $S_1(t)$ და $S_2(t)$ უნდა აკმაყოფილებდნენ განტოლებებს:

$$\frac{d^2 S_1}{dt^2} = g_0 \quad \text{და} \quad \frac{d^2 S_2}{dt^2} = S_1(t)$$

ამ ბოლო ორი განტოლებიდან პირველის ამოხსნა პირველი მიახლოებით არის

$$S_1 = S_0 + V_0 t + g_0 \frac{t^2}{2}$$

მეორე მიახლოებას კი მივიღებთ მეორე განტოლების ორჯერ ინტეგრებით

$$S_2 = \frac{1}{2} S_0 t^2 + \frac{1}{6} V_0 t^3 + \frac{1}{24} g_0 t^4 + C_1 t + C_2$$

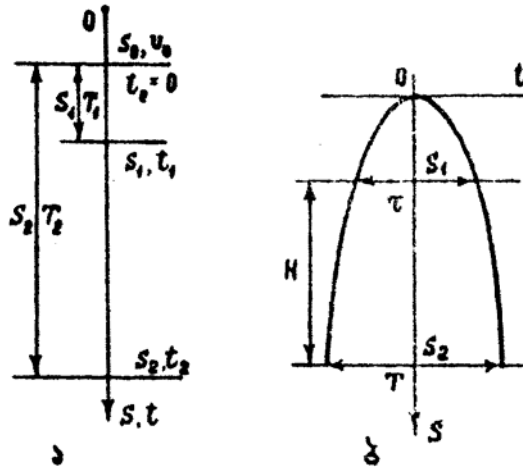
C_1 და C_2 – მუდმივების განსაზღვრისათვის გამოვიყენოთ საწყისი პირობები:

$$S(0) = S_0 \quad \text{და} \quad V(0) = V_0$$

რაც მოგვცემს $C_1 = 0$, $C_2 = 0$ და საბოლოოდ (1.19) ფორმულა მიიღებს სახეს:

$$S(t, W_{zz}) = S_0 + V_0 t + g_0 \frac{t^2}{2} + \frac{W_{zz}}{2} \left(S_0 + \frac{1}{3} V_0 t + \frac{1}{12} g_0 t^2 \right) t^2 \quad (1.20)$$

(1.20) ფორმულა გარდა საძიებელი g_0 -სიდიდისა შეიცავს W_{zz} ვერტიკალურ გრადიენტს, სასინჯი მასის საწყის სიჩქარეს V_0 -ს და მის მდებარეობას S_0 -ს დროის ათვლის დაწყების მომენტში. განტოლების უკანასკნელი წევრი მცირე სიდიდეა და იგი გამოითვლება როგორც g_0 -ის შესწორება. თუ ექსპერიმენტი ისე იქნება დაყენებული, რომ $S_0 = 0$ მაშინ განტოლებებში ორი უცნობი დაგვრჩება:



ნახ. 1.5. ბალისტიკურ გრავიმეტრში სასინჯი სხეულის მოძრაობის სქემა:

ა) არასიმეტრიული ხერხი; ბ) სიმეტრიული ხერხი.

g_0 და V_0 და მათი ამოხსნისთვის საჭირო იქნება დაკვირვება წარმოებდეს სასინჯი მასის მოძრაობის ორ S_1 და S_2 ინტერვალში შესაბამისად t_1 და t_2 დროისა. არსებობს გაზომვის ორი ხერხი; არასიმეტრიული, რომელიც, სხეულის თავისუფალ ვარდნას გულსიხმობს, და სიმეტრიული როდესაც დაიკვირვება სასინჯი მასა ზევით და ქვევით მოძრაობისას. (ნახ.1.5 ა,ბ)

არასიმეტრიული ხერხისათვის შედგენილი ორი განტოლებიდან, რომლებიც (1,20)-დან გამომდინარეობენ, g_0 -ის გამოსათვლელი ფორმულა ასეთი სახის იქნება:

$$g_0 = \frac{2}{T_2 - T_1} \left(\frac{S_2}{T_2} - \frac{S_1}{T_1} \right) + \varepsilon(W_{ZZ}) \quad (1.21)$$

სადაც $T_1 = t_1 - t_0$, $T_2 = t_2 - t_0$ და შესაბამისად $S_1 = S_1 - S_0$, $S_2 = S_2 - S_0$ ხოლო ε -არის g -ს შესწორება, რომელიც დამოკიდებულია W_{ZZ} , V_0 , g_0 , t_1 და t_2 სიდიდეებზე. არასიმეტრიული ხერხით სიმძიმის ძალა გამოითვლება $1 \cdot 10^{-9}$ სიზუსტით. [1;9;105]

გარკვეული უპირატესობით ხასიათდება სიმეტრიული ხერხი, რომლის მიხედვითაც ზევით ასროლილი სასინჯი სხეული უკან იმავე გზით ბრუნდება და ამგვარად, ორჯერ გაივლის ფიქსირებულ მდებარეობას. უპირატესობა იმაში მდგომარეობს, რომ დაკვირვების დროს გამოირიცხება არასრული ვაკუუმის გავლენა, რომლის ორივე მიმართულებით მოძრაობის დროს ერთნაირია.

დროის ინტერვალები სასინჯი სხეულის გავლის მომენტებს შორის ქვედა მდებარეობიდან აღმავალ და დაღმავალ ტრაექტორიებზე ავლნიშნით T -თი და ზედა მდებარეობიდან τ -თი (ნახ.1.5 ბ.). ინტერვალების ათვლა წარმოებს

სმეტრიულად 0 წერტილიდან და რადგან $S(0)=0$ და $V(0)=0$ (1.20) ფორმულიდან $\frac{T}{2}$ და $\frac{\tau}{2}$ ინტერვალებისათვის შეიძლება შევადგინოთ ორი განტოლება S_1 -ის და S_2 -ის მიმართ. მათ სხვაობიდან გამომდინარეობს, რომ

$$g_0 = \frac{gH}{T^2 - \tau^2} - W_{ZZ} \frac{g_0}{48} (T^2 + \tau^2)$$

სადაც $H=S_2-S_1$, უკანასკნელი შემასწორებელი წვერი შეიძლება გამარტივდეს.

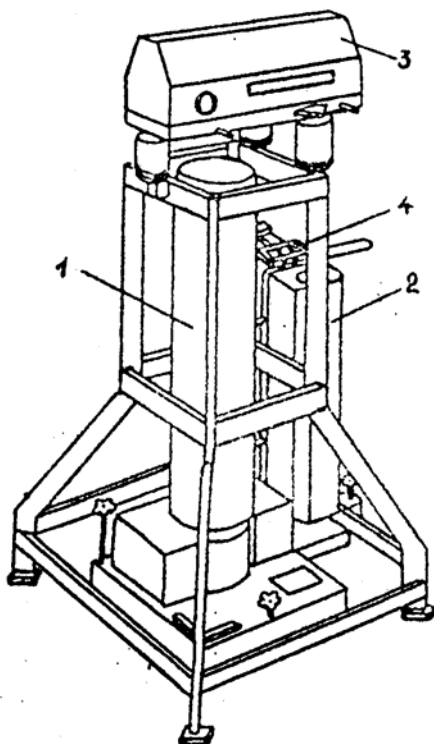
აქედან კი, გამომდინარე იქედან, რომ $\frac{g_0 t}{8} = H + S_1$ და $\frac{g_0 \tau^2}{8} = S_1$

საბოლოოდ გვექნება:

$$g_0 = \frac{8H}{T^2 - \tau^2} - W_{ZZ} \left(\frac{S_1}{3} + \frac{H}{6} \right) \quad (1.22)$$

1.9. ბალისტიკური გრავიმეტრები

პირველი ბალისტიკური გრავიმეტრი შეიქმნა ამერიკის შეერთებულ შტატებში XIX საუკუნის 60-იან წლებში. მისი საშუალო სიზუსტე იყო $\pm 0,05$ მგლ.



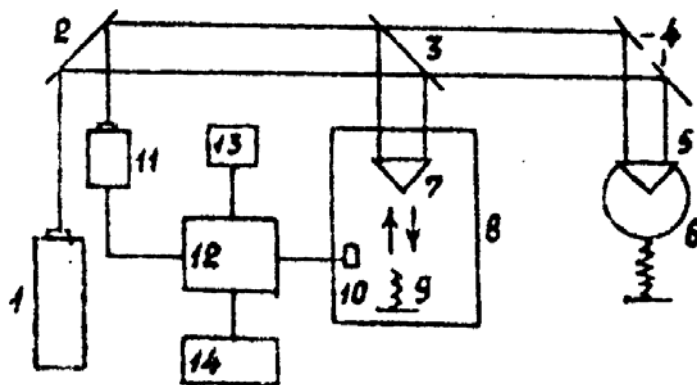
იმავე პერიოდში იაპონელმა და ფრანგმა სპეციალისტებმა შექმნეს უფრო ზუსტი ხელსაწყო, ხოლო შემდეგ პარიზის ზომისა და წონის ბიურომ ქ. ტურინის მეტროლოგიის ინსტიტუტთან ერთად დაამზადა სიმძიმის ძალის სიმეტრიული ხერხით განმსაზღვრელი ბალისტიკური გრავიმეტრი. ამ ხელსაწყოს საშუალებით იმავე 60-იანი წლების ბოლოსათვის დაზუსტდა ევროპის საყრდენი პუნქტების ქსელი, რომელიც 17 პუნქტისაგან შედგებოდა და ხასიათდებოდა $\pm 0,02$ მგლ სიზუსტით.

აღნიშნული ხელსაწყო გაუმჯობესებული სახით სერიულად მზადდებოდა საფრანგეთ-

იტალიის ფირმის მიერ მარკით A-60 (ნახ.1.6). მისი ძირითადი ბლოკებია 1-ცილინდრული ვაკუუმის კამერა, რომელშიც მოძრაობს სასინჯი სხეული; მის ქვედა ნაწილში მოთავსებულია გამშვები სისტემა; 2-კოჰერენტული სინათლის წყარო; 3-სასინჯი სხეულის მიერ განვლილი გზა იზომება მაიკელსონის ინტერფერომეტრით, რომლის სისტემაშიც შედის კუთხოვანი ამრეკლავი და გრძელტალღიანი სეისმომეტრი. სეისმომეტრის მასას ახასიათებს დიდი ინერცია; 4-კუთხოვანი ამრეკლავის ვარდნის დროს მანძილის ცვლილება რეგისტრირდება ელექტრონული სისტემით.

(ნახ.1.7)-ზე წარმოდგენილია A-60 ტიპის ბალისტიკური გრავიმეტრის სქემა, სადაც 1-ლაზერია; 2-4 ინტერფერომეტრის სისტემაში შემავალი სარკეებია; 3-ნახევრად გამჭვირვალე სარკეა; 5-გრძელტალღოვანი სეისმოგრაფის სისტემაში შემავალი მტკიცედ დამაგრებული კუთხოვანი ამრეკლავია; 6-გრძელპერიოდიანი სეისმოგრაფია; 7-კუთხოვანი ამრეკლავია; 8-ვაკუუმის კამერა; 9-გამშვები მოწყობილობა; 10-მონომეტრია; 11-ფოტოელექტრული დეტექტორია; 12-მიკროპროცესორია; 13-საათია; 14-საბეჭდი აპარატია.

A-60 მარკის გრავიმეტრი უზრუნველყოფს გაზომვის 10^{-7} - 10^{-8} მ/წმ² სიზუსტეს ერთდღიანი დაკვირვების დროს.



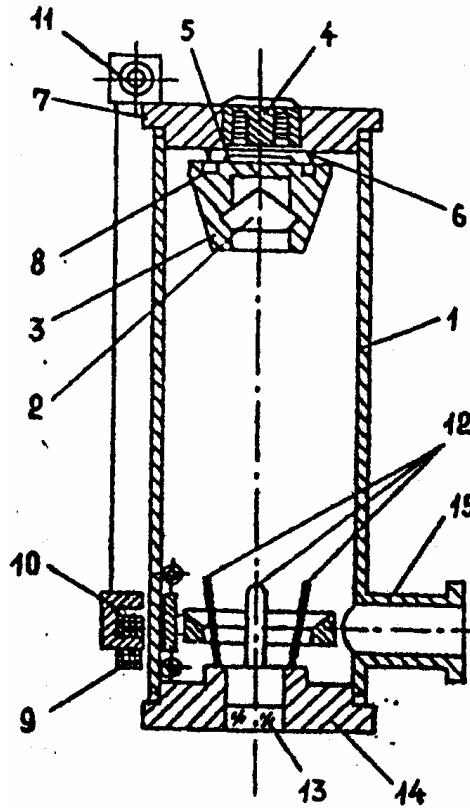
ნახ.1.7. A-60 ტიპის ბალისტიკური გრავიმეტრის სქემა

ანალოგიური დანიშნულების ბალისტიკური გრავიმეტრი დაამზადეს 1972წ. სსრკ მეცნიერებათა აკადემიის ციმბირის განყოფილების ავტომატიკისა და ელექტრომეტრიის ინსტიტუტსა და ხარკოვის მეტროლოგიის სამეცნიერო-კვლევით ინსტიტუტში. ამ ხელსაწყოში, რომლის სახელწოდებაც ნოვორზისკის

ლაზერული ბალისტიკური გრავიმეტრი-(ГАБЛ), გამოყენებულია ვარდნილი სხეულის მიერ გზის ორი მოცემული ინტერვალის გავლის დროს გაზომვის პრინციპი. ეს პრინციპი განაპირობებს იმ ცდომილებათა თავიდან აცილებას, რომლებიც დამახასიათებელია ზემოთ აღწერილი სიმეტრიული მოძრაობისთვის (ლაპარაკია კუთხური სიჩქარის იმპულსზე და სეისმურ დარტყმაზე, რომლებიც წარმოიშობიან სასინჯი სხეულის გაშვების დროს)

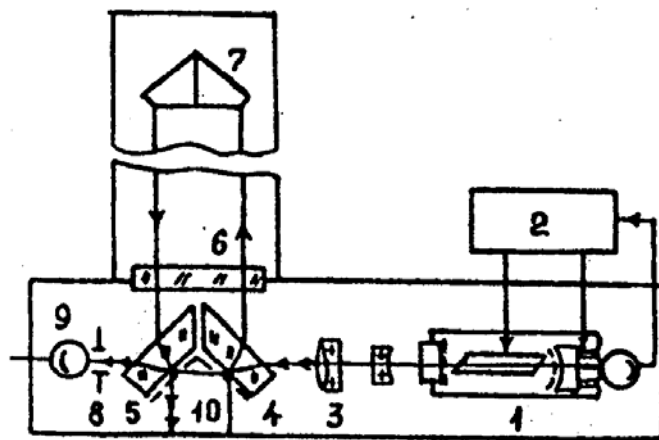
გრავიმეტრი ГАБЛ, რომელიც მოცემულია (ნახ.1.8)-ზე შეიცავს შემდეგ ძირითად ბლოკებს: სასინჯი მასის თავისუფლად ვარდნის მოწყობილობას; განვლილი გზის ინტერვალისა და დროის აღმრიცხველ მოწყობილობას კვარცის გენერატორით; ლაზერულ ინტერფერომეტრს განვლილი გზის გაზომვისათვის; ავტომატური მართვის მოწყობილობას და გაზომილი შედეგების რეგისტრატორს.

(ნახ.1.8)-ზე აღნიშნულია: 1-სასინჯი მასის ვარდნის ვაკუუმური ცილინდრი, რომლის ზედა ნაწილში მოთავსებულია ელექტრომაგნიტი-4; რომელიც იკავებს კორპუსში-3 დამაგრებულ კუთხოვან ამრეკლავს. ამ უკანასკნელის ფიქსაცია წარმოებს ამრეკლავის კორპუსზე მტკიცედ დამაგრებული ბრტყელი ფერიტული ფირფიტით-5 და ცილინდრის ზედა მილტუჩით-7, რომელიც დამაგრებულია სამი ნემსით; ელექტრომაგნიტის კონტაქტების გათიშვის მომენტში კუთხოვანი ამრეკლავი თავისუფლად ვარდება ძირს და ცილინდრის ქვედა ნაწილში მას იჭერს სამფრთიანი ზამბისეული სოლი-12; კუთხოვან ამრეკლავს უკან აბრუნებს ელექტრომაგნიტი-10, რომელიც



ნახ.18. ნოვოსიბირსკის ბალისტიკური გრავიმეტრის ГАБЛ სქემა

დადგმულია სპეციალურ კარეტაზე-9, მას ვერტიკალურად ამოძრავებს ელექტრომატორი-11; ჰაერის გამოტუმბვა ცილინდრიდან ხდება ცილინდრის ქვედა ამომწოვის-15 საშუალებით; სასინჯი სხეულის ვარდნის რეგისტრაცია წარმოებს მაიკელსონის ორსხივიანი ლაზერული ინტერფერომეტრით. ლაზერის სხივი შეჰყავთ ცილინდრში-1 ქვედა სა'ვრენით-13.



ნახ.19. ГАБЛ გრავიმეტრის სარეგისტრაციო მოწყობილობის სქემა

უნდა აღინიშნოს, რომ ბალისტიკური გრავიმეტრების მუშაობა-დაკვირვება და მასალის დამუშავება მთლიანად ავტომატიზირებულია.

1.10. სიმძიმის ძალის ფარდობითი განსაზღვრა საქანიანი ხელსაწყოთი

სიმძიმის ძალის ფარდობითი განსაზღვრისათვის გამოიყენება შტერნეკის ტიპის საქანიანი ხელსაწყო, რომლის ძირითადი ნაწილს შეადგენს ერთსაკიდიანი საქანი. ფარდობითი განსაზღვრის იდეა შემდეგში მდგომარეობს. ვთქვათ, საყრდენ პუნქტში, სადაც ცნობილია სიმძიმის ძალა g_0 , განსაზღვრეთ საქანის რხევის პერიოდი T_0 . შემდეგ იგივე საქანი გადავიტანეთ რომელიმე B პუნქტში, სადაც გვსურს გავიგოთ სიმძიმის ძალა g_1 და იქვე განსაზღვრეთ მისი პერიოდი T_1 . თუ ამ ორ პუნქტში დაკვირვების დროს საქანის დაყვანილი სიგრძე უცვლელი დარჩა, მაშინ გაზომვა საჭირო არ არის. მართლაც, როგორც ვიცით:

$$T_0 = \pi \sqrt{\frac{l}{g_0}} \quad \text{და} \quad T_1 = \pi \sqrt{\frac{l}{g_1}}$$

აქედან ვღებულობთ:

$$\frac{T_0^2}{T_1^2} = \frac{g_1}{g_2} \quad \text{ანუ} \quad g_1 = g_0 \frac{T_0^2}{T_1^2} \quad (1.23)$$

(1.23) ფორმულით შეიძლება გამოითვალოს g_1 -ის მნიშვნელობა რადგან მასში ყველა სიდიდე ცნობილია.

ვისარგებლოთ იმ გარემოებით რომ T_0 და T_1 მცირედ განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან და (1.23) ფორმულას გამოთვლისთვის უფრო მარტივი სახე მივცეთ. ამ მიზნით შემოვიღოთ აღნიშვნა

$$T_1 = T_0 + \Delta T \quad \text{აქედან} \quad T_0 = T_1 - \Delta T$$

მაშინ ვღებულობთ:

$$g_1 = g_0 \frac{(T_1 - \Delta T)^2}{T_1^2} = g_0 \left[1 - 2 \frac{\Delta T}{T_1} + \left(\frac{\Delta T}{T_1} \right)^2 \right]$$

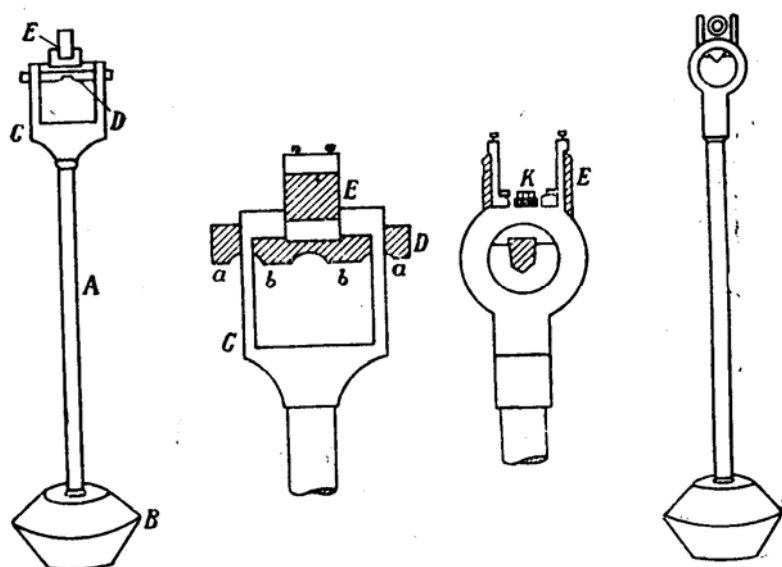
აქედან
$$\delta g = g_1 - g_0 = -2g_0 \frac{\Delta T}{T_1} + g_0 \left(\frac{\Delta T}{T_1} \right)^2$$

იმის გამო, რომ გრავიმეტრიული პუნქტები გაზომვების დროს ახლო-ახლო არიან განლაგებული, ამიტომ გაზომილი პერიოდები დიდად არ განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან. ამის გამო ΔT^2 შეგვიძლია უგულვებელვყოთ და საანგარიშო ფორმულა მიიღებს სახეს:

$$\delta g = -2g_0 \frac{\Delta T}{T_1} \quad (1.24)$$

1.11. შტუკრატის ოთსაქანიანი აპარატი

1881 წელს ავსტრალიელი გეოდეზისტის შტერნეკის მიერ აგებული ერთსაკიდიანი საქანიანი ხელსწყო შემდგომში მნიშვნელოვნად გააუმჯობესა გერმანელმა მექანიკოსმა შტუკრატმა. ამ ხელსაწყოში ერთდროულად ოთხი საქანი იკიდება, რომელთა რხევის პერიოდები დაახლოებით ნახევარწამიანია.



ნახ.1.10. შტუკრატის საქანი

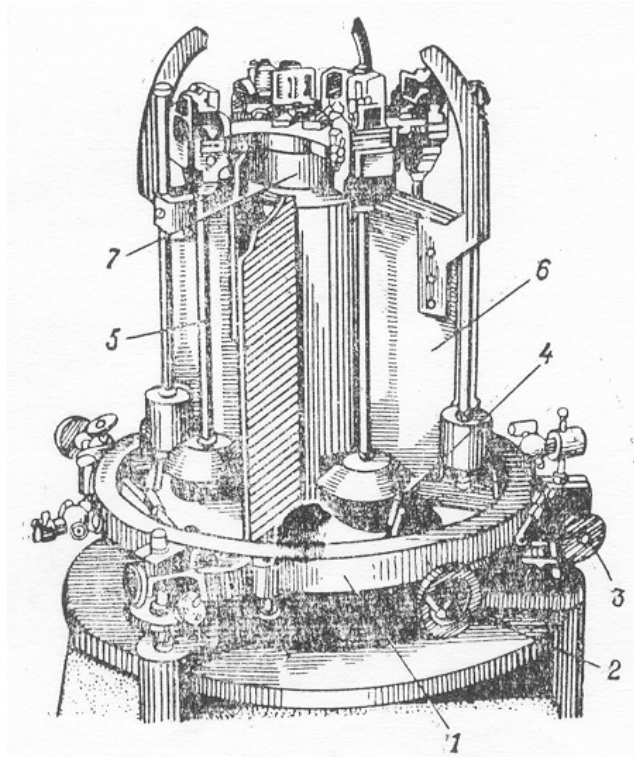
საქანის A დეროს დაბოლოება B (ოსპი) სფეროსებური ფორმის სხეულს წარმოადგენს, ხოლო ზედა C ნაწილი უზანგის ფორმისაა და შეიცავს აქატის D პრიზმას და E სარკეს (ნახ.1.10). პრიზმის მახვილი წიბო სამი ამონაკვეთით გაყოფილია ოთხ ნაწილად, რომელთაგან ორი განაპირა *aa*- აქატის პრიზმის არასამუშაო ნაწილებია, ხოლო ორი შიგა *bb*- სამუშაო ნაწილებია.

დაკვირვების დროს საქანი თავისი სამუშაო ნაწილებით, ან როგორც ამბობენ, პრიზმის სამუშაო დანებით, ეყრდნობა შტატივის სათანადო ბაქანზე ჰორიზონტალურად დამაგრებულ აქატის ფირფიტას, რომელზეც იგი ირხევა.

საქანები არასამუსაო მდგომარეობაში ყოფნის დროს, ე.ი. მათი მოხსნის, დაკიდების ან სხვა პროცედურების შესრულებისას, ეყრდნობიან არასამუშაო დანებზე. ამ უკანასკნელიდან მათი დაშვება სამუშაო დანებზე ხდება სპეციალური მექანიზმის საშუალებით, რომელსაც არეტირი ეწოდება.

საქანის რხევაზე დაკვირვებისათვის მის ზედა ბოლოზე E-სარკვა დამაგრებული. სარკის ზემოთ, საქანის თავზე, მოთავსებულია K-ბუნიკი. თუ ბუნიკს საჭირო ოდენობით წავეკლიბავთ, შევძლებთ საქანების პერიოდების გათანაბრებას.

საქანების დასამზადებლად შერჩეულ ლითონს დიდი მოთხოვნილება წაყენება. კერძოდ უნდა ახასიათებდეს მცირე ტემპერატურული გაფართოება, ერთგვაროვნება, უდრეკობა და სხვა. სტანდარტული საქანების მასა უდრის 1,25 კგ-ს, საერთო სიგრძე კი 31 სმ-ს. რასაკვირველია არსებობს სხვა სიგრძისა და მასის საქანებიც, მხოლოდ სხვა კონსტრუქციის ხელსაწყოებისათვის. [4; 81; 84]



ნახ.1.11. ოთხსაქანიანი აპარატის შტატივი საქანებით

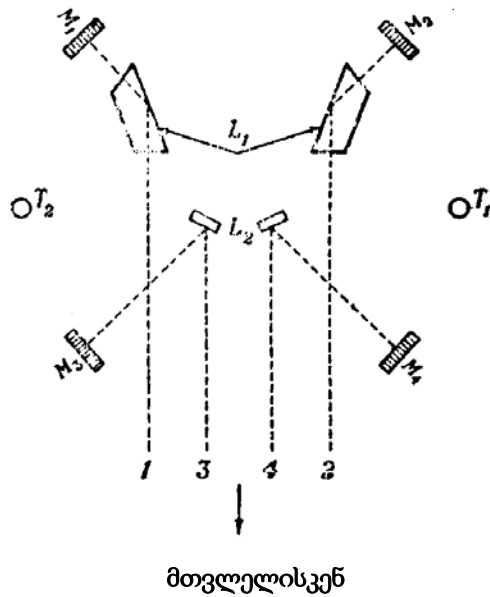
საქანიანი აპარატის მეორე მთავარ ნაწილს წარმოადგენს შტატივი, რომელზედაც საქანები იკიდება. შტუკარის სისტემის ხელსაწყოს აქვს 35 სმ. დიამეტრის მასიური ფუძე –1. რომლის ცენტრში მოთავსებულია ვერტიკალური სვეტი (ნახ.1.11). სვეტის ირგვლივ სივრცე გაყოფილია ოთხ თანასწორ ნაწილად ურთიერთმართობული ტიხრების –6 საშუალებით, რომელთა დანიშნულებაა გააცალკეოს ერთმანეთისაგან შტატივზე დაკიდებული საქანები.

სვეტის ზედა ნაწილზე ჰორიზონტალურად დამაგრებულია ჯვარედინი ფორმის ბაქანი – 7 ოთხი წინშვერილით, რომლებიც ზემოთხესენებული ტიხრების შუაზეა მოთავსებული სწორედ მათზე იკიდება საქანები.

უძრავი წინშვერილები მოთავსებულია მოძრავ წინშვერილებს შორის, რომლებიც შეიძლება ავწიოთ ან დავწიოთ სპეციალური ხრახნის –2 სასუალებით. მთელი ეს მოწყობილობა არეტირს შეადგენს. ყველა ოთხი საქანის არეტირი ერთდროულად მოჰყავს მოძრაობაში არეტირის სახელურს – 3.

საქანების წონასწორობიდან გადახრა, რათა მათ მივცეთ გარკვეული ამპლიტუდა, შესაძლებელია შტატივის ფუძეში მოთავსებულ ოთხი ბერკეტის –4 დახმარებით. საქანების გადახრის შემდეგ ბერკეტის –4 სწრაფი მობრუნებით უკან საქანი თავისუფლდება და იწყებს რხევას მუდმივი პერიოდით. საქანის

საწყისი ამპლიტუდის რეგულირება შეიძლება სათანადო ხრახნის საშუალებით, რომელიც ბერკეტის სახელურთანაა მოთავსებული.



ნახ.1.12. ოთხსაქანიანი აპარატის ოპტიკული სისტემა

სვეტის თავზე მოთავსებული ჰორიზონტალური საქანის ცენტრალურ ნაწილში დამაგრებულია ე.წ. ოპტიკური ხიდი, რომლის მეშვეობით წარმოებს დაკვირვება ოთხივე საქანზე ერთი ადგილიდან. ოპტიკური ხიდი შედგება ორი L_1 -პრიზმისაგან სრული შიგა არეკვლის კუთხით და ორი ვერტიკალურად დამაგრებული L_2 -ამრეკლავი სარკისაგან (ნახ.1.12)

ერთ-ერთი ტიხარის – 6 გვერდზე დამაგრებულია T_1 -თერმომეტრი, რომელიც ჩასმულია საქანის ფორმის მასიურ ჩარჩოში. მოპირდაპირე ტიხარზე მოთავსებულია თერმომეტრი T_2 . თუ საქანებით დაკავებულ სივრცეში ტემპერატურა ფენობრივადაა განაწილებული სიმაღლის მიხედვით, მაშინ T_2 -თერმომეტრის ჩვენება შეესაბამება გარემოს საშუალო ტემპერატურას.

შტატივი ზემოდან იხურება თითბრის მასიური ხუფით, რომლის ქვედა წრიული ფუძე ზედმიწევნით მჭიდროდ ემთხვევა შტატივის წრიულ ფუძეს-1.

საქანის რხევის პერიოდი საჭიროა განსაზღვრული იქნეს $2.5 \cdot 10^{-7}$ წმ. სიზუსტით, რაც არ შეიძლება მიღწეულ იქნას თანხვედნის ათვლის ისეთი გზით, რომელიც გამოყენებული იყო მოსაზრუნებელი საქანებით დაკვირვების დროს. ამისათვის არსებობს ხელსაწყო რომელსაც თანხვედნათა მთვლელი ეწოდება. იგი ორგვარია: ელექტრომაგნიტური და ოპტიკური. დაკვირვებისათვის

გამოიყენება ქრონომეტრი. საქანების რხევის პერიოდის დადგენისათვის ათვლილ მნიშვნელობაში შეაქვთ მთელი რიგი შესაძლებლობები, რომელთა გამოთვლისას სპეციალურ დაკვირვებებს აწარმოებენ. ასეთნაირად დადგენილი საქანის რხევის პერიოდის მნიშვნელობა შეაქვთ (1.23) ფორმულაში და ანგარიშობენ ჯერ δg -ს მნიშვნელობას, გამოსავალი პუნქტის მიმართ, ხოლო შემდეგ კი თვით g -ს ანუ g_1 -ს რომელიც ტოლია $g_1 = g_0 + \delta g$

უნდა აღინიშნოს, რომ საქანიან ხელსაწყოებს დაკვირვებისათვის სჭირდებათ მკვიდრი სადგარი. მაგრამ, როგორც ცნობილია დედამიწის 70%-ზე მეტი ფართობი ზღვებსა და ოკეანეებს უჭირავთ. ამიტომ ეს ტერიტორია რჩებოდა დაკვირვების გარეშე, ვიდრე ჰოლანდიელმა გეოდეზისტმა და გეოფიზიკოსმა ვენინგ-მეინესმა არ შექმნა და დაამუშავა მოძრავ ბაქნებზე დაკვირვების მეთოდოლოგია. მანვე შექმნა სპეციალური საზღვაო საქანიანი ხელსაწყო, რძმელსაც თვითონვე იყენებდა 1923-1932 წლებში. [1; 14; 52; 105]

დაბოლოს შევნიშნოთ, რომ ინტერესი საქანიანი აპარატურის განვითარების მიმართ, მიუხედავად დიდი წონისა და ძნელად ტრანსპორტირებისა აიხსნებოდა, პირველ რიგში იმით, რომ ისინი არ საჭიროებენ ეტალონირებას, მაგრამ მიუხედავად ამისა XIX ს-ის მეორე ნახევრიდან მარალი სიზუსტის პორტატული გრავიმეტრების შექმნამ თითქმის სულ განდევნა საქანიანი ხელსაწყოები სავლელ პრაქტიკიდან.

1.12. სიმძიმის ძალის განსაზღვრის

სტატისტიკური მეთოდები

სიმძიმის ძალის ფარდობითი განსაზღვრის სტატისტიკური მეთოდები დამყარებულია შემდეგ მარტივ პრინციპზე: წარმოვიდგინოთ სხეული, რომელზეც მოქმედებს, ერთი მხრივ სიმძიმის ძალა და მეორე მხრივ მუდმივი (მაგ. აირის ან ზამბარის დრეკადობის ძალა). ვთქვათ, ამ ორი ძალის მოქმედებით სხეული წონასწორობაშია და უჭირავს რაღაც გარკვეული მდებარეობა. რადგან

ვგულისხმობთ, რომ მაწონასწორებელი ძალა უცვლელია ამიტომ სხეულის წონასწორობის მდებარეობის შეცვლა შეიძლება გამოყენებულ იქნას, როგორც სიმძიმის ძალის ცვალებადობის საზომი.

ამ პრინციპზე დამყარებული სიმძიმის ძალის ფარდობითი სიდიდის მზომ ხელსაწყო სტატიკური გრავიმეტრი ეწოდება. მაღალი მგრძნობიარობისა და მცირე მასის გრავიმეტრების დასამზადებლად უფრო ხელსაყრელია ლითონისა და კვარცის ზამბარები. სხვადასხვა კონსტრუქციის ასეთი გრავიმეტრები 1929 წლიდან მრავლად იქნა აგებული. ისინი წარმატებით გამოიყენება და განიცდის შემდგომ განვითარებას, განსაკუთრებით სიზუსტის გაზრდის მხრივ, რომელიც უკვე 0,01 მილიგალს ანუ 10 მიკროგალს აღწევს. [4; 76; 82; 83]

გრავიმეტრებში გამოყენებული ლითონის ზამბარები სხვადასხვა ფორმისაა: ცილინდრული, ბრტყელი, სპირალური. იმისათვის, რომ მიზანშეწონილი იყოს მათი გამოყენება გრავიმეტრებში საჭიროა ისინი ხასიათდებოდნენ დრეკადი თვისების მუდმივობით დროში, ტემპერატურის ცვლილებაზე მინიმალური რეაგირებით და მუდმივი პროპორციულობით ზამბარის დეფორმაციის სიდიდესა და მის გასწვრივ მოქმედ სიმძიმის ძალას შორის. ამ იდეალურ პირობებს არცერთი ლითონი არ აკმაყოფილებს, მაგრამ ყველაზე უფრო მისაღები აღმოჩნდა ელინვარი («მუდმივად დრეკადი»), რომლის ტემპერატურული გაფართოების კოეფიციენტი მცირეა სხვა ლითონებთან შედარებით.

გრავიმეტრის მგრძნობიარე ნაწილის დასამზადებლად ხმარობენ აგრეთვე მდნარ კვარცს, რომლის დადებითი თვისებაა ის, რომ მას ნარჩენი დეფორმაცია არ ახასიათებს. დრეკადობის ზღვარზე გადასვლამდე წმინდა დრეკად დეფორმაციას განიცდის და დრეკადი მოქმედება ბევრად უფრო მცირე აქვს ვიდრე ლითონს. კვარცის უარყოფით მხარეს წარმოადგენს ის, რომ დიდი ტემპერატურული გაფართოების კოეფიციენტი აქვს და ადვილად მსხვრევადია. ამიტომ ცდილობენ ხელსაწყო იყოს მოთვსებული მუდმივი ტემპერატურის რეჟიმში, ხოლო მის მგრძნობიარე ნაწილს კი ამზადებ მცირე ზომისას.

გრავიმეტრები შეიძლება იქნეს კლარფიცირებული სხვადასხვა დამახასიათებელი ნიშნის მიხედვით:

1. გრავიმეტრების კლასიფიკაცია დრეკადი სისტემების მოქმედების მიხედვით:

- ა) აირიან-სითხიანი გრავიმეტრები, რომლებსაც ეს ორი კომპონენტი ერთმანეთს აწონასწორებს.
- ბ) მექანიკური გრავიმეტრები, რომლებშიც სიმძიმის ძალის ცვალებადობა $g-g_0$ შეესაბამება m -ტვირთის ხაზოვან გადაადგილებას $l-l_0$ მანზილზე. ე.ი. მათ შორის არსებობს შემდეგი პროპორცია:

$$m(g-g_0)=\varepsilon(l-l_0)$$

სადაც l_0 და l შესაბამისად დაუჭიმავე და დაჭიმული ზამბარის სიგრძეებია. იგულისხმება, რომ ამ შემთხვევაში გრავიმეტრის შკალა ხაზოვანია ჰუკის კანონის ანუ მცირე დეფორმაციის ფარგლებში.

- გ) მექანიკური გრავიმეტრები, რომლებსაც ტვირტი m საკიდი წერტილის მიმართ ასრულებს ბრუნვით მოძრაობას ე.ი.

$$\tau(\Theta - \Theta_0) = mgl \cos \varphi$$

სადაც τ -მაფის გრეხის მუდმივაა; l -საქანის ბერკეტის სიგრძეა, ხოლო φ -საქანის ბერკეტის ჰორიზონტიდან გადახრის კუთხე. ამ შემთხვევაში შკალა ინარჩუნებს ხაზოვანებას დახრის კუთხის მუდმივობის პირობებში. საერთოდ კი, ასეთი სისტემის გრავიმეტრების კუთხური მგრძნობიარობა ხაზოვანი არ არის და გამოსავალს პოულობენ იმაში, რომ იყენებენ ათვლის ნულოვან მეთოდს – სისტემა მუდამ მიიყვანება ერთსა და იმავე “ნულოვან მდებარეობაში”. უმეტესობა თანამედროვე გრავიმეტრებისა ამ ტიპისაა და ეს იმიტომ, რომ მათში მარტივად შეიძლება სისტემის მგრძნობიარობის გაზრდა. გრავიმეტრების მგრძნობიარობის ხელოვნურად გაზრდას სისტემის ასტაზირება ეწოდება. ეს პრინციპი იმაში მდგომარეობს, რომ მგრძნობიარე სისტემას აყენებენ ისეთ მდგომარეობაში, რომელიც ახლოსაა არამდგრად წონასწორობასთან. ასეთ შემთხვევაში სიმძიმის ძალის მცირე ცვლილება იწვევს მზომი სისტემის მნიშვნელოვან გადაადგილებას.

2. გრავიმეტრების კლასიფიკაცია დრეკადი სისტემის მასალის მიხედვით: სიმძიმის ძალის ნაზრდის კომპენსაციისთვის გამოიყენება ლითონისა და კვარცის ზამბარებში აღძრული დრეკადი ძალებიან შეკუმშული დრეკადი აირით.

3. გრავიმეტრების კლასიფიკაცია მათი დანიშნულების მიხედვით: გეოდეზიური – ფართო დიაპაზონი; სამიეზო – მცირე დიაპაზონი; საზღვაო – წყლის ფსკერზე დასაშვები და გემებზე და წყალქვეშა ნაგებზე დაკვირვებისათვის. საჰაერო-თვითმფრინავებზე დაკვირვებისათვის.

გრავიმეტრებში ძირითადად გამოყენებულია გაზომვის ნულოვანი (კომპენსაციური) მეთოდი, რომელიც შემდეგში მდგომარეობს: დრეკადი სისტემის მოზრავ ელემენტს, რომელიც სიმძიმის ძალის ცვლილების გამო გადაადგილება, სპეციალური მოწყობილობით აბრუნებენ უკან ერთსა და იმავე ე.წ. ნულოვან მდგომარეობაში. გრავიმეტრის დრეკად სისტემას გააჩნია ორი სკომპენსაციო მოწყობილობა ზამბარების სახით, ესენია: გამზომი ზამბარა, რომლის საშუალებით ხდება სიმძიმის ძალის ცვლილების გაზომვები დაკვირვების დროს და სადიაპაზონო ზამბარა, რომლის საშუალებით ხდება სიმძიმის ძალის მნიშვნელოვანი სიდიდის კომპენსაცია იმისათვის, რომ ხელსაწყო მოიყვანონ სამუშაო მდგომარეობაში. [1; 9; 38; 39]

თანამედროვე გრავიმეტრების უმეტესობას სწორეს ნულოვანი ათვლის სისტემა გააჩნიათ, რადგან მათში მარტივად შეიძლება მგრძნობიარობის გაზრდა.

გრავიმეტრების დრეკადი სისტემის სტატიკური წონასწორობის მდგომარეობაზე მოქმედებს ტემპერატურის და ატმოსფერული წნევის ცვლილებები. ამიტომ გრავიმეტრში არსებობს მოწყობილობები, რომელთა საშუალებით ხდება, თუ მთლიანად არა, ნაწილობრივ მაინც მათი კომპენსირება. თუმცა, მიუხედავად აღნიშნულისა, გრავიმეტრებს მაინც გააჩნიათ ორი უარყოფითი მხარე: ერთი ის, რომ დრეკადი სისტემის მასალის თვისებები განუწყვეტლივ იცვლება დროში, რაც იწვევს გრავიმეტრის ჩვენების მუდმივ ცვლილებას (ე.წ. ნულპუნქტის სვლას), და მეორე, თითქმის ყველა სტატიკურ გრავიმეტრში სიმძიმის ძალის ცვლილება გაიზომება ხელსაწყოს სკალის ერთეულებში. ამის გამო გრავიმეტრებს სჭირდებათ სკალის კალიბრება ანუ ეტალონირება. ამ ორი მიზეზის გამო გრავიმეტრებს სავსე გაზომვების დაწყებამდე სჭირდებათ დეტალური გამოკვლევა. [52; 102]

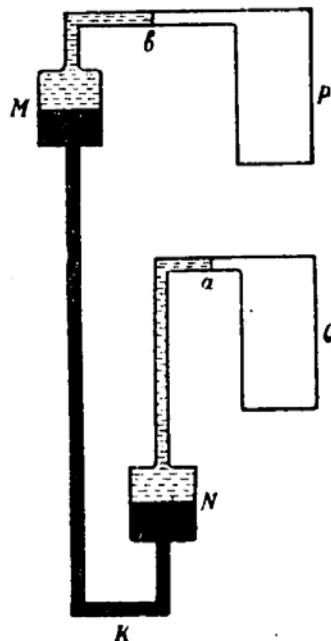
1.13. სტატიკური გრავიმეტრების მიმოხილვა

1.13.1. ლომონოსოვის უნივერსალური ბარომეტრი

პირველი სტატიკური გრავიმეტრის იდეა ეკუთვნის მ. ლომონოსოვს, რომელიც დამზადებულ იქნა 1753 წ. ეს ხელსაწყო შედგებოდა ორი სხვადასხვა დიამეტრის მქონე მინის სფეროსაგან, რომლებიც ერთმანეთთან წვრილი მილით იყო დაკავშირებული (ნახ.1.13) მცირე სფერო ავსებული იყო აირით, ხოლო დიდი სფეროს ნახევარში მოთავსებული იყო ვერცხლისწყალი ნახევარი კი ტორიჩელის სიცარიელეს წარმოადგენდა. ვერცხლისწყლის წონა გაწონასწორებულ იყო აირის დრეკადობის ძალით ისე, რომ ვერცხლისწყლის წონის ცვალებადობა (გ-ს ცვალებადობის გამო) იწვევდა მენისკის გადაადგილების სკალაზე.

1.13.2. ჰაალკის გრავიმეტრი

1930 წ. ჰაალკმა ზემოთ აღწერილი გრავიმეტრის პრინციპზე დაყრდნობით შექმნა ხელსაწყო რომელიც 1938 წელს თვითონვე გააუმჯობესა. ეს უკანასკნელი მოდელი რთული სისტემის კაპილარული მილებისა და ჭურლებისაგან შედგება, რომლებშიც განთავსებულია დრეკადი აირი და ვერცხლისწყალი.



ნახ.1.13. ჰაალკის გრავიმეტრის სქემა

ჰაალკის ხელსაწყო შეიცავს ოთხ ასეთ აპარატს, რომელიც მდნობარე ყინულში თავსდება მუდმივი ტემპერატურის შენარჩუნების მიზნით.

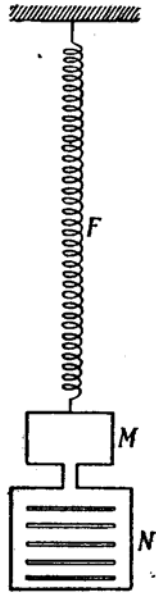
1.13.3. ნორგარდის მცურავი გრავიმეტრი

ნორგარდის გრავიმეტრიც ვერცხლისწყლის სვეტისა და დრეკადი აირის ურთიერთგაწონასწორებულ სისტემას წარმოადგენს, რომელიც ზეთით სავსე ჭურჭელში ცურავს. ეს სისტემა სიმძიმის ძალის ცვლილების მიხედვით ვერტიკალურად გადაადგილდება ზეთში და შედეგი აითვლება ვერტიკალურ სკალაზე.

უნდა შევნიშნოთ, რომ აქ აღწერილი აირიან-სითხიანი გრავიმეტრები სიმძიმის ძალის გაზომვის დაბალი სიზუსტისა და დიდი მასის გამო ნაკლებ ხელსაყრელია საექსპლუატაციოდ და ამიტომ არ მოგვყავს მათი დეტალური აღწერა.

1.13.4. გრაფის გრავიმეტრი

ლომონოსოვის გრავიმეტრის პარალელურად, თითქმის იმავე წლებში, უცხოეთში გამოიგონეს მექანიკური გრავიმეტრები რომელთა ავტორები იყვნენ: ტისენი, ხარტლი, გრაფი, და სხვები. ამათგან ყველაზე მეტი მოხერხებული და მისაღები არმოჩნდა გრაფის გრავიმეტრი. მისი მოწყობილობა და მუშაობის პრინციპი ასეთია:



ნახ.1.14. გრაფის გრავიმეტრის სქემა

სპირალურ ზამბარაზე ჰკიდია M -ტვირთი, რომელზეც დამაგრებულია ჰორიზონტალურ-ხვრელებიანი N -ეკრანი (ნახ.1.14). ამ ეკრანის პარალელურად მოთავსებულია მეორე უძრავი ისეთივე ეკრანი, რომლის წინ ნათურა ანთია. ორივე ეკრანის ხვრელებიდან გამოსული სინათლე ეცემა ფოტოელემენტს და მასში წარმოშობს ელექტრული დენი გადახრის წრედში ჩართული გალვანომეტრის ისარს. თუ M -ტვირთი გადაადგილება ვერტიკალურ სიბრტყეში, მაშინ ეკრანის ხვრელების განლაგება ერთმანეთის მიმართ შეიცვლება და ამიტომ შეიცვლება მათში აღძრული ელექტრული ძალაც. ცხადია, ეს ძალა M -ტვირთვის სიმძიმის ძალის ცვლილების შესაბამისი იქნება, რომლის გაზომვაც საშუალებას გვაძლევს შევაფასოთ g -ს ცვლილება.

ხელსაწყოს მზომი სისტემა თერმოსტატირებულია; მისი საერთო მასა შეადგენს 57 კგ-ს, ამიტომ მას ათავსებენ სპეციალურ მანქანაზე, სადაც იგი სათანადო ჭადის საშუალებით ეშვება მიწაზე დაკვირვებისათვის. გაზომვა წარმოებს ნულოვანი ხერხით. გრაფის გრავიმეტრის გაზომვის დიაპაზონი 1600 მილიგალია, სიზუსტე კი $\pm 0,1$ მილიგალი, ხოლო დაკვირვებისათვის საჭირო დრო დაახლოებით 55 წთ-ს შეადგენს.

ზოგადად გრავიმეტრებით დაკვირვების საერთო წესი ასეთია: თავდაპირველად ხელსაწყოს ათავსებენ საყრდენ პუნქტში, სადაც სიმძიმის ძალა

ცნობილია. ხელსაწყო მოჰყავთ თარაზაში და აითვლიან ხელსაწყოს ჩვენებას (n_0). ამ ოპერაციას გაიმეორებენ რამდენჯერ და გრავიმეტრს გაასწორებენ ისე, რომ ჩვენება იყოს ყოველთვის n_0 -ის ტოლი. შემდეგ ხელსაწყო გადააქვთ გამოსაკვლევ პუნქტში, სადაც მოიყვანენ მას თარაზოში და აითვლიან ხელსაწყოს ჩვენების (n_i). სხვაობა: $n_i - n_0$ წარმოადგენს გამოსაკვლევ დასაყრდენ პუნქტებს შორის სიმძიმის ძალის ნაზარდს. ე.ი.

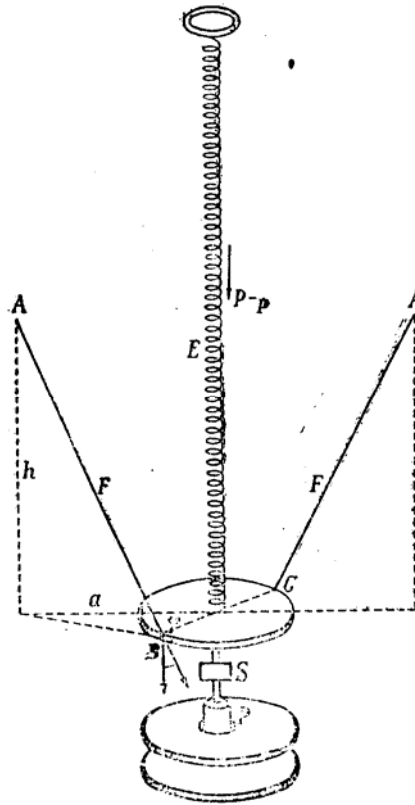
$$\Delta g_i = c(n_i - n_0) \quad (1.23)$$

სადაც c – ხელსაწყოს სკალის დანაყოფის ფასია მილიგალებში, რომელიც განისაზღვრება ლაბორატორიული წესით.

1.13.5. ბიფილარული გრავიმეტრები

მაღალი სიზუსტის გრავიმეტრებს ეკუთვნის აგრეთვე ტომაშევსკისა და შაფერნიხტის მიერ 1932 წელს კონსტრუირებული ბიფილარული გრავიმეტრი (ნახ.1.15). იგი შედგება სპირალური ზამბარისაგან, რომელზეც ჰკიდია ტვირთი, P, CB-ბადრო და S სარკე, რომელთა წონა ერთად შეადგენს P-ს. ბადროზე წრეხაზის მოპირდაპირე B და C წერტილებში მიბმულია FF ძაფები, რომელთა ზედა ბოლოები AA უძრავ წერტილებშია მიმაგრებული ისეთნაირად, რომ იკავებს საერთო ტვირთის წონის რაღაც q – ნაწილს.

ცხადია, რომ E – ზამბარის გაჭიმვა, რომელიც ხდება P- q ძალით გამოიწვევს BC ბადროს და მასთან ერთად S-სარკის მობრუნებას რაღაც φ -კუთხით. ეს კუთხე შეიძლება ძალიან დიდი სიზუსტით გაიზომოს ოპტიკური ხერხი და დაკვირვება ფოტოგრაფიული წესითაც იწარმოოს.



ნახ.1.15.ბიფილარული გრავიმეტრის სქემა

ეს გრავიმეტრი ზედმიწევნით მგრძნობიარეა ტემპერატურის მიამრთ. ამიტომ მას ათავსებენ ისეთ პირობებში, რომ ტემპერატურის ცვალებადობა არ აღემატებოდეს 0.001° -სს. ასეთ შემთხვევაში გრავიმეტრის სიზუსტე $\pm 0,01$ მილიგალია.

ხელსაწყოს ავტორებმა გრავიმეტრი გამოიყენეს მზისა და მთვარის მიზიდულობის ცვალებადობის შესაწავად, რისთვისაც იგი მოათავსეს ღრმა ჯამში, სადაც ტემპერატურა ფაქტიურად მუდმივად შეიძლება ჩაითვალოს.

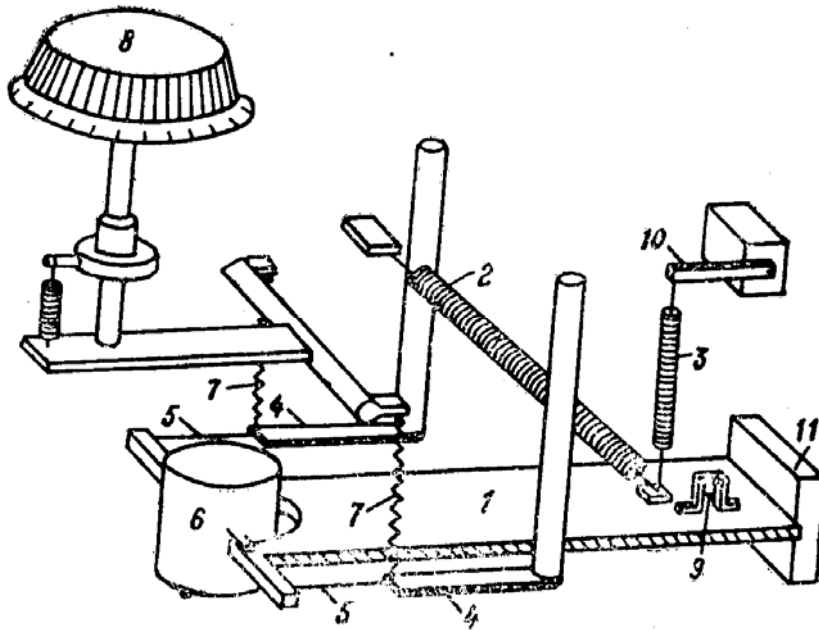
უნდა აღინიშნოს, რომ სამუშაო დიდი წარმატებით შესრულდა.

1.13.6. გრავიმეტრი «ჩრდილო ამერიკა»

ხელსაწყოს მთავარი ნაწილია ლითონის ზამზარიანი სასწორი, რომელიც შედგება ბრტყელი ბერკეტისაგან-1. მის ერთ ბოლოში მოთავსებულია ჰერმეტიკულად დახშული ღრუ ცილინდრი-ბაროკომპენსატორი-6. მეორეში კი

ტვირთი-11. ბერკეტის ბრუნვის ღერძი გადის ძაფების-5 ბრტყელ ზამზარასთან-4 მიმაგრების მახლობლბაში (ნახ.1.16)

ბერკეტის სიმძიმის ძალის მომენტს აწონასწორებს მთავარი ზამზარა-5 და სადიაპაზონო ზამზარა-3. მთელი სისტემა თერმოსტატირებულია.



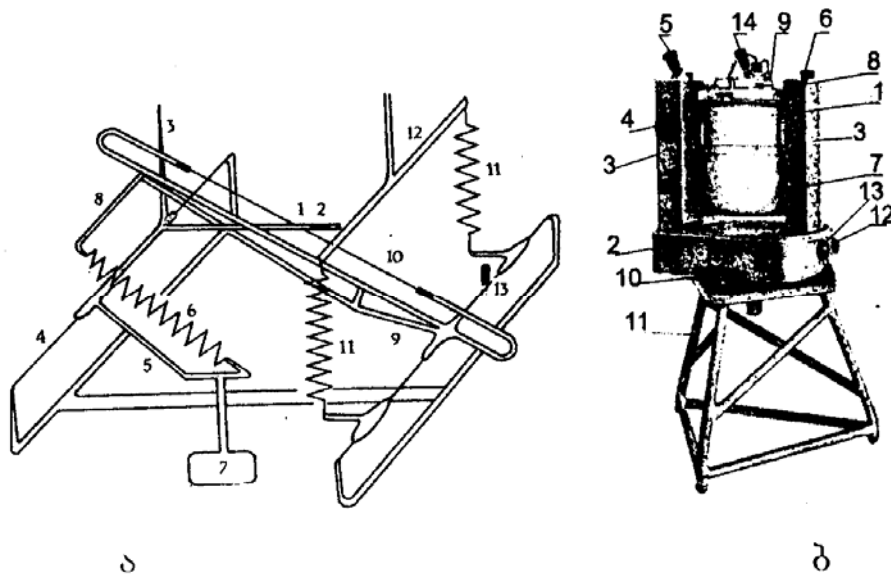
ნახ.1.16.გრავიმეტრის «ჩრდილო ამერიკა» სქემა

სიმძიმის ძალის შეცვლის შემთხვევაში ბერკეტი-1 გადაიხრება წონასწორობის მდებარეობის მდებარეობიდან, რაც შეიმჩნევა ბერკეტზე მოთავსებული ინდექსის – 9 გადაადგილებით. სიმძიმის ძალის ცვლილების კომპენსაცია წარმოებს მიკრომეტრული ხსნარის – 8 საშუალებით, რომლის შემობრუნებითაც იცვლება ზამზარის – 7 სიგრძე. თუ სიმძიმის ძალა შემცირდა მისი კომპენსაციისა თვის საჭიროა ზამზარის დაგრძელება. თუ გადიდა – დამოკლება. მიკრომეტრული ხრახნის ბრუნვითა რიცხვი შეესაბამება სიმძიმის ძალის ცვლილებას. სიმძიმის ძალის დიდი ცვლილების კომპენსაცია წარმოებს დიაპაზონური ზამზარის – 3 სიგრძის შეცვლით, რისთვისაც გამოიყენება დიაპაზონური მოწყობილობა – 10.

გრავიმეტრის მასაა 12 კგ .მცირე დიაპაზონზე მუშაობის დროს მისი სიზუსტეა $\pm 0,03$ მილიგალი.

1.13.7. გრავიმეტრი ГАГ -2¹

აღნიშნული ტიპის გრავიმეტრი წარმოადგენს გრავიმეტრ ГАЭ¹-ს მნიშვნელოვან გაუმჯობესებას. მისი დრეკადი სისტემა ასტაზირებულია და მოთავსებულია ორსფეროიან თერმოსტატში. იგი მაღალი სიზუსტის (0,01-0,02 მგლ) გრავიმეტრია. მისი მასშტაბური კოეფიციენტი 1-ის ტოლია და ამიტომ ეტალონირებას არ საჭიროებს.



ნახ.1.17. ა. გრავიმეტრი ГАГ -2-ის კვარცის სისტემის სქემა.

ბ. გრავიმეტრი ნახ.1.17. გრავიმეტრი ГАГ -2 სადგარი

ГАГ-2 გრავიმეტრის კვარცი სისტემის სქემა მოცემულია (ნახ.1.17 ა)-ზე. საქანი-1, პლატინის ტვირტი-2, ინდექსით-3, დამაგრებულია კვარცის ჰორიზონტალურ ძაფზე-4.ამავე კვარცის ძაფზე დამაგრებულია ბერკეტი-5, რომელზედაც მიმაგრებულია გაასტაზირებული ზამზარა-6 და ჰაეროვანი დემფერი-7. ზამზარა-6 ზედა ბოლოზე მინაზარდიტ – 8 მიმაგრებულია კვარცის ფერმიტ-9 ტემპერატურულ კომპენსატორთან. ტემპერატურის ცვლილებების დროს იცვლება

¹ ГАГ-Гравиметр астазирванный геодезический

ვოლფრამის ძაფის-10 სიგრძე, რაც იწვევს ზამბარა –6 დაწიმულობას, რომელიც აკომპანსირებს ტემპერატურის ცვლილების გამო საქანის-1 მობრუნებებს. სადიაპაზონო ზამბარები – 11 ზედა ბოლოებით დაკავშირებულია სერთო ბერკეტთან-12, რომელიც თავის მხრივ დაკავშირებულია მიკრომეტრულ სადიაპაზონო ხრახნთან. ზამბარები-11 დაკავშირებულია ერთი ჰორიზონტალური კვარცის ძაფით-13 ფერმასთან-9.

ГАГ-2 გრავიმეტრის საერთო სახე მოცემულია (ნახ.1.17 ბ)-ზე. მისი კორპუსი შედგება მოძრავი და უძრავი ნაწილებისაგან. მოძრავ ნაწილს წარმოადგენს ცილინდრი-1, რომელშიც მოთავსებულია (ნახ.1.17 ა)-ზე ნაჩვენები კვარცის სისტემა. უძრავი ნაწილი შედგება ფილისაგან-2, მასზე აღმართული ორი სვეტი-3, რომლებზედაც ეყრდნობა მოძრავი ცილინდრის ბრუნვის ღერძი. მარცხენა სვეტში მოთავსებულია 18 სმ. დიამეტრის მინის ლიმბი, რომელიც კვარცის სისტემის ცილინდრის მოძრავ ღერძთანაა დაკავშირებული. ლიმბი დაყოფილია 10^1 ბიჯით. დაყენება ხდება მიკრომეტრული ბარარბნით – 4, ათვლა კი მიკროსკოპიდან – 5. მარჯვენა სვეტში განლაგებული მოძრავი ცილინდრის დამამაგრებელი – 6 და მიკრომეტრული – 7 ხრახნები. მასზეა ასევე დახრების შემზღუდველი ხრახნი – 8. ხელსაწყოს თარაზოში-9 მოყვანა ხდება ამწევი ხრახნებით-10.

დაკვირვების წინ გრავიმეტრი იდგმება სადგარზე-11. მიყვანება თარაზოში ამწევი ხრახნებით-10. ამის შემდეგ ვამაგრებთ მათ ამწევი ხრახნების-12 და სისტემას ვუშვებთ არეტირიდან-13. გაზომვის დროს ვიმზირებით ოკულარში-14 და მოძრავ ცილინდრს ვხრით მანამ, ვიდრე ინდექსის გამოსახულება არ შეუთავსდება საკლის ნულოვან ხაზს.

ინდექსის შეთავსება ხდება ორჯერ: ერთი, როცა მოძრავი ცილინდრის ოკულარი-14 დახრილია ჩვენგან იქით (დადებითი დახრის კუთხე) და ჩვენსკენ (უარყოფითი კუთხე). თითოეული დახრის დროს ვერტიკალურ ლიმბზე ვიღებთ ანათვლებს. გაზომვის ამ ციკლს ვიმეორებთ 3-ჯერ ლიმბის $60^0 1' 40''$ დანაყოფით გადაყენების შემდეგ. თუ სამი გადაყენების შემდეგ ათვლილი 2β კუთხის მნიშვნელობები თანხვდენაშია $1''$ ფარგლებში, მაშინ ვწყვეტთ დაკვირვებას, თუ არა ვაგრძელებთ სასურველ შედეგამდე. [16; 17]

¹ ГАЭ – Гравиметр аэрогравиметрической экспедиции.

ბოლოს აღვნიშნავთ, რომ სპეციალური ცხრილების საშუალებით, რომლებიც მოყვება გრავიმეტრს სამუშაო ინსტრუქციასთან ერთად, გამოიანგარიშება პუნქტიდან პუნქტს შორის ძვ-მნიშვნელობები, ხოლო შემდეგ კი პუნქტზე გ-ს აბსოლუტური მნიშვნელობა.

1.13.8. გრავიმეტრი ГНУ-K1

ამ მარკის გრავიმეტრები მათი წინამორბედისაგან განსხვავდებიან მხოლოდ ტემპერატურის საკომპენსაციო გაუმჯობესებული სისტემით. თითქმის ყველა ამ გრავიმეტრის გაზომვის სიზუსტე შეადგენს მილიგალს, ხოლო მათი მცირე ზომები და მასა საშუალებას იძლევა გამოვიყენოთ ისინი რთულ რელიეფურ პირობებშიც კი.

გრავიმეტრით გაზომვა წარმოებს შემდეგნაირად:

გრავიმეტრს ათვასებენ მყარ სადგარზე, რთავენ განათებას და მოჰყავთ თარაზოში. ოკულარში აკვირდებიან ბერკეტის ინდექსის გამოსახულების მდებარეობას და მიკრომეტრული ხრახნის ფრთხილი ბრუნვით სკალის ნულოვან ხაზს დაამთხვევენ განათებული ზოლის შუა ადგილს და აიღებენ ანათვალს საზომი მოწყობილობის ლიმბზე და ნონიუსზე. თითოეულ პუნქტზე იღებენ 4-5 ანათვალს, რისთვისაც მიკრომეტრულ ხრახნს დააბრუნებენ უკან და კვლავ ახდენენ ბერკეტის ინდექსის თანხვდენას სკალის ნულოვან დანაყოფთან. ცხრილში შეაქვთ აგრეთვე დაკვირვების დაწყების და დამთავრების დრო, აგრეთვე თერმომეტრის ჩვენება.

აღნიშნული გრავიმეტრებით იზომება სიმძიმის ძალის ნაზრდი საკვლევ პუნქტებზე საყრდენი პუნქტების მიმართ, ანუ იმ პუნქტების მიმართ, სადაც სიმძიმის ძალის მნიშვნელობა წინასწარ ცნობილია. აქვე მგვყავს პუნქტზე დაკვირვების და სიმძიმის ძალის ნაზრდის (Δ_r) გამოსათვლელი ცხრილი ¹¹.

გაზომვის საშუალო კვადრატული ცდომილება ფასდება შემდეგი ფორმულით

$$m_{g_r} = \pm \sqrt{\frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \dots + \Delta_n^2}{n-1}}$$

სადაც Δ -არის δg_r -ების გადახრა საშუალო მნიშვნელობიდან, ხოლო n -გაზომვების რიცხვი.

$$\text{მაშასადამე, გვაქვს: } \delta g_r = g_1 - g_0 \quad \delta g_r = g_2 - g_0 \quad \dots \quad \delta g_r = g_n - g_0$$

$$\text{მაშინ } \overline{\delta g_r} = \frac{\delta g_{r_1} + \delta g_{r_2} + \dots + \delta g_{r_n}}{n}$$

$$\text{ხოლო } \Delta_1^2 = (\delta g_{r_1} - \overline{\delta g_r})^2, \quad \Delta_2^2 = (\delta g_{r_2} - \overline{\delta g_r})^2 \quad \dots \quad \Delta_n^2 = (\delta g_{r_n} - \overline{\delta g_r})^2$$

საბოლოოდ კი საკვლევ პუნქტში სიმძიმის ძალის აბსოლიტური მნიშვნელობა (g) გამოსავალ პუნქტში სიმძიმის ძალის მნიშვნელობისა (g) და გაზომილი ნაზრდის (δg_r) ალგებრული ჯამის ტოლი.

$$\text{ე.ი.} \quad g = g_0 + \delta g_r$$

ვიდრე გრავიმეტრების გამოკვლევაზე გადავიდოდეთ გვინდა ავღნიშნოთ, რომ ცხადია ჩვენ ვერ მოვიყვანთ ყველა გრავიმეტრის აღწერას, ამიტომ წარმოვადგენთ ცხრილს (12), რომლის მიუხედავაც დაინტერესებულ პირს შეუძლია გაეცნოს ამჟამად ხმარებაში არსებული გრავიმეტრების ფიზიკურ და ტექნიკურ მახასიათებლებს.

1.14. გრავიმეტრების გამოკვლევა

გრავიმეტრების გამოკვლევა და დარეგულირება წარმოებს ქარხანაში, სადაც მათი დამზადება ხდება. ამასთან, ძირითადია შემდეგი:

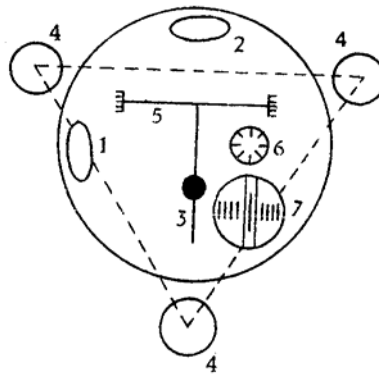
1. გრავიმეტრის დაყენება დახრისადმი მგრძნობიარობის მინიმუმზე (თარაზობის იუსტირება)
2. გრავიმეტრის სკალის დანაყოფის ფასის განსაზღვრა (ეტალონირება)
3. გრავიმეტრის ტემპერატურული მახასიათებლისა და ტემპერატურული კოეფიციენტის განსაზღვრა
4. გრავიმეტრის ნულპუნქტის გამოკვლევა.

გრავიმეტრების ექსპლუატაციის პირობებში ტრანსპორტირებისას ან ტემპერატურის მნიშვნელოვანი ცვლილების გამო გრავიმეტრის მუდმივები

შეიძლება შეიცვალოს, ამიტომ სავსელ მუშაობის წინ გრავიმეტრებს სჭირდებათ ლაბორატორიული გამოკვლევა.

1.14.1. გრავიმეტრების დაყენება დახრისადმი მგრძნობიარობის მინიმუმზე

გრავიმეტრებს თარაზოში მოყვანა, ანუ თარაზოების იუსტირება ხდება ურთიერთპერპენდიკულარულად დაყენებული სიგრძივი-1 და განივი-2 თარაზოებით, რისთვისაც გამოიყენება სამი დასაყენებელი ხრახნი (ნახ.1.18). თარაზოს, რომლის ღერძი კვარცის დრეკადი სისტემის ბერკეტის-3 პარალელურია, სიგრძივი ეწოდება, ხოლო თარაზოს, რომლის ღერძი პარალელურია ორი დასაყენებელი ხრახნის-4 შემაერთებელი ხაზისა და კვარცის დრეკადი სისტემის ბერკეტის ბრუნვის ღერძის-5 პარალელურად განივ თარაზოს უოდებენ. მაშასადამე, განივი თარაზოს სწორი დაყენება უზრუნველყოფს ბერკეტის ბრუნვის ღერძის ჰორიზონტალურობას, ხოლო სიგრძივი თარაზოს კი თვით ბერკეტის ჰორიზონტალურობას.



ნახ.1.18. გრავიმეტრის ხედი ზემოდან

გრავიმეტრზე დაკვირვება სრულდება ნულოვანი (კომპენსაციის) მეთოდით. მიკრომეტრის-6 ბრუნვით ოკულარში-7 ვათავსებთ რა საქანის გამოსახულების თეთრ ზოლში სკალის ნულოვან ხაზს (ნახ.1.18). ანათვალის ადების დროს გრავიმეტრი ისე უნდა იყოს დაყენებული, რომ მისი კვარცის სისტემის ძირითადი სიბრტყე, ანუ ბერკეტის ბრუნვის ღერძი და მისი სიმძიმის ცენტრი ერთ ჰორიზონტალურ სიბრტყეში მდებარეობდეს. ეს კი მაშინ მიიღება,

როცა თარაზოები ზუსტადაა დარეგულირებული. წინააღმდეგ შემთხვევაში, გავზომავთ არა g -ს, არამედ $g \cdot \cos \beta$ -ს, სადაც β -არის სიბრტყის ჰორიზონტისადმი დახრის კუთხე. ამიტომ, გაზომილ შედეგში შევა Δg -ცდომილება, რომელიც ტოლი იქნება:

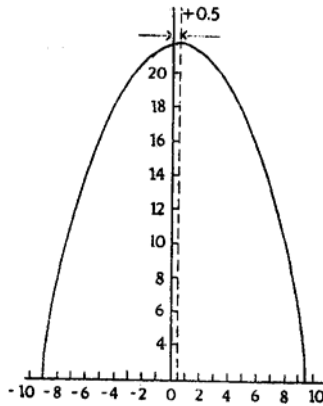
$$\Delta g = g - g \cos \beta = g(1 - \cos \beta)$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ

$$1 - \cos \beta = 2 \sin^2 \frac{\beta}{2}$$

$$\text{ანუ} \quad \Delta g = g \frac{\beta^2}{2} \quad (1.24)$$

(1.24) ფორმულის მიხედვით გამოდის, რომ გრავიმეტრში დახრა პარაბოლის მრუდით გამოიხატება (ნახ.1.19).



ნახ.1.19. გრავიმეტრის დახრის გავლენა ანათვლებზე

როგორც (ნახ.1.19)-დან ჩანს, როცა გრავიმეტრის ძირითადი სიბრტყე ჰორიზონტალურია ე.ი. $\beta = 0$, მაშინ დახრის კუთხის შეცვლას ნულის მახლობლობაში სიმძიმის ძალის მინიმალური ცვლილება შეესაბამება. ამიტომ ამბობენ, რომ ასეთ მდგომარეობაში გრავიმეტრი დაყენებულია დახრისადმი მინიმალურ მგრძნობიარობაზე.

ვიწყებთ ერთ-ერთი თარაზოს შემოწმებას, ვთქვათ განივის, თუმცა მიმდევრობას მნიშვნელობა არა აქვს. თარაზოების საშუალებით გრავიმეტრს ჰორიზონტალურ მდგომარეობაში ვაყენებთ. ვიღებთ ანათვალს. შემდეგ გრავიმეტრს ვხრით ჯერ ერთი მიმართულებით, რისთვისაც განივი თარაზოს ერთ-ერთ ამწევ ხრახნს 0,5 ბიჯით ვაბრუნებთ საათის ისრის ბრუნვის მიმართულებით (+) და გრავიმეტრზე ვიღებთ ანათვალს ყოველი მობრუნების

დროს. თუ განივი თარაზოს დახრის დროს სიგრძივი თარაზო ირღვევა, იგი ათვლის წინ უნდა გასწორდეს თავისი ამწევი ხრახნით. განივი თარაზოს ამწევი ხრახნის ორი სრული ბრუნის შემდეგ გრავიმეტრს ვაბრუნებთ საწყის მდგომარეობაში და კვლავ ვიღებთ ანათვალს. ამის შემდეგ იმავე ხრახნით გრავიმეტრს ვხრით საათის ისრის ბრუნვის საწინააღმდეგოდ (-) და კვლავ ვიღებთ ანათვალს გრავიმეტრზე ხრახნის ყოველი 0,5 ბიჯით მობრუნებისას. ორი სრული ბრუნვის შემდეგ კვლავ ვბრუნდებით საწყის მდგომარეობაში და ისევ ვიღებთ ანათვალს. მიღებული მნიშვნელობით ვაგებთ პარაბოლას, რომლის სიმეტრიის ღერძის გატარებით ვგებულობთ დარღვეულია თუ არა თარაზო. დარღვევის შემთხვევაში ვასწორებთ თარაზოს საშალით სიმეტრიის ღერძებს შორის არსებული განსხვავებული სიდიდით. კონტროლისათვის კვლავ ვხრით გრავიმეტრს აქეთ-იქეთ ხრახნის თითო სრული ბრუნვით. სიმეტრიული ანათვლების მიღების შემთხვევაში შეგვიძლია განივი თარაზო გასწორებულად ჩავთვალოთ.

ანალოგიურად წარმოებს სიგრძივი თარაზოს გასწორება. აქ მხედველობაში უნდა მივიღოთ ის, რომ ამ შემთხვევაში როგორც ბიჯი, ისე საერთო დახრაც შედარებით მცირე უნდა ავიღოთ.

1.14.2. გრავიმეტრის სკალის დანაყოფის ფასის განსაზღვრა

სიდიდეს, რომელიც გვიჩვენებს გრავიმეტრის სკალაზე ისრის თითოეულ გადახრას სიმძიმის ძალის რა ცვლილება შეესაბამება, ეწოდება გრავიმეტრის სკალის დანაყოფის ფასი.

თუ Δg სიმძიმის ძალის ცვლილებაა მილიგალებით, ხოლო $\Delta S = n_2 - n_1$ შესაბამისად მიკრომეტრულ ხრახნზე ანათვალთა სხვაობაა, მაშინ გამოსახულება

$$C = \frac{\Delta g}{n_2 - n_1} \quad (1.25)$$

გამოხატავს გრავიმეტრის სკალის დანაყოფის ფასს. სიცხადისათვის შევნიშნავთ, რომ ხელსაწყოს დანაყოფის ფასის შებრუნებულ სიდიდეს (K) ეწოდება მისი მგრძნობიარობა. მაშასადამე, გრავიმეტრის მგრძნობიარობა არის

სიდიდე, რომელიც გვიჩვენებს თუ სიმძიმის ძალის ერთეულოვან ცვლილებას სკალაზე ისრის რამდენი დანაყოფით გადაადგილება შეესაბამება. ეს სიდიდე ასე გამოისახება:

$$K = \frac{1}{C} = \frac{n_2 - n_1}{\Delta g} \quad (1.26)$$

არსებობს სავსელე გრავიმეტრების სკალის დანაყოფის ფასის განსაზღვრის ორი მეთოდი: დახრისა და პოლიგონის. ამ უკანასკნელი მეთოდის გამოყენების დროს პუნქტებზე წინასწარ ცნობილი უნდა იყოს სიმძიმის ძალის მნიშვნელობები.

დახრის მეთოდის დროს კი გამოყენებულია სიმძიმის ძალის მოჩვენებითი შემცირება გრავიმეტრის კვარცის სისტემის დახრის კუთხის შესაბამისად

$$\Delta g = g \frac{\beta^2}{2}$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ Δg სიდიდე სხვადასხვა დახრის კუთხის მიხედვით შემდეგნაირად იცვლება:

β	0°15'32"	0°34'44"	0°49'07"
Δg	10 მგლ	50 მგლ	100 მგლ

მაშინ მცირე დიაპაზონის მქონე გრავიმეტრების ეტალონირებისათვის სრულიად საკმარისია 1⁰-იანი დახრა.

გრავიმეტრების დახრის მეთოდით ეტალონირებისათვის შექმნილია სპეციალური ხელსაწყოები, მაგალითად УЭГ – (установка для эталонирования гравиметров) და УЭПГ-(იგივე სავსელე).

ხელსაწყო УЭГ –სმუშაობისას პრინციპი დამყარებულია გეოდეზიური ეგზამენატორის (გამომცდელის) მუშაობის პრინციპზე, რომელიც ცნობილია და ჩვენ აქ არ მოგვყავს.

1.14.3. გრავიმეტრის ტემპერატურული კოეფიციენტის განსაზღვრა

გრავიმეტრის ტემპერატურული კოეფიციენტის განსაზღვრა წარმოებს სპეციალურ თერმოკამერებში, სადაც ავტომატურად შეიძლება ტემპერატურის დაცვა, როგორც აღმავალი, ისე დაღმავალი მიმართულებით. გრავიმეტრზედროის გარკვეული შუალებით შესაბამის ტემპერატურაზე აიღება ანათვალის და გამოითვლება სიდიდე:

$$\delta g_t = c \cdot n$$

აღმავალი და დაღმავალი ტემპერატურის დროს ჩატარებული გაზომვების მნიშვნელობებით აიღება მრუდები, რომლებიც როგორც წესი არ ემთხვევიან ერთმანეთს. მათი გასაშუალებით ვღებულობთ ტემპერატურაზე შესწორების მრუდს. ამავე მონაცემებით შეიძლება გრავიმეტრის ტემპერატურული კოეფიციენტის განსაზღვრაც მრუდის სხვადასხვა უბნებზე:

$$k = \frac{\Delta g_2 - \Delta g_1}{\Delta t}$$

გრავიმეტრის ტემპერატურული კოეფიციენტის განსაზღვრა შესაძლებელია საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის გეოფიზიკის ინსტიტუტის გრავიმეტრის განყოფილებაში არსებულ თერმოკამერაში, რომელიც სპეციალურად შეიქმნა სხვადასხვა ტიპის გრავიმეტრების ტემპერატურული რეჟიმის შესასწავლად.

1.14.4. გრავიმეტრის ნულპუნქტის გამოკვლევა

როგორც წინათ აღვნიშნეთ, კვარცის ასტაზირებულ გრავიმეტრებს გააჩნიათ ნულპუნქტის სვლა, ვინაიდან საქანს არეტირი არ აქვს და იგი სიმძიმის ძალის მოქმედებით მუდმივად ჭიმავს კვარცის ძაფს. ამის გამო სავსე მუშაობის დაწყების წინ აუცილებელია ვიცოდეთ ნულპუნქტის როგორი სვლა აქვს მოცემულ გრავიმეტრს.

ამ მიზნით იდგმება ხელსაწყო ლაბორატორიული ოთახის პოსტამენტზე, სასურველია თერმოკამერაში, იმისათვის, რომ ტემპერატურის ცვალებადობა არ

იყოს და რამოდენიმე დღის განმავლობაში ვიღებთ ანათვალს ხელსაწყოზე, სასურველია ერთი და იმავე τ დროის შუალედით.

მიღებული მონაცემებით ვაგებს გრაფიკს გრავიმეტრის $\delta\tau$ ანათვლებისა და შესაბამისად τ დროს შორის. ამით ვანგარიშობთ კოეფიციენტს დროის სხვადასხვა მონაკვეთში

$$k = \frac{\delta\tau_2 - \delta\tau_1}{\Delta\tau}$$

გრაფიკის მიხედვით ვადგენთ თუ როგორი ნულპუნქტი (ხაზოვანი თუ არახაზოვანი) აქვს მოცემულ გრავიმეტრს.

ჩვენი პრაქტიკიდან გამომდინარე ვთვლით, რომ გრავიმეტრთა უმრავლესობას ხაზოვანი ნულპუნქტი აქვს. ეს კი საშუალებას იძლევა რეისებში, გარკვეულ პუნქტებზე ჩატარებული გაზომვების შემდეგ დავბრუნდეთ გამოსავალ პუნქტზე, გავაკეთოთ განმეორებითი გაზომვა და გამოვთვალოთ k -კოეფიციენტი. ე.ი. გამოვთვალოთ ნულპუნქტის სვლა საათში.

გვეცოდინება რა ნულპუნქტის სვლა საათში, ვიანგარიშებთ საკვლევ პუნქტებში გასული დროის მიხედვით ნულპუნქტის სიდიდეს და შევიტანთ შესაბამის შესწორებებს გასაზომ სიდიდეში.

2. ზოგიერთი ბარემო ფაქტორის გავლენა ბრავიმიეტრის

მუშაობაზე და მათი ბარემორიცხვის მეთოდები

2.1 გარემოს ტემპერატურის ცვლილების გავლენა

გრავიმეტრის მუშაობაზე

ნებისმიერი ტიპის გრავიმეტრის, დინამიკური იქნება თუ სტატიკური, მთავარ ელემენტს წარმოადგენს საქანი ან მგრძნობიარე ზამბარაზე დაკიდებული ტვირტი. უნდა აღინიშნოს, რომ საქანის პერიოდი და მგრძნობიარე ზამბარის სიგრძე იცვლება არა მარტო g -ს ცვლილებით, არამედ გარემოს ტემპერატურის ცვლილებითაც, რაც მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს გრავიმეტრის ჩვენებაზე.

დავამყაროთ კავშირი საქანიან გრავიმეტრებში გარემოს ტემპერატურის ცვლილებასა და საქანის პერიოდის ცვლილებას შორის.

ვთქვათ, საქანის სიგრძე t_0 C-ზე არის l_0 , ხოლო მისი მასალის ტემპერატურული წრფივი გაფართოების კოეფიციენტი α .

დავუშვათ ტემპერატურა შეიცვალა $\Delta t^\circ\text{C}$ -ით. გამოვთვალოთ როგორ შეიცვლება საქანის რხევის პერიოდი.

ცხადია, l_0 -სიგრძის საქანის რხევის პერიოდი იქნება:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l_0}{g}}$$

$\Delta t^\circ\text{C}$ -ით გათბობის შემდეგ საქანის სიგრძე გახდება $l = l_0(1 + \alpha\Delta t)$, მაშინ პიროდიც შეიცვლება და გახდება:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l_0(1 + \alpha\Delta t)}{g}}$$

საქანის რხევის პერიოდის ცვლილება იქნება:

$$\begin{aligned} \Delta T = T - T_0 &= 2\pi \sqrt{\frac{l_0(1 + \alpha\Delta t)}{g}} - 2\pi \sqrt{\frac{l_0}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{l_0}{g}} (\sqrt{1 + \alpha\Delta t} - 1) = \\ &= 2\pi \sqrt{\frac{l_0}{g}} \left(\sqrt{1 + 2\frac{\alpha\Delta t}{2} + \frac{\alpha^2\Delta t^2}{4} - \frac{\alpha^2\Delta t^2}{4}} - 1 \right) = 2\pi \sqrt{\frac{l_0}{g}} \left(\sqrt{\left(1 + \frac{\alpha\Delta t}{2}\right)^2} - 1 \right) = \\ &= 2\pi \sqrt{\frac{l_0}{g}} \left(1 + \frac{\alpha\Delta t}{2} - 1 \right) = \pi\alpha\Delta t \sqrt{\frac{l_0}{g}} \end{aligned}$$

ე.ი.
$$\Delta T = \pi\alpha\Delta t \sqrt{\frac{l_0}{g}} \quad (2.1)$$

ეს უსკანასკნელი ტოლობა გამოხატავს დამოკიდებულებას გარემოს ტემპერატურის ცვლილებასა და საქანის რხევის პერიოდს შორის.

თუ გრავიმეტრის დრეკადი სისტემა სითხეში ან დიუარის ჭურჭელშია მოთავსებული, მაშინ გარემოს ტემპერატურის გავლენა ნაწილობრივია. ეს ნარჩენი გავლენა მცირეა და ამიტომ შეიძლება მიახლოებითი კვადრატული დამოკიდებულებით გამოისახოს

$$\delta g_t = k(t - t_0)^2 \quad (2.2)$$

სადაც δg_t —ტემპერატურის გავლენით გამოწვეული სიმძიმის ძალის ცვლილებაა; t —ტემპერატურის მნიშვნელობაა მოცემულ მომენტში. t_0 კი

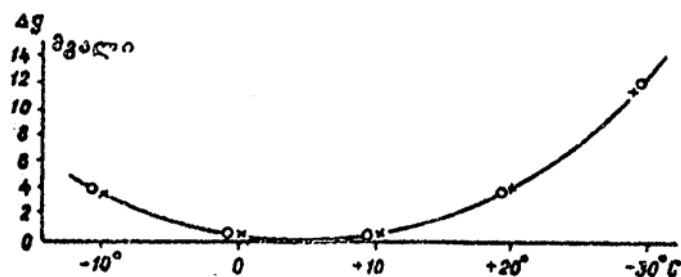
ტემპერატურის ის მნიშვნელობაა, რომლის დროსაც $\delta g = 0$, ე.ი. შეესაბამება პარაბოლის წვეროს. K –ტემპერატურული კოეფიციენტი

(2.2) დამოკიდებულება სამართლიანია იმ შემთხვევაში თუ გარემოს ტემპერატურა ნელა იცვლება. ამიტომ ტემპერატურის სარედუქციო მუხლის განსაზღვრა თერმოკამერაში ტემპერატურის ნელი ცვლის პირობებში უნდა მოხდეს.

ტემპერატურული სარედუქციო მრუდის, ან რაც იგივეა, გრავიმეტრის ტემპერატურული კოეფიციენტის განსაზღვრის რამდენიმე ხერხი არსებობს.

ა) პირდაპირი და შებრუნებული სვლის მეთოდი

გრავიმეტრის ტემპერატურული კოეფიციენტის განსაზღვრის მიზნით ხელსაწყოს ათავსებენ თერმოკამერაში, სადაც შესაძლებელია ტემპერატურის ცვლა საჭირო სიჩქარით მოცემულ შუალედში. ჯერ ათბობენ გრავიმეტრს t_2 –გრადუსამდე და შემდეგ იმავე ტემპით აცივებენ t_1 –გრადუსამდე. ამავე დროს, ვთქვათ, ყოველ საათში აწარმოებენ გრავიმეტრის და თერმომეტრის შესაბამის ჩვენებათა ათვლას, როგორც ტემპერატურის ზრდის, ისე შემცირების პირობებში. ამ მასალის სათანადო დამუშავების შემდეგ აგებენ ორ მრუდს, რომელთაგან ერთი შეესაბამება გათბობას, ხოლო მეორე გაცივებას. აღმოჩნდა, რომ ისინი ემთხვევიან ერთმანეთს მხოლოდ საწყის მომენტში ($t=t_1$), ხოლო შემდეგ თანდათან შორდებიან. გამოდის, რომ დრეკადი სისტემა ერთნაირად არ პასუხობს გათბობასა და გაცივებას. მათ შორის განსხვავება მით მეტია, რაც მეტია ტემპერატურული გრადიენტი. სარედუქციო მრუდი იგება როგორც ამ ორი მრუდის საშუალო, რადგან ფიქრობენ, რომ ასეთი მრუდი უფრო ახლოსაა ჭეშმარიტებასთან. (ნახ.2.1)



ნახ.2.1. ტემპერატურის სარედუქციო მრუდი

ბ) სინუსოიდის მეთოდი

ეს მეთოდი გამოიყენება ტემპერატურული განსაზღვრისათვის სავსე პირობებში. სადაც გრავიმეტრს ათავსებენ დახურულ კარავში, რომელიც დღისით თბება მზის სხივებით და ღამით ცივდება. ამ პირობებში აწარმოებენ გრავიმეტრის და თერმომეტრის ჩვენებათა ათვლას დროის გარკვეულ შუალედში და მიღებული მასალის დამუშავების შემდეგ აგებენ სარედუქციო ტემპერატურულ მრუდს. ეს მეთოდი ზემოთ აღწერილს ემსგავსება.

უნდა აღინიშნოს, რომ ტემპერატურის გავლენისაგან თავდასაღწევად ხშირ შემთხვევაში მიმართავენ გრავიმეტრების თერმოსტატირებას, რომელიც უზრუნველყოფს 40°C ტემპერატურის შენარჩუნებას $0,01$ სიზუსტით.

2.2 ატმოსფერული წნევის ცვლილების გავლენა

ატმოსფერული წნევა გრავიმეტრის დრეკად სისტემაზე აწარმოებს ზემოქმედებას ძალით, რომელსაც აეროსტატიკური ამომგდები ძალა ეწოდება. არქიმედეს კანონის თანახმად იგი გამოდევნილი ჰაერის წონის ტოლია, მიმართულია ზევით და ამგვარად, გარემომცველი ჰაერის სიმკვრივის გაზრდის შემთხვევაში იწვევს სიმძიმის ძალის შემცირებას.

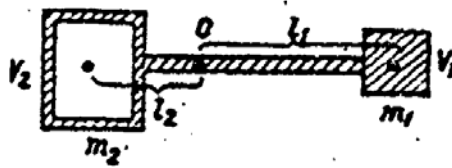
აღსანიშნავია, რომ აეროსტატიკური ეფექტის გამორიცხვა უფრო ადვილია, ვიდრე მისი გამოთვლა დაკვირვების ყოველი მომენტისათვის. ამ მიზნით გრავიმეტრის დრეკად სისტემას ათავსებენ სითხეში ან ვაკუუმში, ან კიდევ უკეთებენ მას ბარომეტრულ კომპენსატორს. ბარომეტრული კომპენსაცია იმაში მდგომარეობს, რომ სისტემის მოცულობითი მომენტი არ უნდა არსებობდეს, რაც კარგად ხორციელდება ისეთ გრავიმეტრებში, რომლებშიაც ტვირთი, და მასასადამე ბერკეტიც, მოზრუნებით მოძრაობას აწარმოებს.

ბარომეტრული კომპენსატორი წარმოადგენს ორ ბალონს (ერთი მათგანი მასიურია), რომლებიც მოთავსებულია სისტემის ბრუნვის ორივე მხარეზე. ისინი ისეა შერჩეული, რომ მათი მოცულობითი მომენტები ტოლია

$$\text{ე.ი. } V_1 l_1 = V_2 l_2$$

ხოლო მასების მომენტები კი მკვეთრადაა განსხვავებული ერთმანეთისაგან ე.ი.

$$m_1 l_1 \gg m_2 l_2$$



ნახ.2.2. ბაროკომპენსატორის სქემა

იმის გამო, რომ თითოეულ ბალონს აქვს უნარი გამოდევნოს ჰაერის თანასწორი რაოდენობის მასა, ამიტომ სისტემაზე მოქმედ აეროსტატიკურ ძალათა მომენტების ჯამიც ნულის ტოლია

$$M = \sigma g \sum l_i V_i = 0$$

სადაც σ – ჰაერის სიკვრივეა

თუ ხელსაწყოში ბაროკომპენსატორი არ არის, მაშინ საჭიროა განისაზღვროს გრავიმეტრის ბარომეტრული კოეფიციენტი g_i , რისთვისაც სპეციალურ ბაროკამერაში აწარმოებენ დაკვირვებებს სხვადასხვა წნევის პირობებში. ამ შემთხვევაში g_i -ს გამოსათვლელი ფორმულა ასეთია:

$$g_i = c \frac{m - m_0}{P - P_0}$$

სადაც $P - P_0$ ჰაერის წნევის სხვაობაა მოცემულ შუალედში;

$m - m_0$ კი მიკრომეტრზე შეაბამის ანათვალთა სხვაობაა; C -მიკრომეტრის დანაყოფის ფასია მილიგალებში.

ბარომეტრული წნევის გავლენის შესწორება გამოითვლება ფორმულით:

$$\delta g_B = g_i \frac{B - B_0}{760 \left(1 + \frac{1}{273^0} \right)}$$

აქ $B - B_0$ ჰაერის წნევის სხვაობაა ანეროიდსა და ნორმლურ ბარომეტრის ჩვენებათა შორის; t -ხელსაწყოს შიგა ტემპერატურაა.

2.3 მაგნიტური ველის ცვლილების გავლენა

იმ მიზნით, რომ გრავიმეტრზე რაც შეიძლება ნაკლები გავლენა იქონიოს დედამიწის მაგნიტური ველის ცვლილებამ, მის დრეკად ელემენტს ამზადებენ ელინვარისაგან, რომელსაც სუსტი მაგნიტური თვისებები გააჩნია. მიუხედავად ამისა ხელსაწყოს მაგნიტური ეფექტის შესწავლა მაინც აუცილებელია. განსაკუთრებით იმ შემთხვევაში, როდესაც სამუშაო რეგიონი ხასიათდება მაღალი მაგნიტური ველით. ხელსაწყოს საზომი სისტემის მაგნიტური ეფექტის შესწავლისათვის მას ათავსებენ ჰელმოჰოლცის კოჭებს შორის და ხელსაწყოზე ანათვალს იღებენ ველის სხვადასხვა დამაბულობის პირობებში.

ჰელმოჰოლცის კოჭების მიერ შექმნილი მაგნიტური ველი გამოითვლება ფორმულით:

$$H = 0,9 \frac{In}{R}$$

სადაც H –მაგნიტური ველის დამაბულობაა ერსტედებში; I -კოჭებში გატარებული დენის ძალაა ამპერებში; R -კოჭების რადიუსია სანტიმეტრებში და n –ხვიათა რიცხვი.

მაგნიტური ველის გავლენა გრავიმეტრის ჩვენებაზე გამოითვლება ფორმულით:

$$\delta g_m = aZ + bH \cos A_M$$

სადაც Z და H გეომაგნიტური ველის დამაბულობის ვერტიკალური და ჰორიზონტალური მდგენელებია შესაბამისად; A_M -ხელსაწყოს მაგნიტური აზიმუტია, რომელიც აითვლება მერიდიანის სიბრტყიდან როცა მას ემთხვევა წრიული ზამბარის სიბრტყე და CE–ბერკეტის ტვირთი მიმართულია სამხრეთისაკენ; a და b გრავიმეტრის ვერტიკალური და ჰორიზონტალური მაგნიტური კოეფიციენტებია, რომლებიც შემდეგნაირად გამოისახებიან:

$$a = \frac{S_b - S_0}{H_b} \quad \text{და} \quad b = \frac{S_r - S_0}{H_r}$$

სადაც S_b ანათვალაია მიკრომეტრზე, როცა მაგნიტური ველის ჰორიზონტალური დამაბულობაა H_b ; S_0 –ანათვალაია მიკრომეტრზე, როცა კოჭებში დენი არ არის; S_r არის ანათვალაია მიკრომეტრზე, როცა ველის ვერტიკალური დამაბულობაა H_r .

δg_m შესწორება შეაქვთ იმ რაიონებში, სადაც ველი განსაკუთრებით ანომალურია. საზოგადოდ კი, გეომაგნიტური ველის გავლენა ყველა პუნქტზე ერთი და იმავე რიგისაა.

მაგნიტური ველის გავლენის შესამცირებლად თერმოსტატის ერთ-ერთი გარსი დამზადებულია განსაკუთრებული შედნობისაგან–ჰერმალისაგან, რომელსაც დიდი მაგნიტური შეღწევადობა ახასიათებს.

2.4 ატმოსფერული ჰაერის წნევის ცვლილების გავლენა სიმძიმის ძალაზე

ატმოსფერული ჰაერის წნევა და სიმკვრივე ძალიან ხშირად იცვლება და ქმნის ცვლად დატვირთვებს ხმელეთისა თუ ზღვის ზედაპირებზე. ცხადია აგრეთვე ზღვის ფსკერზედაც, რის გამოც იწვევს დეფორმაციას. თუ სიმძიმის ძალა იზომება 1 მკვლ სიზუსტით, მაშინ მხედველობაში უნდა იქნას მიღებული ატმოსფერული ჰაერის ცვლადი ანომალური მასების როგორც უშუალოდ მიზიდულობის ეფექტი, ასევე მათ მიერ გამოწვეული დეფორმაციებიც.

ატმოსფეროს ცვლადი ანომალური მასები იკავებენ შედარებით მცირე მოცულობას (τ), ვრცელდებიან რა რამოდენიმე ათეულ კოლომეტრზე დედამიწის ზედაპირიდან. ამ მასათა პოტენციალია:

$$U^\tau(r, \varphi, \lambda) = f \int_{\tau} \frac{\delta(r', \varphi', \lambda')}{l'} d\tau$$

$$\text{სადაც } \bar{l}' = \bar{r}(\varphi, \lambda) - \bar{r}'(\varphi', \lambda'); \quad \cos \varphi = \frac{\bar{r} \bar{r}'}{r \bar{r}'}$$

$$d\tau = r'^2 dr' dw; \quad dw = \sin \varphi d\varphi d\alpha$$

ატმოსფეროს სიმკვრივეა

ანომალურ მასათა გავლენა სიმძიმის ძალაზე გამოითვლება

წარმოებულით $-\frac{\partial u^\tau}{\partial r}$. ამ გზით ჩატარებულმა გამოთვლებმა აჩვენეს, რომ

აღნიშნული გავლენები აღწევენ ათეულობით მიკროგალს.

ამ გამოთვლებში გათვალისწინებულია, რომ ჰაერის სიმკვრივე ცნობილი წესით იცვლება სიმაღლის მიხედვით, ხოლო ატმოსფერული ჰაერის სვეტი კონდენსირდება სფეროს სახით, რომლის რადიუსი (ρ), რამოდენიმეჯერ აღემატება გრავიმეტრიული პუნქტის რადიუსვექტორს r -ს.

ამ მასათა მიზიდულობის პოტენციალს განვიხილავთ, როგორც ჩვეულებრივი სფეროს პოტენციალს ზედაპირული სიმკვრივით $\frac{\Delta p}{g}$:

$$u(r, \rho, \lambda) = \frac{f\rho^2}{g} \int_w \frac{\Delta p(\rho, \rho', \lambda')}{l_0} dw \quad (2.3)$$

$$\text{სადაც } l_0 = l' \quad r' = \rho$$

პოტენციალი u -გამოითვლება გრავიმეტრიული პუნქტისათვის, როცა $r < \rho$. რაიმე განსაკუთრებული შემთხვევისათვის, მაგალითად როცა პუნქტი იმყოფება უშუალოდ ზღვის ნაპირთან u^r -ს შეცვლა u -თი მნიშვნელოვან შეცდომას მოგვცემს და ამიტომ უნდა შემოვიტანოთ დამატებითი შესწორება ($U^r - U$), რომელიც ითვალისწინებს გრავიმეტრიულ პუნქტებში ჰაერის მასების რეალურ განაწილებას.

ზღვის ზედაპირზე ჰაერის სვეტის წონის ნამატი ΔP იწვევს ზრვის წყლის გადინებას სხვადასხვა მიმართულებით. თუ წარმოქმნილი ΔP -არსებობს დიდი ხნის განმავლობაში მაშინ ცხადია გადინებული ზღვის წყლის წონა $g\delta_0 h$ სადაც δ_0 -სიმკვრივეა ხოლო h -სიმაღლე ტოლი იქნება ΔP -სი. მათი ფარდობა ავლნიშნოთ q -თი და გვექნება:

$$q = \frac{g\delta_0 h}{\Delta p} \leq 1$$

დავუშვათ ყველა ზღვების ზედაპირები ერთეულოვან სფეროზე ω ამოკვეთენ ω_m -ნაწილს მაშინ ზღვის ზედაპირზე ჰაერის მასების პოტენციალისთვის, გადადინების გათვალისწინებით, გვექნება:

$$u^m = \frac{f\rho^2}{g} \int_{\omega_m} \frac{\Delta p}{l_0} dw - fR^2 \int_{\omega_m} \frac{\delta_0 h}{l} dw = \frac{f\rho^2}{g} \int_{\omega_m} \Delta p \left(\frac{1}{l_0} - \frac{q}{l} \right) dw$$

$$\text{სადაც } l = l' \quad r' = R; \quad H = \rho - R$$

$$u^m = \frac{f\rho^2}{g} \int_{\omega_m} \left(\frac{1-q}{l_0} + Hq \frac{\partial \frac{1}{l_0}}{\partial \rho} \right) dw$$

ზღვების ზედაპირზე არსებული ჰაერის მასების გავლენა სიმძიმის ძალაზე განისაზღვრება წარმოებულით:

$$\Delta g^m = -\left. \frac{\partial u^m}{\partial r} \right|_{r=p} = \frac{f}{4g_{wm}} \int \Delta p \left[(1-q) \operatorname{cosec} \frac{\varphi}{2} - \frac{H}{2R} q \operatorname{cosec}^3 \frac{\varphi}{2} \left(\cos \varphi + 3 \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right) \right] dw \quad (2.4)$$

(2.4) ინტეგრალის ბირთვს რაიმე განსაკუთრებულობები არ გააჩნია, რადგან Δg^m იზომება ხმელეთზე არსებულ გრავიმეტრულ პუნქტში, ხოლო ინტეგრება ხდება ზღვების ზედაპირებზე. ინტერესების დროს პარამეტრი q მართლია ნელა იცვლება, მაგრამ ჩვეულებრივი ქარიშხლების დროს რომლებიც რამდენიმე დღე გრძელდება, ზღვის დონე 60-70%-ით მიუახლოვდეს ნავარაუდებ დონეს და $q=0,6+0,7$. თუ ატმოსფერული წნევა ერთდროულად და სწრაფად იცვლება ზღვის ზედაპირის დიდ ფართობზე მაშინ იგი სავსებით არ დეფორმირდება ($q=0$) და გავლენა ტოლია პირდაპირი ეფექტის. ატმოსფერული წნევის ნელა ცვლილების შემთხვევაში ზღვის ზედაპირი ასწრებს მიიღოს წონასწორული მდებარეობა $q=1$ და (2.4) ფორმულა გვიჩვენებს, რომ ატმოსფერული წნევის სწრაფი და ნელი ცვლილების სიმძიმის ძალაზე გავლენას სხვადასხვა ნიშანი აქვს და ყოველთვის შედარებით ნაკლებია პირდაპირი ეფექტით მიზიდულობასთან შედარებით.

ატმოსფერული წნევის ცვალებადობა ხმელეთზე პირდაპირი ეფექტის გარდა იწვევს მის დრეკად დეფორმაციას. დეფორმაციას იწვევს აგრეთვე ზღვის ფსკერზე წყლის ცვლადი მასების მოქმედება, რომელიც ტოლია. $(1-q) \Delta P$.

ხმელეთზე და ზღვის ფსკერზე მოქმედი მადეფორმირებელი მასების მიზიდულობის ჯამურ პოტენციალს u^s (2.3) ფორმულის მიხედვით აქვს სახე:

$$u^s = \frac{f\rho^2}{g} \int_{ws} \frac{\Delta p}{l_0} dw + \frac{fR^2}{g} \int_{wm} \frac{\Delta p'}{l} dw = u^s + u^m$$

და მიზიდულობის პირდაპირი ეფექტი კი

$$-\left. \frac{\partial u^s}{\partial r} \right|_{r \rightarrow \rho} - \left. \frac{\partial u^m}{\partial r} \right|_{r \rightarrow \rho} = \frac{f}{g} \left[-2\pi \Delta p + \frac{1}{4} \int_{ws} \Delta p \operatorname{cosec} \frac{\varphi}{2} dw + \frac{1}{4\pi} \int_{wm} \Delta p' \operatorname{cosec} \frac{\varphi}{2} dw \right] \quad (2.5)$$

შემდგომში გამოიყენება დრეკადი სფეროს დეფორმაციის თეორია, რომელიც განიცდის ზედაპირულ დატვირთვას. ამ მიზნით წნევები ΔP , $\Delta P'$ და პოტენციალი U^s გავშალოთ სფერული ფუნქციის მიხედვით, გვექნება:

$$\Delta p = \sum_{n=0}^{\infty} \Delta p_n; \quad \Delta p' = \sum_{n=0}^{\infty} \Delta p'_n; \quad u^s = \sum_{n=0}^{\infty} u_n^s = \sum_{n=0}^{\infty} u_n^s + \sum_{n=0}^{\infty} u_n^m$$

u^s -პოტენციალი გამოითვლება გარე წერტილში, ხოლო $-$ პოტენციალი კი შიგა წერტილში, ამიტომ

$$u_n^s = \frac{f\rho}{g} 4\pi \left(\frac{r}{\rho}\right)^n \frac{\Delta p_n}{2n+1}; \quad u_n^m = \frac{fR}{g} 4\pi \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \frac{\Delta p'_n}{2n+1}$$

u_n^s და u_n^m პოტენციალების შემქმნელი მასები იზიდავენ დედამიწას, ხოლო Δp_n და $\Delta p'_n$ წნევები კი დრეკენ მას. ერთობლივად ეს ურთიერთსაწინააღმდეგო ეფექტები იწვევენ ზედაპირის ვერიკალურ დეფორმაციას სიდიდით;

$$\varepsilon_n = h'_n \frac{u_n^s - u_n^m}{g}$$

სადაც h'_n -პირველი დატვირთვის კოეფიციენტია. დედამიწის დეფორმაციის გამო u^s -პოტენციალი ლეზულობს ნაზარდს $K'_n u^s$ სადაც K'_n -დატვირთვის მეორე კოეფიციენტია.

შესაბამისი $K'_n u^s$ გავლენა სიმძიმის ძალაზე Δg_n^m ჩავწერთ ასე:

$$\Delta g_n^{s'} = -K'_n \frac{\partial u_n^s}{\partial r} = -4\pi \frac{fR}{gr} \frac{K'_n}{2n+1} \left[n \left(\frac{r}{\rho}\right)^n \Delta p_n - (n+1) \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \Delta p'_n \right]$$

ახლა Δg_n^s გამოვთვალოთ დეფორმირებულ დედამიწაზე, უფრო სწორად მის $r'_n = r + S_n$ ზედაპირზე. თუ შემოვიფარგლებით წრფივი წვერებით, მაშინ შესწორებას მიიღებს არა $\Delta g_n^{s'}$ არამედ მხოლოდ სიმძიმის ძალა $g_n = g_0 \left(\frac{r}{r'_n}\right)^2$

$$\text{კერძოდ: } g_n = g_0 \left(\frac{r}{r + S_n}\right)^2 = g_0 - 2h'_n \frac{u_n^{s'}}{2}$$

ასე, რომ დედამიწის ზედაპირზე, მისი დეფორმაციის გათვალისწინებით ვღებულობთ:

$$\Delta g_n^s = -4\pi \frac{f}{g} \{ [n\Delta p_n - (n+1)\Delta p'_n] K'_n + 2(\Delta p_n + \Delta p'_n) \} \frac{1}{2n+1}$$

ყველა n -სათვის აჯამვით ვრეზულობთ სიმძიმის ძალაზე დაფორმაციის მთლიან გავლენას

$$\sum_{n=0}^{\infty} \Delta g_n^{s'} = 4\pi \frac{f}{g} \sum_{n=0}^{\infty} (B_n \Delta p_n + C_n \Delta p'_n)$$

სადაც

$$B_n = -\frac{2h'n + nK'_n}{2n+1}; \quad C_n = -\frac{2h'n - (C+1)K'_n}{2n+1} \quad (2.6)$$

სიმძიმის ძალაზე ყველა განხილული ფაქტორის ერთობლივი მოქმედება მიიღება (2.4.); (2.5) და (2.6) ტოლობების შეკრებით.

$$\Delta g = \left[-2\pi \frac{f}{g} \Delta p + \frac{f}{4g} \int_{ws} \Delta p \cos ec \frac{\varphi}{2} dw \right] + \frac{f}{2g} \int_{wm} \Delta p' \cos ec \frac{\varphi}{2} dw - \frac{Hf}{8Rg} \int_{wm} q \Delta p \cos ec^3 \frac{\varphi}{2} \left(\cos \varphi + 3 \sin^3 \frac{\varphi}{2} \right) dw + 4\pi \frac{f}{g} \sum_{n=0}^{\infty} (B_n \Delta p + C_n \Delta P_n) \quad (2.7)$$

ამ ტოლობაში პირველი წევრი ითვალისწინებს ანომალური მასების (ხმელეთზე) პირდაპირი მიზიდულობის ეფექტს. $\Delta P = \text{const}$ ω'_s -წრეში, რომლის რადიუსია $R\varphi_0$, მაშინ

$$\Delta g_1 = -0,427 \Delta p \left(1 - \sin \frac{\varphi_0}{2} \right) + 0,0679 \int_{w's} \Delta p \cos ec \frac{\varphi}{2} dw \quad (2.8)$$

აქ Δg_1 -გამოსახულია მიკროგალებით, ΔP -მილიბარებით. ω'_s -არის ω_s წრის გარეთ არსებული ხმელეთის ნაწილი.

ცდები გვიჩვენებს, რომ -აღწევს ათეულობით მიკროგალს.

ამრიგად, თუ სიმძიმის ძალა იზომება 10 მკვლ. სიზუსტით საჭიროა გავითვალისწინოთ Δg_1 . თუ სიმძიმის ძალა იზომება 1 მკვლ. სიზუსტით ამჯერადაც აუცილებელია მხედველობაში იქნას მიღებული Δg_1 , მაგრამ სასურველია სამუშაოები ჩატარდეს ატმოსფეროს სტაბილური მდგომარეობის პირობებში

$$\Delta P \leq 20 \text{ მზარი}$$

3. ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივის ცვლილებების გავლენა ბრავიშემტრის ჩვენებაზე და მისი კომპენსაცია

3.1. ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივის ცვლილების გავლენა გრავიმეტრის ჩვენებაზე – პირდაპირი მიზიდულობის ეფექტი

როგორც გრავიმეტრების მიმოხილვის დროს აღინიშნა, ყოველი სახის გრავიმეტრი განიცდის გარემო ფაქტორების გავლენას, რომელთაგან აღსანიშნავია:

ტემპერატურის, მაგნიტური თუ ელექტრული ველებისა და ჰაერის სიმკვრივის ცვლილებები. აღნიშნულთანგან ჩვენ საგანგებოდ გვინდა შევჩერდეთ უკანასკნელ ფაქტორზე და შევისწავლოთ მგრძნობიარე ელემენტზე (სენსორზე), ჰაერის მხრიდან უშუალო გრავიტაციული მიზიდულობის ძალით გამოწვეული ზემოქმედების ეფექტი. პოტენციალთა თეორიიდან ცნობილია, რომ სფერული სხეული ისე იზიდავს მის გარეთ მდებარე წერტილს, თითქოს სფეროს მთელი მასა თავმოყრილი იყოს მის ცენტრში. ამის გამო, ცხადია, მიზანშეწონილი იქნება გრავიმეტრის ზემოთ არსებული ჰაერის მასიდან გამოვყოთ გარკვეული – რადიუსის მქონე ბირთვი (ნახ. 3.1.). სწორედ ეს ბირთვი მიიზიდავს გრავიმეტრის მგრძნობიარე ელემენტს და დარღვევს მის ჩვენებას, თუმცა ეს დარღვევა სულაც არ არის სავალდებულო მხედველობაში იქნეს მიღებული, და არც მივიღებთ არნიშნული ბირთვის მასა, რომ მუდმივი იყოს და არ განიცდიდეს სისტემატურ ცვლილებებს ჰაერის სიმკვრივის ცვალებადობის გამო.

მოვიყვანოთ აღნიშნული ზემოქმედების ანგარიში (ბირთვის რადიუსის ოპტიმალური მნიშვნელობის გამოთვლას და კონკრეტულ შემთხვევებს გნვიხილავთ ქვემოთ):

ცხადია, R -რადიუსის მქონე ბირთვის მოცულობა იქნება: $V = \frac{4}{3}\pi R^3$. მასში

მოთავსებული ჰაერის საშუალო სიმკვრივე აღვნიშნოთ $\bar{\rho}$ -ით, მაშინ მასა იქნება:

$$M = \bar{\rho}V = \frac{4}{3}\pi R^3 \cdot \bar{\rho}$$

მიზიდულობის ძალა, რომლითაც M -მასის ჰაერის ბირთვი იმოქმედებს გრავიმეტრის მგრძნობიარე ელემენტის მასაზე ტოლი იქნება:

$$F = \gamma \frac{mM}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{m \cdot 4\pi R^3 \bar{\rho}}{3r^2} = 27,9 \cdot 10^{-11} \frac{mR^3 \bar{\rho}}{r^2} \text{ ნ.} = 27,9 \cdot 10^{-6} \frac{mR^3 \bar{\rho}}{r^2} \text{ დნ.}$$

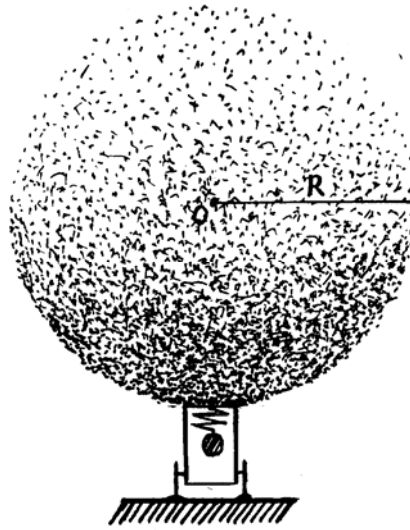
$$\text{ე.ი. } F = 27,9 \cdot 10^{-6} \frac{mR^3 \bar{\rho}}{r^2} \text{ დნ}$$

სადაც m -სენსორის მასაა, R -ჰაერის ბირთვის რადიუსი, $\bar{\rho}$ -ჰაერის საშუალო სიმკვრივე, r -მანძილი ჰაერის სიმძიმის ცენტრიდან სენსორამდე.

აჩქარება, რომელსაც F -ძალა მიანიჭებს სენსორის მასას იქნება:

$$a = \frac{F}{m} \text{ დნ/კგ} = \frac{F}{10^3 m} \text{ დნ/გ(გალი)} = 27,9 \cdot 10^{-9} \frac{R^3 \bar{\rho}}{r^2} \text{ გლ.} = 27,9 \cdot 10^{-3} \frac{R^3 \bar{\rho}}{r^2} \text{ მკგლ.}$$

$$\text{ე.ი. } a = 27.9 \cdot 10^{-3} \frac{R^3 \bar{\rho}}{r^2} \text{ მკგლ}$$



ნახ.3.1. გრავიმეტრი ჰაერის ბირთვით

თუ უკანასკნელ ტოლობაში $\bar{\rho}$ -ის ნაცვლად შევიტანთ $\Delta\bar{\rho}$ -ის მნიშვნელობას მივიღებთ გამოსახულებას, რომელიც ფაქტიურად გამოსახავს ჰაერის სიმკვრივის ცვლილების დამოკიდებულებას გრავიმეტრის ჩვენების ცვლილებაზე.

$$\Delta a = 27,9 \cdot 10^{-3} \frac{R^3 \Delta\bar{\rho}}{r^2} \text{ მკგლ} \quad (3.1)$$

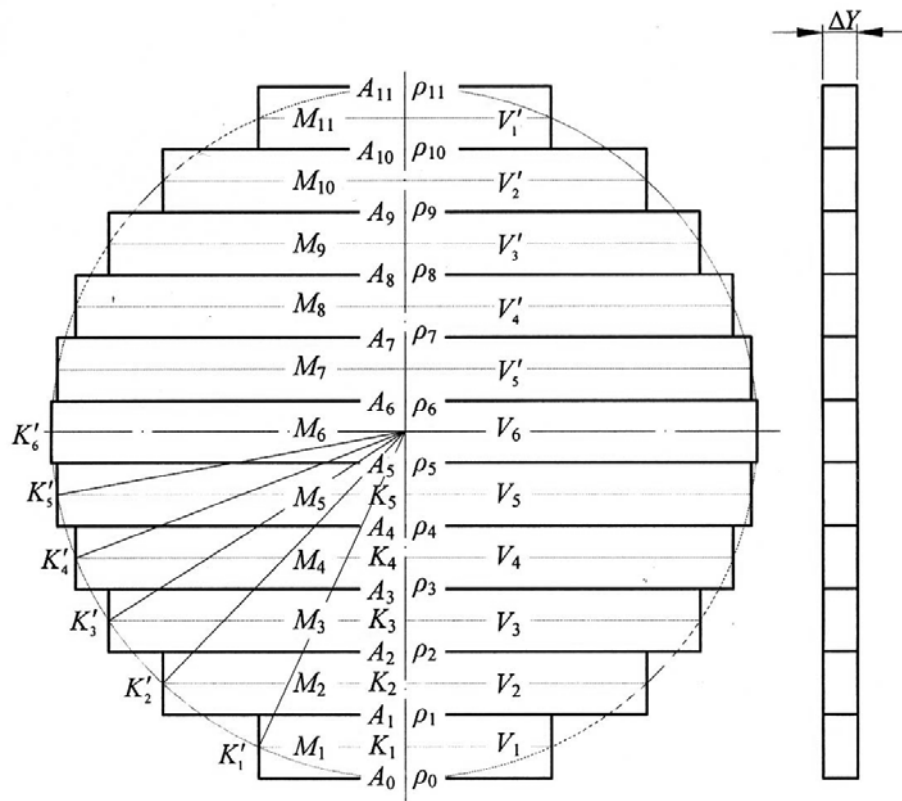
სადაც $\Delta\bar{\rho}$ -არის ჰაერის საშუალო სიმკვრივის ცვლილებების სიდიდე. მის სხვადასხვა მნიშვნელობას Δa -ს სხვადასხვა მნიშვნელობა შეესაბამება, რომლებიც უნდა იქნას გათვალისწინებული გრავიმეტრებით სარგებლობისას.

3.2. არაერთგვაროვანი სიმკვრივის მქონე ჰაერის ბირთვის სიმძიმის ცენტრის განსაზღვრის ექსპერიმენტული მეთოდი

არაერთგვაროვანი სიმკვრივის მქონე ჰაერის ბირთვის სიმძიმის ცენტრი, მიუხედავად იმისა, რომ მასში ჰაერის სიმკვრივე გარკვეული კანონზომიერებით

არის განაწილებული (ყოველ 5,5 კმ-ზე ასვლისას ჰაერის სიმკვრივე ნახევრდება [2]), მაინც ექსპერიმენტული მეთოდით უნდა განისაზღვროს.

სიმძიმის ცენტრის ექსპერიმენტულად განსაზღვრის ჩვენი მეთოდი ასეთია: ჰაერის ბირთვიდან ვერტიკალური დიამეტრალური კვეთის გავლებით პირობითად ვიღებთ თხელ ფირფიტას, რომელშიც სიმკვრივეები ზუსტად ისევე იქნება განაწილებული, როგორც ბირთვში, და რაკი ბირთვი ასეთი ფირფიტების ერთობლიობას წარმოადგენს, ამიტომ საჭიროა განვსაზღვროთ ერთ-ერთი ფირფიტის სიმძიმის ცენტრი და ბირთვის სიმძიმის ცენტრიც განსაზღვრული იქნება.



ნახ.3.2. ჰაერის ბირთვის ვერტიკალური დიამეტრალური კვეთი

ჰაერის ბირთვიდან პირობითად ამოჭრილი ფირფიტის დიამეტრი, ცხადია, 11კმ-ის ტოლი იქნება, რადგან თვითონ ბირთვის დიამეტრი 11 კმ-ს შეადგენს (თუ რატომ მაინცდამაინც 11კმ-ს, ამას ქვემოთ დავასაბუთებთ). ფირფიტის სისქე, გარკვეული მოსაზრებების გამო, ავიღოთ 10^{-4} მ-ის ტოლად. ფირფიტა დავყოთ 11 ზოლად და ვიანგარიშოთ თითოეული მათგანის მასა.

შევარჩიოთ მასშტაბი (M1:100000) და თითოეული ზოლის მასების მიხედვით სანთლისაგან გამოვმერწოთ მოცემული ფირფიტის მსგავსი ფირფიტა, რომლის სიმძიმის ცენტრის დადგენით ადვილად განვსაზღვრავთ თავიდან აღებული ბირთვის სიმძიმის ცენტრსაც.

ზემოთ არნიშნულის მიზნით, თავდაპირველად, ფირფიტის ზოლებად დაყოფის შედეგად მიღებული სეგმენტები და მრუდწირული ტრაპეციები შევცვალოდ მათი ტოლ-დიდი მართკუთხედებით (ნახ.3.2), რომელთა სისქე შეადგენს 10^{-4} მ-ს. გამოვთვალოთ თითოეული მათგანის მოცულობა, რისთვისაც ჯერ უნდა გამოითვალოს:

$$\Delta OK_1K'_1\text{-დან } K_1K'_1 = \sqrt{OK_1'^2 - OK_1^2} = \sqrt{5,5^2 - 5^2} = \sqrt{5,25} = 2,29 \text{ კმ.}$$

$$\Delta OK_2K'_2\text{-დან } K_2K'_2 = \sqrt{OK_2'^2 - OK_2^2} = \sqrt{5,5^2 - 4^2} = \sqrt{14,25} = 3,77 \text{ კმ.}$$

$$\Delta OK_3K'_3\text{-დან } K_3K'_3 = \sqrt{OK_3'^2 - OK_3^2} = \sqrt{5,5^2 - 3^2} = \sqrt{21,25} = 4,61 \text{ კმ.}$$

$$\Delta OK_4K'_4\text{-დან } K_4K'_4 = \sqrt{OK_4'^2 - OK_4^2} = \sqrt{5,5^2 - 2^2} = \sqrt{26,25} = 5,12 \text{ კმ.}$$

$$\Delta OK_5K'_5\text{-დან } K_5K'_5 = \sqrt{OK_5'^2 - OK_5^2} = \sqrt{5,5^2 - 1} = \sqrt{29,25} = 5,41 \text{ კმ.}$$

ახლა ვიანგარიშოთ მოცულობები:

$$V_1 = A_0A_1 \cdot 2K_1K'_1 \cdot \Delta Y = 10^3 \cdot 2 \cdot 2290 \cdot 10^{-4} = 458 \text{ მ}^3$$

$$V_2 = A_1A_2 \cdot 2K_2K'_2 \cdot \Delta Y = 10^3 \cdot 2 \cdot 3770 \cdot 10^{-4} = 754 \text{ მ}^3$$

$$V_3 = A_2A_3 \cdot 2K_3K'_3 \cdot \Delta Y = 10^3 \cdot 2 \cdot 4610 \cdot 10^{-4} = 922 \text{ მ}^3$$

$$V_4 = A_3A_4 \cdot 2K_4K'_4 \cdot \Delta Y = 10^3 \cdot 2 \cdot 5120 \cdot 10^{-4} = 1024 \text{ მ}^3$$

$$V_5 = A_4A_5 \cdot 2K_5K'_5 \cdot \Delta Y = 10^3 \cdot 2 \cdot 5410 \cdot 10^{-4} = 1082 \text{ მ}^3$$

$$V_6 = A_5A_6 \cdot 2K_6K'_6 \cdot \Delta Y = 10^3 \cdot 2 \cdot 5500 \cdot 10^{-4} = 1100 \text{ მ}^3$$

დანარჩენი მოცულობებისათვის გვაქვს:

$$V_7=V_5=1082 \text{ მ}^3, \quad V_8=V_4=1024 \text{ მ}^3, \quad V_9=V_3=922 \text{ მ}^3,$$

$$V_{10}=V_2=754 \text{ მ}^3, \quad V_{11}=V_1=458 \text{ მ}^3,$$

ვიანგარიშოთ ჰაერის სიმკვრივეები მახასიათებელ წერტილებში:

A_0 წერტილში სიმკვრივე ავილოთ ნორმალური ატმოსფერული პირობების შესაბამისი.

$$\text{ე.ი. } \rho_{A_0} = \rho_0 = 1,29 \text{ კგ/მ}^3 \text{ ცხადია, უკიდურეს ზედა წერტილში, } A_{11}\text{-ში,}$$

ჰაერის სიმკვრივე იქნება:

$$\rho_{A_1} = \rho_{11} = \frac{\rho_0}{4} = \frac{1,29}{4} = 0,3225 \text{ კგ/მ}^3$$

სიმკვრივეთა სხვაობა:

$$\Delta\rho = |\rho_{11} - \rho_0|$$

სიმკვრივის კლება ყოველ კილომეტრზე ასვლისას იქნება:

$$\Delta\rho' = \frac{\Delta\rho}{11}$$

ხოლო ჰაერის სიმკვრივე ნებისმიერ სიმაღლეზე იანგარიშება შემდეგნაირად:

$$\rho_n = \rho_0 - \frac{|\Delta\rho|}{11}n \quad \text{სადაც } n=0; 1; 2; \dots; 11$$

$$\text{მაშინ } \rho_{A_1} = \rho_1 = \rho_0 - \frac{|\Delta\rho|}{11}n = 1,29 - \frac{0,9675}{11} \cdot 1 = 1,29 - 0,088 = 1,202 \text{ კგ/მ}^3$$

$$\rho_{A_2} = \rho_2 = 1,29 - 0,088 \cdot 2 = 1,29 - 0,176 = 1,114 \text{ კგ/მ}^3$$

$$\rho_{A_3} = \rho_3 = 1,29 - 0,088 \cdot 3 = 1,29 - 0,264 = 1,026 \text{ კგ/მ}^3$$

$$\rho_{A_4} = \rho_4 = 1,29 - 0,088 \cdot 4 = 1,29 - 0,352 = 0,938 \text{ კგ/მ}^3$$

$$\rho_{A_5} = \rho_5 = 1,29 - 0,088 \cdot 5 = 1,29 - 0,440 = 0,850 \text{ კგ/მ}^3$$

$$\rho_{A_6} = \rho_6 = 1,29 - 0,088 \cdot 6 = 1,29 - 0,528 = 0,762 \text{ კგ/მ}^3$$

$$\rho_{A_7} = \rho_7 = 1,29 - 0,088 \cdot 7 = 1,29 - 0,616 = 0,674 \text{ კგ/მ}^3$$

$$\rho_{A_8} = \rho_8 = 1,29 - 0,088 \cdot 8 = 1,29 - 0,704 = 0,586 \text{ კგ/მ}^3$$

$$\rho_{A_9} = \rho_9 = 1,29 - 0,088 \cdot 9 = 1,29 - 0,792 = 0,498 \text{ კგ/მ}^3$$

$$\rho_{A_{10}} = \rho_{10} = 1,29 - 0,088 \cdot 10 = 1,29 - 0,880 = 0,410 \text{ კგ/მ}^3$$

$$\rho_{A_{11}} = \rho_{11} = 1,29 - 0,088 \cdot 11 = 1,29 - 0,968 = 0,322 \text{ კგ/მ}^3$$

ვიანგარიშოთ საშუალო სიმკვრივეები თითოეული ზოლისათვის

$$\bar{\rho}_{A_0A_1} = \frac{\rho_0 + \rho_1}{2} = \frac{1,29 + 1,202}{2} = \frac{2,492}{2} = 1,248 \text{ კგ/მ}^3$$

$$\bar{\rho}_{A_1A_2} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} = \frac{1,202 + 1,114}{2} = \frac{2,316}{2} = 1,108 \text{ კგ/მ}^3$$

$$\bar{\rho}_{A_2A_3} = \frac{\rho_2 + \rho_3}{2} = \frac{1,114 + 1,026}{2} = \frac{2,140}{2} = 1,070 \text{ კგ/მ}^3$$

$$\bar{\rho}_{A_3A_4} = \frac{\rho_3 + \rho_4}{2} = \frac{1,026 + 0,938}{2} = \frac{1,964}{2} = 0,982 \text{ კგ/მ}^3$$

$$\bar{\rho}_{A_4A_5} = \frac{\rho_4 + \rho_5}{2} = \frac{0,938 + 0,850}{2} = \frac{1,788}{2} = 0,894 \text{ კგ/მ}^3$$

$$\bar{\rho}_{A_5A_6} = \frac{\rho_5 + \rho_6}{2} = \frac{0,850 + 0,762}{2} = \frac{1,612}{2} = 0,806 \text{ კგ/მ}^3$$

$$\bar{\rho}_{A_6A_7} = \frac{\rho_6 + \rho_7}{2} = \frac{0,762 + 0,674}{2} = \frac{1,436}{2} = 0,718 \text{ კგ/მ}^3$$

$$\bar{\rho}_{A_7A_8} = \frac{\rho_7 + \rho_8}{2} = \frac{0,674 + 0,586}{2} = \frac{1,260}{2} = 0,630 \text{ კგ/მ}^3$$

$$\bar{\rho}_{A_8A_9} = \frac{\rho_8 + \rho_9}{2} = \frac{0,586 + 0,498}{2} = \frac{1,084}{2} = 0,542 \text{ კგ/მ}^3$$

$$\bar{\rho}_{A_9A_{10}} = \frac{\rho_9 + \rho_{10}}{2} = \frac{0,498 + 0,410}{2} = \frac{0,908}{2} = 0,454 \text{ კგ/მ}^3$$

$$\bar{\rho}_{A_{10}A_{11}} = \frac{\rho_{10} + \rho_{11}}{2} = \frac{0,410 + 0,322}{2} = \frac{0,732}{2} = 0,366 \text{ კგ/მ}^3$$

ვიანგარიშით თითოეული ზოლის მასა:

$$M_1 = \bar{\rho}_{A_0A_1} \cdot V_1 = 1,248 \cdot 458 = 571,584 \text{ კგ} = 571584 \text{ გ}$$

$$M_2 = \bar{\rho}_{A_1A_2} \cdot V_2 = 1,103 \cdot 754 = 831,662 \text{ კგ} = 831662 \text{ გ}$$

$$M_3 = \bar{\rho}_{A_2A_3} \cdot V_3 = 1,070 \cdot 922 = 986,54 \text{ კგ} = 986540 \text{ გ}$$

$$M_4 = \bar{\rho}_{A_3A_4} \cdot V_4 = 0,982 \cdot 1024 = 1005,568 \text{ კგ} = 1005568 \text{ გ}$$

$$M_5 = \bar{\rho}_{A_4A_5} \cdot V_5 = 0,894 \cdot 1082 = 967,308 \text{ კგ} = 967308 \text{ გ}$$

$$M_6 = \bar{\rho}_{A_5A_6} \cdot V_6 = 0,801 \cdot 1100 = 881,1 \text{ კგ} = 881100 \text{ გ}$$

$$M_7 = \bar{\rho}_{A_6A_7} \cdot V_7 = 0,718 \cdot 1082 = 776,876 \text{ კგ} = 776876 \text{ გ}$$

$$M_8 = \bar{\rho}_{A_7A_8} \cdot V_8 = 0,630 \cdot 1024 = 645,12 \text{ კგ} = 645120 \text{ გ}$$

$$M_9 = \bar{\rho}_{A_8A_9} \cdot V_9 = 0,542 \cdot 922 = 479,44 \text{ კგ} = 479440 \text{ გ}$$

$$M_{10} = \bar{\rho}_{A_9A_{10}} \cdot V_{10} = 0,454 \cdot 754 = 342,316 \text{ კგ} = 342316 \text{ გ}$$

$$M_{11} = \bar{\rho}_{A_{10}A_{11}} \cdot V_{11} = 0,366 \cdot 458 = 167,628 \text{ კგ} = 167628 \text{ გ}$$

ამის შემდეგ ვითვალისწინებთ მასშტაბებს და ფირფიტის შემადგენელი ზოლების მასებიდან ვღებულობთ საექსპერიმენტო ფირფიტის შემადგენელი ზოლების მასებს:

$$m_1 \approx 5,7 \text{ გ} \quad m_5 \approx 9,7 \text{ გ} \quad m_9 \approx 4,8 \text{ გ}$$

$$m_2 \approx 8,3 \text{ გ} \quad m_6 \approx 8,8 \text{ გ} \quad m_{10} \approx 3,4 \text{ გ}$$

$$m_3 \approx 9,8 \text{ გ} \quad m_7 \approx 7,8 \text{ გ} \quad m_{11} \approx 1,7 \text{ გ}$$

$$m_f \approx 10,05 \text{ გ} \quad m_g \approx 6,5 \text{ გ}$$

მასების მიღებული მნიშვნელობებით სანთლისგან ვაგებთ საექსპერიმენტო ფირფიტას და ცნობილი წესით ვპოულობთ მის სიმძიმის ცენტრს. ვატარებთ გაზომვას და ვადგენთ პროპორციას (ნახ.3.3), რომელსაც აქვს სახე:

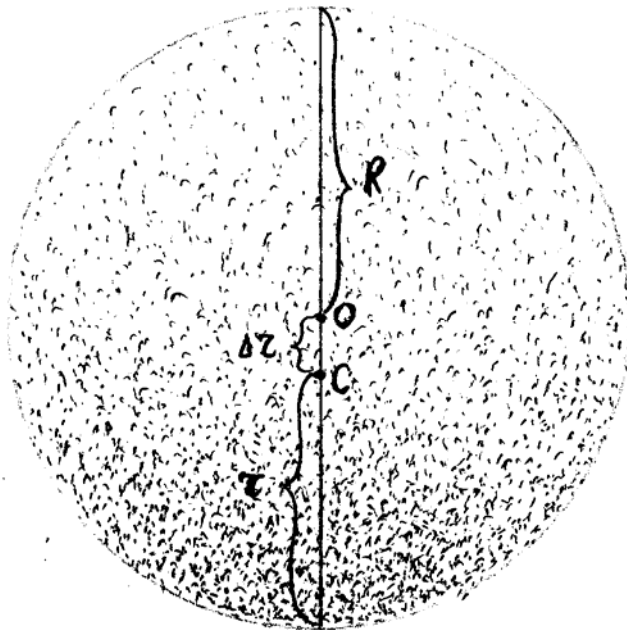
$$\frac{R + \Delta r}{R - \Delta r} = \frac{6,5}{4,5} \quad \text{აქედან}$$

$$\Delta r = 0,18R \quad (3.2)$$

მეორეს მხრივ, $r + \Delta r = R$ თუ ამ უკანასკნელში გავითვალისწინებთ (3.2) ტოლობას მივიღებთ:

$$r + 0,18R = R \quad \text{აქედან}$$

$$r = 0,82R \quad (3.3)$$



ნახ.3.3. ჰაერის ბირთვის სიმძიმის ცენტრის მდებარეობა

ამ გამსახულებით გამოისახება კავშირი ჰაერის ბირთვის სიმძიმის ცენტრის მდებარეობასა და მის რადიუსს შორის.

თუ (3.3) ტოლობას გავითვალისწინებთ (3.1) ფორმულაში მივიღებთ სენსორის მასაზე ჰაერის ბირთვის მხრიდან მოქმედების განმსაზღვრელ ფორმულას უფრო მარტივი სახით:

$$\Delta a = 41,64 \cdot 10^{-3} R \cdot \Delta \bar{\rho} \text{ მკ.გლ.} \quad (3.4)$$

3.3. ჰაერის ბირთვის ოპტიმალური რადიუსის შერჩევა და სენსორის მასაზე მისი მოქმედების მაქსიმალური მნიშვნელობის დადგენა

ზემოთ აღვნიშნეთ, რომ ჰაერის მასა, რომელიც გარს აკრავს დედამიწას გრავიმეტრის სენსორზე მოქმედებს მიზიდულობის ძალით და არღვევს მის ჩვენებას. ჩვენ გამოვყავით ჰაერის ოკეანიდან R -რადიუსის მქონე ბირთვი და დავადგინეთ სენსორზე მისი მოქმედების ეფექტი, მაგრამ არ მიგვითითებია ბირთვის კონკრეტული ზომები. მოვიყვანოთ მისი ანგარიში:

ჰაერის ბირთვის ოპტიმალურ ზომად ჩაითვლება მისი რადიუსის ის მნიშვნელობა, რომლის დროსაც ჰაერის საშუალო სიმკვრივის მინიმალური ცვლილებების შემთხვევაშიც კი ჰაერის ბირთვი სენსორზე იმოქმედებს 1 მკგლით. (აქვე შევნიშნავთ, რომ ჰაერის საშუალო სიმკვრივის მინიმალურ ცვლილებად ვიღებთ $\Delta \bar{\rho} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ კგ/მ}^3$ და ამას ვაკეთებთ მხოლოდ გამოთვლების გამარტივების მიზნით, თორემ შეგვეძლო აგველო $\Delta \bar{\rho} = 10^{-2} \text{ კგ/მ}^3$)

ვისარგებლოთ (3.1) ფორმულით. შევიტანოთ მასში ცნობილი მნიშვნელობები, გავითვალისწინოთ აგრეთვე (3.3) ფორმულაც და მივიღებთ:

$$27,9 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{R^3 \cdot 4,5 \cdot 10^{-3}}{(0,83 \cdot R)^2} = 1 \text{ მკ.გლ.}$$

$$\frac{125,5 R^3}{0,69 \cdot 10^6 R^2} = 1$$

$$125,5 R = 69 \cdot 10^4$$

$$R = \frac{69}{125,5} \cdot 10^4 = 0,5498 \cdot 10^4 \text{ მ.} = 5498 \text{ მ.} = 5,5 \text{ კმ}$$

ამრიგად, ჰაერის ბირთვის ოპტიმალურ ზომად მივიღეთ $R=5,5 \text{ კმ}$.

ახლა შეგვიძლია ვიანგარიშოთ სენსორის მასაზე, რომელსაც სტანდარტულად იღებენ 1,25 კგ-ის ტოლად, ჰაერის ბირთვის მხრიდან მაქსიმალური მოქმედების მნიშვნელობა.

ცხადია, აღნიშნულ მოქმედებას ადგილი ექნება იმ შემთხვევაში, როცა $\Delta\bar{\rho}$ -ის მნიშვნელობა მიაღწევს მაქსიმუმს. გამოვთვალოთ $\Delta\bar{\rho}_{\max}$.

როგორც ვიცით $\Delta\bar{\rho} = \frac{\Delta\rho_0 + \Delta\rho_0^*}{2}$ სადაც $\Delta\rho_0$ და $\Delta\rho_0^*$ არის ჰაერის სიმკვრის ბუნებრივი ცვლილებები, შესაბამისად, ბირთვის უკიდურეს ქვედა და ზედა წერტილებში. უნდა შევნიშნოთ, რომ არ შეიძლება იმის დაშვება თითქოს $\Delta\rho_1 = \Delta\rho_2 = \Delta\bar{\rho}$, რადგან ასეთ შემთხვევაში არ შესრულდება ჰაერის სიმკვრის განაწილების წესი: ყოველ 5,5 კმ-ზე ასვლისას მისი სიმკვრივე ნახევრდება, ამიტომ ჩვენი შემთხვევისათვის, რადგან $R=5,5$ კმ-ს, ცხადია $\Delta\rho_0^* = \frac{\Delta\rho_0}{4}$ სადაც $\Delta\rho_0$ -ს უშუალოდ გაზომვით ვღებულობთ. ამდენად:

$$\Delta\bar{\rho} = \frac{\Delta\rho_0 + \Delta\rho_0^*}{2} = \frac{5}{8}\Delta\rho_0 = 0,625\Delta\rho_0$$

ე.ი. $\Delta\bar{\rho} = 0,625\Delta\rho_0$ (3.5)

როგორც ცნობილია, დედამიწის ზედაპირზე ჰაერის სიმკვრის მაქსიმალურ მნიშვნელობად შეიძლება ჩაითვალოს $\rho_{\max}=1,4$ კგ/მ³, მაშინ ასეთი შემთხვევისათვის ვღებულობთ:

$$\Delta\rho_{0(\max)} = \rho_{\max} - \rho_0 = 1,4 - 1,29 = 0,11 \text{ კგ/მ}^3$$

ხოლო $\Delta\bar{\rho}_{\max} = 0,625 \cdot 0,11 = 0,0688 \text{ კგ/მ}^3$

მაშინ (3.4) ფორმულის გამოყენებით შეგვიძლია მივიღოთ ჰაერის მხრიდან სენსორის მასაზე მოქმედების მაქსიმალური მნიშვნელობა:

$$\Delta a_{\max} = 40,43 \cdot 10^{-3} R \cdot \Delta\bar{\rho}_{\max} = 40,43 \cdot 10^{-3} \cdot 55 \cdot 10^2 \cdot 0,0688 = 15,3 \text{ მკგლ}$$

ე. ი. $\Delta a_{\max} = 15,3 \text{ მკგლ.}$

3.4. ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის გრავიმეტრის ჩვენებათა შემასწორებელი ცხრილის შედგენა

ჩვენს მიერ ზემოთ მიღებული (3.4) და (3.5) დამოკიდებულებები საშუალებას გაძლევს ვიანგარიშოთ, დედამიწის ზედაპირზე ჰაერის სიმკვრივის ცვალებადობათა მიხედვით, გრავიმეტრის ჩვენებაში შესატანი საჭირო შესწორებების შესაბამისი მნიშვნელობები.

თუ დედამიწის ზედაპირზე ჰაერის სიმკვრივე შეიცვალა (ჯერ დავუშვათ, რომ გაიზარდა) $0,01\text{კგ/მ}^3$ -ით ე.ი. $\Delta\rho_{01}=0,01\text{კგ/მ}^3$ მაშინ (3.5)-ის მიხედვით

$$\Delta\rho_1=0,625 \cdot \Delta\rho_{01}=0,625 \cdot 0,01=625 \cdot 10^{-5} \text{ კგ/მ}^3$$

ხოლო (3.4.)ტოლობის გამოყენებით ვღებულობთ:

$$\Delta a_1=41,64 \cdot 10^{-3} \cdot R \cdot \Delta\rho_1=41,64 \cdot 10^{-3} \cdot 55 \cdot 10^2 \cdot 625 \cdot 10^{-5}=14453,7 \cdot 10^{-4}=1,4 \text{ მკგლ}$$

შემდგომი ანგარიში უკვე ავტომატურად მიდის:

თუ $\Delta\rho_{02}=0,02\text{კგ/მ}^3$	მაშინ	$\Delta a_2=2,8\text{მკგლ.}$
$\Delta\rho_{03}=0,03\text{კგ/მ}^3$	მაშინ	$\Delta a_3=4,2\text{მკგლ.}$
$\Delta\rho_{04}=0,04\text{კგ/მ}^3$	მაშინ	$\Delta a_4=5,6\text{მკგლ.}$
$\Delta\rho_{05}=0,05\text{კგ/მ}^3$	მაშინ	$\Delta a_5=7\text{მკგლ.}$
$\Delta\rho_{06}=0,06\text{კგ/მ}^3$	მაშინ	$\Delta a_6=8,4\text{მკგლ.}$
$\Delta\rho_{07}=0,07\text{კგ/მ}^3$	მაშინ	$\Delta a_7=9,8\text{მკგლ.}$
$\Delta\rho_{08}=0,08\text{კგ/მ}^3$	მაშინ	$\Delta a_8=11,2\text{მკგლ.}$
$\Delta\rho_{09}=0,09\text{კგ/მ}^3$	მაშინ	$\Delta a_9=12,6\text{მკგლ.}$
$\Delta\rho_{10}=0,1\text{კგ/მ}^3$	მაშინ	$\Delta a_{10}=14\text{მკგლ.}$
$\Delta\rho_{11}=0,11\text{კგ/მ}^3$	მაშინ	$\Delta a_{11}=15,4\text{მკგლ.}$

თუ ჰაერის სიმკვრივე მის ნორმალურ მნიშვნელობასთან $\rho_0=1,29(\text{კგ/მ}^3)$, შედარებით შემცირდა $0,01\text{კგ/მ}^3$ -ით, $0,02 \text{ კგ/მ}^3$ -ით და ა.შ. მაშინ შესაბამისი მნიშვნელობები გრავიმეტრის ჩვენებას უნდა გამოვაკლოთ.

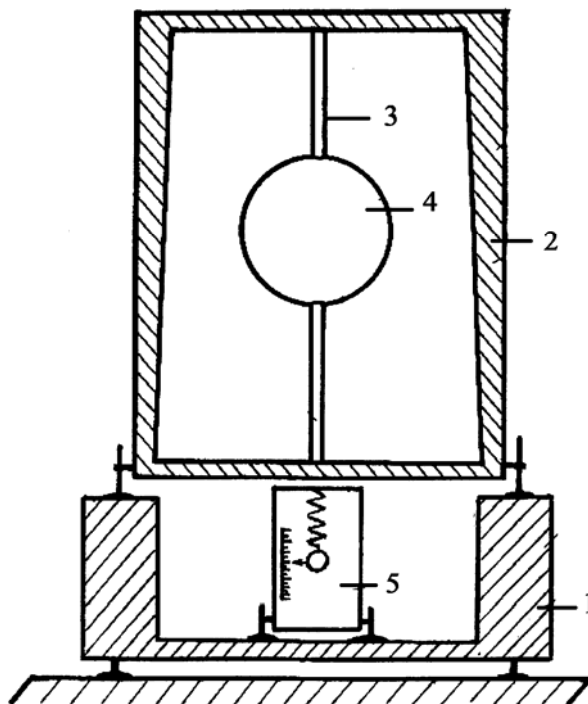
ამგვარად მოვახდენთ გრავიმეტრის იმ ცდომილებათა კომპენსირებას რასაც ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივის ცვალებადობები იწვევს. თუმცა, ამ მეთოდის გამოყენება მიზანშეწონილი მხოლოდ ვიზუალური დაკვირვების

გრავიმეტრებში, ხოლო დანარჩენი ტიპის გრავიმეტრებისათვის უკეთესია ვისარგებლოდ ე.წ. გრავიკომპენსატორით.

3.5 გრავიკომპენსატორი

წინა პარაგრაფში მოყვანილი ცხრილი იძლევა საშუალებას, საჭიროების შემთხვევაში შეტანილი იქნას სათანადო შესწორებები გრავიმეტრის ჩვენებაში, მაგრამ ეს მეთოდი ხელსაყრელია გამოვიყენოთ მხოლოდ ვიზუალური დაკვირვების გრავიმეტრებში, სხვა ტიპის აპარატებში კი უმჯობესია გამოყენებულ იქნას ე.წ. გრავიკომპენსატორი.

გრავიკომპენსატორი შედგება ორი მაგიდისაგან (1) და (2), (ნახ.3.4), რომელთაგან ერთ-ერთში, სავალი ხრახნის (3) მეშვეობით, ვერტიკალურად მოძრაობს სფერული ფორმის ტვირთი – კომპენსატორი (4). რაც შეეხება გრავიმეტრს (5) იგი, თუ $\rho_0 > 1,29 \text{ კგ/მ}^3$ თავსდება ქვედა მაგიდაზე (1), ხოლო თუ $\rho_0 < 1,29$ მაშინ – ზედა მაგიდაზე (2). ტვირთი – კომპენსატორის მოძრაობით სავალი ხრახნის გასწვრივ ვახდენთ გრავიმეტრის მგრძნობიარე ელემენტზე ატმოსფეროს მხრიდან უარყოფითი ზეგავლენის კომპენსირებას.



ნახ.3.4. გრავიკომპენსატორის მოწყობილობა

3.6. გრავიკომპენსატორის ოპტიმალური მასის, ფორმისა და ნივთიერების შერჩევა

ზემოთ აღინიშნა, რომ ჰაერის ბირთვის მხრიდან სენსორის მასაზე მოქმედებს მიზიდულობის ძალა, რომელიც არასტაბილურად ცვალებადია და, ცხადია, უარყოფითად მოქმედებს გრავიმეტრის ჩვენებაზე, თუმცა მისი ზეგავლენა მაინც გარკვეულ დიაპაზონშია მოთვსებული, რომლის სიდიდე დაახლოებით 30 მკგლ-ს შეადგენს (± 15 მკგლ), ამიტომ, ბუნებრივია, გრავიმეტრის ქვემოთ (ან ზემოთ) მოთავსებული კომპენსატორის მასა უნდა შეირჩეს ისე, რომ მანაც ანალოგიურად იმოქმედოს სენსორის მასაზე მასთან შესაძლო მაქსიმალური მიახლოების შემთხვევაში. აღნიშნული მანძილი დამოკიდებულია სენსორის მასის გრავიმეტრის ფუძიდან ან ჭერიდან, დაშორების მანძილზე (ეს დაშორებები სხვადასხვა ტიპის გრავიმეტრებისათვის სხვადასხვაა. ჩვენს მიერ განხილულ ГНУ-K1 გრავიმეტრისათვის კი ერთმანეთის ტოლია და შეადგენს 15 სმ-ს) და თვითონ კომპენსატორის რადიუსზე. კომპენსატორის მასალად შევარჩიოთ ოსმიუმი ან ტყვია. თუ ოსმიუმს შევირჩევთ, რომლის სიმკვრივეც შეადგენს $\rho_{\text{ოსმ}}=22,5 \cdot 10^3$ კგ/მ³, მაშინ, რადგან ჩვენი მიზანია მან იმოქმედოს სენსორზე 15 მკგლ-ით, ადვილად ვადგენთ, რომ ამისათვის ყველაზე ხელსაყრელია მისი რადიუსი ავიღოთ 11სმ. ანუ 0,11 მ-ის ტოლი, ხოლო მასა კი თავისთავად გამოვა:

$$M_{\text{ოსმ}} = \rho_{\text{ოსმ}} V = 22,5 \cdot 10^3 \cdot 4/3 \pi (11/100)^2 = 150 \text{ კგ}$$

მართლაც, ასეთ პირობებში მისი მოქმედება სენსორზე იქნება:

$$a = 10^8 \cdot \frac{F}{m} = 10^8 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{150 \cdot 1,25}{1,25(0,11 + 0,15)^2} = 10^8 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{150}{\left(\frac{26}{100}\right)^2} =$$

$$= \frac{6,67 \cdot 15 \cdot 25}{169} = 14,8 \text{ მკგლ.}$$

თუ კომპენსატორის მასალად შევირჩევთ ტყვიას, მაშინ იგივე შედეგის მისაღწევად ტყვიის პარამეტრებისათვის ვღებულობთ:

$$\rho_{\text{ტყ}} = 16,2 \text{ სმ} \quad M_{\text{ტყ}} = 200 \text{ კგ}$$

ახლა შეგვიძლია ვიანგარიშოთ ის მინიმალური მანძილი, რომელზეც უნდა დავაყენოთ კომპენსატორი, რომ მისი მოქმედება სენსორზე ნაკლები იყოს 1 მკვლ-ზე.

სადიებელი მანძილი აღვნიშნოთ h -ით. მაშინ, ცხადია, მანძილი სენსორსა და კომპენსატორს შორის იქნება: $r=(0,26+h)$ მ. მათ შორის მზიდულობის ძალა კი:

$$F = \gamma \frac{Mm}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{150 \cdot 1,25}{(0,26+h)^2} = 10^{-10} \frac{100,05 \cdot 1,25}{(0,26+h)^2} = 10^{-8} \cdot \frac{1,25}{(0,26+h)^2} \text{ ნ}$$

ამ ძალამ, ჩვენი დაშვებით, უნდა გამოიწვიოს სენსორზე 1მკვლ-ზე ნაკლები ზემოქმედება.

ე.ი. ვწერთ: $10^8 \frac{F}{m} < 1$ მკვლ

ანუ $10^8 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{150 \cdot 1,25}{1,25(0,26+h)^2} < 1$

საიდანაც ვღებულობთ $\frac{1}{(0,26+h)^2} - 1 < 0$

$$\frac{1 - (0,0676 + 0,52h + h^2)}{(0,26+h)^2} < 0$$

$$0,9324 - 0,52h - h^2 < 0$$

$$h^2 + 0,52h - 0,9 > 0$$

$$h^2 + 0,52h - 0,9 = 0$$

$$h = -0,26 \pm \sqrt{0,0676 + 0,9} = -0,26 \pm \sqrt{0,9676} = 0,26 \pm 0,98$$

$$h_1 = 0,72 \quad h_2 = -1,24$$

$$(h - 0,72)(h + 1,24) > 0$$

საიდანაც ვღებულობთ

$$h > 0,72 \text{ მ}$$

მაშასადამე, მივიღეთ დიაპაზონი (0–72 სმ), რომელშიც, საჭიროების შემთხვევაში, თუ ვამოძრავებთ კომპენსატორს, შევძლებთ სათანადო შესწორება შევიტანოთ გრავიმეტრის ჩვენებაში და ამით გავთიშოთ მასზე ერთ-ერთი ცნობილი გარემო ფაქტორის ზემოქმედება.

ამრიგად, თუ სენსორსა და კომპენსატორს შორის მანძილი არის 0,26 მ. მაშინ კომპენსატორის ზემოქმედება სენსორზე მაქსიმალურია და შეადგენს 15

მკგლ-ს, ხოლო თუ მათ შორის მანძილი 0,98 მ-ის ტოლი იქნება, ამ შემთხვევაში აღნიშნული ზემოქმედება მინიმალურია და მკგლ-ს უდრის

3.7. სენსორ – კომპენსატორის ურთიერთქმედებაში თითოეული მიკროგალი ცვლილებისათვის კომპენსატორის შესაბამისი გადაადგილების განსაზღვრა

ზემოთ ჩვენ დავადგინეთ, რომ თუ სენსორისა და კომპენსატორს შორის მანძილი 0,26 მ-ია, მაშინ მათ შორის ურთიერთქმედება მაქსიმალურია და შეადგენს 15 მკგლ-ს, ხოლო თუ მანძილი გაიზრდება 0,72 მ-ით და გახდება 0,98მ, მაშინ აღნიშნული ურთიერთქმედება მინიმუმამდე შემცირდება და გახდება მკგლ-ის ტოლი.

დავუშვათ კომპენსატორი იმყოფება უკიდურეს ქვედა წერტილში, ანუ სენსორიდან 0,98 მ-ის დაშორებით და ცხადია, მასზე მოქმედებს მკგლ-ით. ავღნიშნოთ ეს მანძილი Z_1 -ით. ე.ი. $Z_1=0,98$ მ. გამოვთვალოთ, რა მანძილზე უნდა ავწიოთ კომპენსატორი ზევით, რომსენსორზე მისი მოქმედება გახდეს 2 მკგლ-ის ტოლი. ამისათვის ჯერ გამოვიყვანოთ აღნიშნული ურთიერთქმედების გამოსათვლელი ზოგადი ფორმულა.

ვთქვათ, კომპენსატორმა რომ სენსორზე იმოქმედოს n მკგლ-ით, საჭიროა მათ შორის მანძილი იყოს Z_n მ. მაშინ ვწერთ:

$$n = 10^8 \frac{F_n}{m} \quad (3.6)$$

სადაც F_n -არის კომპენსატორსა და სენსორს შორის ურთიერთქმედების ძალა, როცა მათ შორის მანძილი Z_n მ-ია, m -სენსორის მასაა, ხოლო 10^8 -გამოსახულება კი მიღებული შედეგის მიკროგალებში გადამყვანი კოეფიციენტი.

ცხადია
$$F_n = \gamma \frac{Mm}{Z_n^2}$$

მაშინ (3.6) ტოლობა ასე ჩაიწერება:

$$n = 10^8 \frac{\gamma \frac{Mm}{Z_n^2}}{m} = 10^8 \gamma \frac{M}{Z_n^2} = 10^8 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{150}{Z_n^2} = \frac{10^8 \cdot 10^2 \cdot 10^{-11} \cdot 10}{Z_n^2} = \frac{1}{Z_n^2}$$

$$\text{ე.ი. } n = \frac{1}{Z_n^2} \quad \text{აქედან} \quad Z_n = \sqrt{\frac{1}{n}} \quad (3.7)$$

(3.7) გამოსახულება წარმოადგენს ზოგად ფორმულას, რომლის საშუალებითაც შეგვიძლია გამოვთვალოთ კომპენსატორსა და სენსორს შორის მანძილი n -ის ნებისმიერი მნიშვნელობისათვის. ახლა კი საშუალება გვეძლევა ვიანგარიშოთ Z_2

$$\text{ცხადია, ამ შემთხვევისათვის } n=2. \text{ მაშინ } Z_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} = \sqrt{0,5} = 0,71 \text{ მ} = 71 \text{ სმ.}$$

$$\text{ხოლო } \Delta Z_2 = Z_1 - Z_2 = 0,98 - 0,71 = 0,27 \text{ სმ}$$

მაშასადამე, კომპენსატორის მოქმედება, რომ 1მკვლ-ით გაიზარდოს, როცა იგი უკიდურეს ქვედა მდებარეობაში ომყოფება, საჭიროა ავწიოთ ზევით 0,27 მ-ით ანუ 27 სმ-ით. განვსაზღვროთ კომპენსატორის დანარჩენი მდებარეობები:

$$Z_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} = \sqrt{0,33} = 0,58 \text{ მ} = 58 \text{ სმ}$$

$$\Delta Z_3 = Z_1 - Z_3 = 0,98 - 0,58 = 0,40 \text{ მ} = 40 \text{ სმ}$$

$$\Delta Z'_3 = Z_2 - Z_3 = 0,71 - 0,58 = 0,13 \text{ მ} = 13 \text{ სმ}$$

$$Z_4 = \frac{1}{\sqrt{4}} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ მ} = 50 \text{ სმ}$$

$$\Delta Z_4 = Z_1 - Z_4 = 0,98 - 0,5 = 0,48 \text{ მ} = 48 \text{ სმ}$$

$$\Delta Z'_4 = Z_3 - Z_4 = 0,58 - 0,5 = 0,08 \text{ მ} = 8 \text{ სმ}$$

$$Z_5 = \frac{1}{\sqrt{5}} = \sqrt{0,2} = 0,45 \text{ მ} = 45 \text{ სმ}$$

$$\Delta Z_5 = Z_1 - Z_5 = 0,98 - 0,45 = 0,53 \text{ მ} = 53 \text{ სმ}$$

$$\Delta Z'_5 = Z_4 - Z_5 = 0,5 - 0,45 = 0,05 \text{ მ} = 5 \text{ სმ}$$

$$Z_6 = \frac{1}{\sqrt{6}} = \sqrt{0,166} = 0,408 \text{ მ} = 40,8 \text{ სმ}$$

$$\Delta Z_6 = Z_1 - Z_6 = 0,98 - 0,408 = 0,572 \text{ მ} = 57,2 \text{ სმ}$$

$$\Delta Z'_6 = Z_5 - Z_6 = 0,45 - 0,408 = 0,042 \text{ მ} = 4,2 \text{ სმ}$$

$$Z_7 = \frac{1}{\sqrt{7}} = \sqrt{0,143} = 0,379 \text{ მ} = 37,9 \text{ სმ}$$

$$\Delta Z_7 = Z_1 - Z_7 = 0,98 - 0,379 = 0,601 \text{ მ} = 60,1 \text{ სმ}$$

$$\Delta Z'_7 = Z_6 - Z_7 = 0,408 - 0,379 = 0,029 \text{ მ} = 2,9 \text{ სმ}$$

$$Z_8 = \frac{1}{\sqrt{8}} = \sqrt{0,125} = 0,354 \text{ } \vartheta = 35,4 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$\Delta Z_8 = Z_1 - Z_8 = 0,98 - 0,354 = 0,626 \vartheta = 62,6 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$\Delta Z'_8 = Z_7 - Z_8 = 0,379 - 0,354 = 0,025 \vartheta = 2,5 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$Z_9 = \frac{1}{\sqrt{9}} = \frac{1}{3} = 0,333 \text{ } \vartheta = 33,3 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$\Delta Z_9 = Z_1 - Z_9 = 0,98 - 0,333 = 0,647 \vartheta = 64,7 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$\Delta Z'_9 = Z_8 - Z_9 = 0,354 - 0,333 = 0,021 \vartheta = 2,1 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$Z_{10} = \frac{1}{\sqrt{10}} = \sqrt{0,1} = 0,316 \text{ } \vartheta = 31,6 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$\Delta Z_{10} = Z_1 - Z_{10} = 0,98 - 0,316 = 0,664 \vartheta = 66,4 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$\Delta Z'_{10} = Z_9 - Z_{10} = 0,333 - 0,316 = 0,017 \vartheta = 1,7 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$Z_{11} = \frac{1}{\sqrt{11}} = \sqrt{0,091} = 0,302 \text{ } \vartheta = 30,2 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$\Delta Z_{11} = Z_{10} - Z_{11} = 0,316 - 0,302 = 0,014 \vartheta = 1,4 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$\Delta Z'_{11} = Z_{10} - Z_{11} = 0,316 - 0,302 = 0,014 \vartheta = 1,4 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$Z_{12} = \frac{1}{\sqrt{12}} = \sqrt{0,083} = 0,289 \text{ } \vartheta = 28,9 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$\Delta Z_{12} = Z_1 - Z_{12} = 0,98 - 0,289 = 0,691 \vartheta = 69,1 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$\Delta Z'_{12} = Z_{11} - Z_{12} = 0,302 - 0,289 = 0,013 \vartheta = 1,3 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$Z_{13} = \frac{1}{\sqrt{13}} = \sqrt{0,077} = 0,278 \text{ } \vartheta = 27,8 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$\Delta Z_{13} = Z_1 - Z_{13} = 0,98 - 0,278 = 0,702 \vartheta = 70,2 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$\Delta Z'_{13} = Z_{12} - Z_{13} = 0,289 - 0,278 = 0,011 \vartheta = 1,1 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$Z_{14} = \frac{1}{\sqrt{14}} = \sqrt{0,071} = 0,268 \text{ } \vartheta = 26,8 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$\Delta Z_{14} = Z_1 - Z_{14} = 0,98 - 0,268 = 0,712 \vartheta = 71,2 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$\Delta Z'_{14} = Z_{13} - Z_{14} = 0,278 - 0,268 = 0,010 \vartheta = 1 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$Z_{15} = \frac{1}{\sqrt{15}} = \sqrt{0,067} = 0,260 \text{ } \vartheta = 26 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$\Delta Z_{15} = Z_1 - Z_{15} = 0,98 - 0,26 = 0,72 \vartheta = 72 \text{ } \text{б}\vartheta$$

$$\Delta Z'_{15} = Z_{14} - Z_{15} = 0,268 - 0,260 = 0,008 \vartheta = 0,8 \text{ } \text{б}\vartheta = 8 \vartheta$$

ამრიგად, მივიღეთ Z -ის სათანადო მნიშვნელობები, რომელთა მიხედვითაც შესაძლებელია, საჭიროების შემთხვევაში, კომპენსატორის სათანადო მდებარეობებში დაყენება და ჰაერის მხრიდან გრავიმეტრის ჩვენებაზე უარყოფითი ზეგავლენის კომპენსირება.

3.8 სენსორ – კომპენსატორის ურთიერთქმედების ექსპერიმენტული შემოწმება

ნაშრომის თეორიული კვლევისას, მივიღეთ, რომ კომპენსატორმა, რომლის მასა შეადგენს 150 კგ-ს, გრავიმეტრის 1.25 კგ-იან სენსორზე, რომ 1 მიკროგალით იმოქმედოს საჭიროა მათ შორის მანძილი იყოს 0,98მ. ექსპერიმენტულმა შემოწმებამ გვიჩვენა, რომ აღნიშნულ ურთიერთქმედებას ადგილი აქვს როცა კომპენსატორი მოძრაობს ინტერვალში $Z_1 \in [1.00; 0,93]$ მ.

დანარჩენი მონაცემებისათვის გვაქვს შემდეგი მნიშვნელობები:

თეორიულად:	ექსპერიმენტულად:
როცა $n=2$ მკგლ. მაშინ $Z_2=0,71$ მ	$Z_2 \in [0,74; 0,68]$ მ
$n=3$ მკგლ. $Z_3=0,58$ მ	$Z_3 \in [0,60; 0,54]$ მ
$n=4$ მკგლ. $Z_4=0,5$ მ	$Z_4 \in [0,53; 0,48]$ მ
$n=5$ მკგლ. $Z_5=0,45$ მ	$Z_5 \in [0,47; 0,43]$ მ
$n=6$ მკგლ. $Z_6=0,408$ მ	$Z_6 \in [0,410; 0,385]$ მ
$n=7$ მკგლ. $Z_7=0,379$ მ	$Z_7 \in [0,383; 0,369]$ მ
$n=8$ მკგლ. $Z_8=0,354$ მ	$Z_8 \in [0,360; 0,340]$ მ
$n=9$ მკგლ. $Z_9=0,333$ მ	$Z_9 \in [0,336; 0,325]$ მ
$n=10$ მკგლ. $Z_{10}=0,316$ მ	$Z_{10} \in [0,320; 0,310]$ მ
$n=11$ მკგლ. $Z_{11}=0,302$ მ	$Z_{11} \in [0,305; 0,295]$ მ
$n=12$ მკგლ. $Z_{12}=0,289$ მ	$Z_{12} \in [0,293; 0,281]$ მ
$n=13$ მკგლ. $Z_{13}=0,278$ მ	$Z_{13} \in [0,280; 0,272]$ მ
$n=14$ მკგლ. $Z_{14}=0,268$ მ	$Z_{14} \in [0,270; 0,263]$ მ

3.9. ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის გრავიმეტრის ჩვენებათა შემასწორებელი ცხრილის ექსპერიმენტული შემოწმება

ნაშრომის §3.4 ეძღვნება, ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივის სხვადასხვა მნიშვნელობების მიხედვით, გრავიმეტრის ჩვენებაში შესაბამისი შესწორებების შეტანის თეორიულ კვლევას. თეორიულ გამოთვლებზე დაყრდნობით შედგენილია სპეციალური ცხრილი (იხ. ცხრილი 1.), რომელიც შემდგომში შემოწმებული იქნა ექსპერიმენტულად. ექსპერიმენტული კვლევის შედეგების მიხედვით მიღებულია ახალი ცხრილი, რომელსაც აქვე წარმოვადგენთ:

ცხრილი – 2

ჰაერის სიმკვრივის ცვლილება $\Delta\rho$ კგ/მ ³	გრავიმეტრის ჩვენებაში შესატანი შესწორება Δa (თეორიული) (მკგლ)	გრავიმეტრის ჩვენებაში შესატანი შესწორება $\Delta a'$ (ექსპერიმენტული) მკგლ	აბსოლუტური ცდომილება	ფარადობითი ცდომილება
0,01	1,44	1,5	0,06	4%
0,02	2,88	3,0	0,12	4%
0,03	4,32	4,5	0,18	4%
0,04	5,76	6,0	0,24	4%
0,05	7,20	7,0	0,20	3%
0,06	8,64	9,0	0,36	4%
0,07	10,08	10,5	0,42	4%
0,08	11,52	11	0,52	4,7%
0,09	13,96	13	0,96	7,3%
0,1	14,4	15	0,6	4%
0,11	15,84	17	1,16	6,8%

3.10. ჰაერის სიმკვრივის ცვალეზადობაზე უწყვეტი დაკვირვების ჰიდრომექანიკური მეთოდი

ჰაერის სიმკვრივის განსაზღვრის ლაბორატორიული მეთოდები საკმაოდ შრომატევადია და ამასთანავე არც სიმკვრივის ცვალეზადობაზე უწყვეტი დაკვირვების საშუალეზას იძლევა. გარდა ამისა, ერთობ მოუხერხებელია მათი გამოყენება საველე პირობებში [2].

უნდა აღინიშნოს, რომ გრავიმეტრიული გაზომვების წარმოებისას, განსაკუთრებით კი ვიზუალური დაკვირვების გრავიმეტრებში, სპეციალური შემასწორებელი ცხრილების გამოყენება მოითხოვს ჰაერის სიმკვრივის ცვლილებაზე უწყვეტ დაკვირვებას [1;3], რის განსახორციელებლად გვინდა წარმოვადგინოთ შემდეგი მეთოდი:

მგრძნობიარე ბერკეტიან სასწორზე გაწონასწორებულია სხვადასხვა მასის ორი A და B ტვირთი (ნახ. 3.5.), ისე რომ, ერთ-ერთი მათგანი (A), მასზე ჰაერის მხრიდან არქიმედეს ძალის მოქმედების თავიდან აცილების მიზნით, მოთავსებულია წყლიან ჭურჭელში (1). მეორე (B) კი იმყოფება ჰაერთან უშუალო შეხებაში. გარკვეული მოსაზრების გამო (A) და (B) ტვირთები სასწორის ბერკეტის (2) ბოლოებზე ხისტადაა მიმაგრებული (3) და (4) ღეროებით. ტვირთებს გააჩნიათ l სიგრძის ტოლი მხრები. (A) და (B) ტვირთების მასები ისეა შერჩეული, რომ ისინი წონასწორობაში მოდიან მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როცა ჰაერის სიმკვრივე შეადგენს $1,29$ კგ/მ³. მას ხელსაწყოს სკალის (5) შუა წერტილი შეესაბამება, რასაც გვიჩვენებს ხელსაწყოს ისარი (6). ყოველივე ეს მოთავსებულია გაუმჭირვალე, კუბის ფორმის, კორპუსში (7), რომელსაც აქვს ოთხი ხნახნული ფეხი (8) და სამზერი მინა (9). კორპუსის ზედა ნაწილში მოთავსებულია საჰაერო ხრახნიანი მილი (10) და თარაზო (11).

ხრახნული ფეხების მეშვეობით ხელსაწყოს ვასწორებთ თარაზოში და ვხსნით საჰაერო მილს, რის შედეგადაც ტვირთი (B) აღმოჩნდება იმავე სიმკვრივის ჰაერში რა სიმკვრივის ჰაერიცაა ხელსაწყოს მდებარეობის ადგილზე. ჰაერის სიმკვრივის ცვლილების კვალობაზე, ცხადია, მის

პირდაპირპროპორციულად შეიცვლება ჰაერის მხრიდან (B) ტვირთზე მოქმედი არქიმედეს ძალის სიდიდე რაც გამოიწვევს ბერკეტის წონასწორობის დარღვევას და ისრის შესაბამის გადახრას. ცხადია, ბერკეტი და ისარი დახრილ მდგომარეობაშიც გაწონასწორდებიან. სწორედ ამ მიზნით არის (3) და (4) ღეროები ბერკეტის ბოლოებთან ხისტად მიმაგრებული. სანამ ხელსაწყოს დაგრადუირების წესს ჩამოვყალიბებთ, მანამ დავადგინოთ კავშირი A და B სხეულების მასებს შორის.

ვთქვათ, A სხეული დამზადებულია ალუმინისაგან და მისი მასა შეადგენს 100 გრამს, ე.ი. $m_A = 100$ გ. = 0,1 კგ.

მისი მოცულობა იქნება

$$V_A = \frac{m_A}{\rho}$$

მასზე წყლის მხრიდან მოქმედი არქიმედეს ძალა იქნება:

$$F_1 = \rho g V_A = \rho g \frac{m_A}{\rho}$$

მისი სიმძიმის ძალა კი $F_1 = m_A g$, ხოლო ტოლქმედი:

$$\Delta F_1 = F_1 - F_1 = m_A g - \rho g \frac{m_A}{\rho}$$

A სხეულის მაბრუნებელი მომენტი ასე გამოითვლება:

$$M_1 = l_1 \Delta F_1 = l \left(m_A g - \rho g \frac{m_A}{\rho} \right)$$

B სხეულის მასა აღვნიშნოთ m_B -თი. დავუშვათ ისიც ალუმინისგანაა დამზადებული. მაშინ მისი მოცულობა იქნება: $V_B = \frac{m_B}{\rho}$, სიმძიმის ძალა კი

$F_2 = m_B g$, ხოლო ჰაერის მხრიდან მასზე მოქმედი არქიმედეს ძალა ტოლია:

$$F_2 = \rho_1 g V_B = \rho g \frac{m_B}{\rho}$$

ტოლქმედი ძალა კი $\Delta F_2 = F_1 - F_2 = m_B g - \rho g \frac{m_B}{\rho}$

რაც შეეხება B სხეულის მაბრუნებელ მომენტს, იგი ასე გამოითვლება:

$$M_2 = l \cdot \Delta F_2 = l \cdot \left(m_B g - \rho g \frac{m_B}{\rho} \right)$$

ჩვენი დაშვებით, როცა $\rho = 1,29$ კგ/მ³, მაშინ $M_1 = M_2$ ე.ი. ვღებულობთ:

$$l \cdot \left(m_A g - \rho g \frac{m_A}{\rho} \right) = l \cdot \left(m_B g - \rho g \frac{m_B}{\rho} \right)$$

აქედან კი ვღებულობთ: $m_B = m_A \cdot \frac{\rho - \rho}{\rho - \rho}$. ამ უკანასკნელში რიცხვითი

მონაცემების ჩასმა გვაძლევს:

$$m_B = 0,063 \text{ კგ} = 63 \text{ გ}$$

მაშინ მისი მოცულობა იქნება:

$$V_B = \frac{m_B}{\rho} = \frac{0,063}{2,7 \cdot 10^3} = 0,023 \cdot 10^{-3} \text{ მ}^3 = 23 \text{ სმ}^3$$

ახლა ვიპოვოთ B სხეულზე ჰაერის მხრიდან მოქმედი არქიმედეს ძალა იმ შემთხვევისათვის, როცა ჰაერის სიმკვრივე შეიცვლება $0,01 \text{ კგ/მ}^3$ -ით, ანუ, როცა $\Delta\rho = 0,01 \text{ კგ/მ}^3$. აღვნიშნოთ იგი $\Delta F_{B\alpha}$ -თი, მაშინ ვღებულობთ:

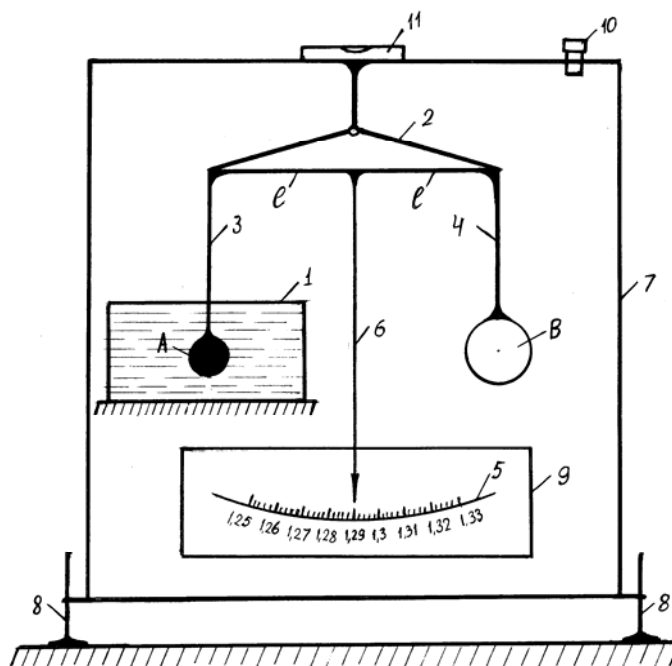
$$\Delta F_B = \Delta\rho g V_B = 0,01 \cdot 10 \cdot 0,023 \cdot 10^{-3} = 0,23 \cdot 10^{-5} \text{ ნ}$$

ახლა შეგვიძლია ვიპოვოთ ის უმცირესი მასა (Δm), რომლის სიმძიმის ძალა ტოლია $\Delta F_{B\alpha}$. ძალისა.

$$\Delta m g = 0,23 \cdot 10^{-5} \text{ ნ. აქედან}$$

$$\Delta m = 0,23 \cdot 10^{-6} \text{ კგ.} = 0,23 \cdot 10^{-3} \text{ გ.} = 0,23 \text{ მგ.}$$

ცხადია, თუ B სხეულის მასას ისე ავიღებთ, რომ იგი შეიცავდეს $0,23$ მილიგრამიან წვრილსაწონებს 10 ცალს მაინც, მაშინ გაწონასწორებული სასწორიდან თითოეული მათგანი ადებით ისრის ყოველი გადახრა მოგვცემს წერტილებს, რომელთაც თანმიმდევრობით დაეწერებათ: $1,30; 1,31; 1,32; \dots 1,40 \text{ კგ/მ}^3$. ამ წერტილების სიმეტრიული გადატანით საწინააღმდეგო მხარეს მივიღებთ სკალას, რომელზედაც უშუალოდ აითვლება ჰაერის სიმკვრივის ყოველი ცვლილება $1,20 \div 1,40 \text{ კგ/მ}^3$ დიაპაზონში, თუმცა, საჭიროების მიხედვით ამ დიაპაზონის კიდევ უფრო გაზრდაც შეიძლება.



ნახ. 5.3. ჰაერის სიმრვრის ცვალებადობაზე უწყვეტი დაკვირვების ხელსაწყო

4. გაზომვითა ცდომილებები

4.1. პირდაპირი გაზომვების ცდომილებათა ანალიზი

მეტროლოგიის ძირითადი პოსტულატის მიხედვით ცნობილია, რომ ყოველი გაზომვის შედეგი მიახლოებითია და არა ზუსტი, ანუ ნებისმიერი გაზომვა სრულდება გარკვეული ცდომილებით. გაზომვის შედეგის სიზუსტე და უტყუარობა დიდადაა დამოკიდებული ცდომილების შესწავლაზე, შეფასებასა და გათვალისწინებაზე.

ცდომილებების შესასწავლად და დასამუშავებლად შეიძლება გამოვიყენოთ მათემატიკური სტატისტიკის მეთოდები.

ჩვენს მიერ წარმოდგენილ მეთოდებში ძირითადად გამოყენებულია დ.ი. მენდელეევის სახელობის მეტროლოგიის ინსტიტუტის (ქ. სანქტ - პეტერბურგი) რეკომენდაციები და ამ დარგის აღიარებულ მეცნიერთა შრომები. აღნიშნული რეკომენდაციების მიხედვით, გაზომვის შედეგებზე შემთხვევითი ცდომილებების

გავლენათა შესამცირებლად, მიზანშეწონილია გაზომვები ჩატარდეს ერთნაირ პირობებში შემდგომისამებრ დიდი რაოდენობით და გაზომვის საბოლოო შედეგი ჩაიწეროს ასე:

$$X = \bar{X} + \Delta X \quad (4.1)$$

სადაც \bar{X} არის K რაოდენობით ჩატარებულ გაზომვის შედეგთა საშუალო არითმეტიკული

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_K}{K} \quad (4.2)$$

ხოლო ΔX კი გაზომვათა სარწმუნო ცდომილება, რომელიც როცა $K \geq 2$ იანგარისება ბოსეტის ფორმულის მიხედვით:

$$\Delta X = \alpha \sqrt{\sum_{i=1}^K (\Delta X_i)^2} \quad (4.3)$$

სადაც თავის მხრივ $\Delta X_i = \bar{X} - X_i$

ხოლო α -ს მნიშვნელობები კი გაზომვათა რაოდენობების მიხედვით აიღება შემდეგი ცხრილიდან (ცხრილი 3)

უნდა აღინიშნოს, რომ გაზომვათა აბსოლუტური ცდომილების სიდიდე სრულ წარმოდგენას ვერ გვაძლევს ჩატარებული გაზომვის სიზუსტეზე, ამიტომ ვანგარიშობთ ფარდობით ცდომილებას, რომელიც გვიჩვენებს თუ რა სიდიდის აბსოლუტური ცდომილება მოდის გასაზომი ფიზიკური სიდიდის ერთ ერთეულზე, ანუ აბსოლუტური ცდომილება გასაზომი სიდიდის ნამდვილი მნიშვნელობის რამდენ პროცენტს შეადგენს. იგი ასე გამოითვლება:

$$\gamma = \frac{\bar{\Delta X}}{X} \cdot 100\% \quad (4.4)$$

ცხრილი 3

K	2	3	4	5	6	7	8	9	10
α	2,00	1,76	0,93	0,62	0,47	0,38	0,32	0,24	0,21

სადაც $\bar{\Delta X}$ არის მრავალჯერადი გაზომვების შედეგად მიღებული საშუალო აბსოლუტური ცდომილება, ანუ სარწმუნო ცდომილება, რომელიც იანგარიშება ბოსეტის ფორმულით.

გაზომვის საბოლოო შედეგი კი, როგორც თავიდან აღვნიშნეთ, ჩაიწერება შემდეგი სახით:

$$X = \bar{X} \pm \Delta X$$

აქვე გვინდა შევნიშნოთ, რომ გარდა ბოსეტის ფორმულისა არსებობს ე. წ. საალბათო ცდომილების განსაზღვრის ფორმულაც, რომელიც გაზომვათა ნებისმიერი რაოდენობის დროს შეიძლება იქნეს გამოყენებული. მას აქვს სახე:

$$\Delta X_{\text{საალბ.}} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta X_i)^2}{n(n-1)}} \quad (4.5)$$

სადაც n გაზომვათა რიცხვია.

ფარდობითი საალბათო ცდომილების საანგარიშოდ გვაქვს ფორმულა:

$$\gamma_{\text{საალბ.}} = \frac{\Delta X_{\text{საალბ.}}}{\bar{X}} \cdot 100\% \quad (4.6)$$

საალბათო ცდომილება ეწოდება იმ ცდომილებას, რომლის მიმართ სეიძლება ითქვას, რომ მრავალჯერადი გაზომვებისას მიღებულ შემთხვევით ცდომილებათა ნახევარი აბსოლუტური სიდიდეებით ნაკლები იქნება საალბათო ცდომილებაზე ნახევარი კი მეტი.

ცალკე გვინდა შევნიშნოთ, რომ გარდა აღნიშნულისა არსებობს აგრეთვე გაზომვის შედეგთა ზღვრული ცდომილების საანგარიშო ფორმულა რომელსაც აქვს სახე:

$$\Delta X_{\text{ზღ.}} = 4,5 \Delta X_{\text{საალბ.}} \quad (4.7)$$

4.2. უმცირეს კვადრატთა მეთოდი

კვლევის პროცესში ჩატარებული თეორიული თუ პრაქტიკული შედეგები გვიჩვენებენ, რომ ზოგიერთი ექსპერტიმენტი შეიძლება აღიწეროს $y = A + Bx$ ტიპის განტოლებით. მაგალითად, ჰაერის სიმკვრივის ცვალებადობის სიდიდესა

და სიმძიმის ძალის აჩქარების ცვალებადობის სიდიდეებს შორის; აგრეთვე გრავიმეტრის ჩვენებათა თითოეული მიკროგალით ცვლილებებსა და გრაფიკომპენსატორის ტვირთის ვერტიკალურ გადაადგილებებს შორის.

თითოეული ამ შემთხვევისთვის A და B კოეფიციენტები იანგარიშება შემდეგნაირად:

$$A = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (4.8)$$

$$B = \frac{n \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (4.9)$$

ხოლო $\sum_{i=1}^n x_i$, $\sum_{i=1}^n y_i$ და $\sum_{i=1}^n x_i y_i$ გამოსახულებების მნიშვნელობათა გამოსათვლელად კი საჭიროა სპეციალური ცხრილის შედგენა.

უნდა აღინიშნოს, რომ ჩვენი შემთხვევისათვის ჰაერის სიმკვრივისა და გრავიმეტრის ჩვენებათა თითოეული ცვლილებისათვის, შესაბამისად, გრავიმეტრის ჩვენებათა და გრაფიკომპენსატორის ტვირთის ვერტიკალურ გადაადგილებათა გაზომვები ჩატარებულია თანაბარი რაოდენობით და ამიტომაც ვიყენებთ (4.5) და (4.6) ფორმულებს, მაგრამ თუ აღნიშნული გაზომვები არათანაბარი რაოდენობით იქნება ჩატარებული, ვთქვათ, x_1 სიდიდე m_1 რაოდენობით, x_2 სიდიდე m_2 რაოდენობით, x_k სიდიდე m_k რაოდენობით, ხოლო გაზომვათა საერთო რიცხვი იქნება

$$n = \sum_{i=1}^k m_i$$

მაშინ აღნიშნულ კოეფიციენტთა საანგარიშოდ გამოყენებული უნდა იქნას შემდეგი ფორმულები:

$$A = \frac{n \sum_{i=1}^k m_i x_i y_i - \sum_{i=1}^k m_i x_i \cdot \sum_{i=1}^k m_i y_i}{n \sum_{i=1}^k m_i x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^k m_i x_i \right)^2} \quad (4.10)$$

$$B = \frac{n \sum_{i=1}^k m_i y_i \cdot \sum_{i=1}^k m_i x_i^2 - \sum_{i=1}^k m_i x_i \cdot \sum_{i=1}^k m_i x_i y_i}{n \sum_{i=1}^k m_i x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^k m_i x_i \right)^2} \quad (4.11)$$

4.3. ექსპერიმენტის შედეგების მეტროლოგიური დამუშავება

4.3.1. გრავიმეტრის ჩვენების დამოკიდებულება ჰაერის სიმკვრივის ცვალებადობებზე.

პარაგრაფ 3.4.-ში თეორიული ანგარიშით მიღებული გვაქვს ჰაერის სიმკვრის ნორმალური მნიშვნელობიდან ყოველი 0,01 კგ/მ³-ით ცვლილებისას (თავდაპირველად განხილულია ზრდის შემთხვევები) სიმძიმის ძალის აჩქარების შესაბამის ცვლილებათა მნიშვნელობები. ექსპერიმენტულმა შემოწმებამ კი, როცა ჰაერის სიმკვრივის ყოველი 0,01 კგ/მ³-ით ცვლილებისას ჩატარდა სიმძიმის ძალის აჩქარების ცვლილების 5-ჯერ გაზომვა, მოგვცა შემდეგი სურათი (იხ. ცხრილი 4).

ვიანგარიშით გაზომვათა ცდომილებები და გამოვსახოთ, როგორც გრაფიკულად, ისე ანალიზურად, დამოკიდებულება ჰაერის სიმკვრივის ცვლილებასა და სიმძიმის ძალის აჩქარების ცვლილებას შორის, ანუ შევადგინოთ $\Delta\gamma$ -სა და $\Delta\alpha$ -ს შორის დამოკიდების ემპირიული ფორმულა.

ცხრილი 4

ჰაერის სიმკვრივის ცვლილებები $\Delta\rho_{on}$ კგ/მ ³	სიმძიმის ძალის აჩქარების ცვლილებები (მკვლ)					საშუალო მნიშვნელობა $\overline{\Delta\alpha_n}$	საშ. აბსოლუტური ცდომილება δ_n	საშ. ფარდობითი ცდომილება γ_n
	$(\Delta\alpha_n)_1$	$(\Delta\alpha_n)_2$	$(\Delta\alpha_n)_3$	$(\Delta\alpha_n)_4$	$(\Delta\alpha_n)_5$			
0,01	1,3	1,4	1,6	1,5	1,6	1,48	0,12	1,84
0,02	2,7	2,8	2,9	2,7	2,8	2,78		
0,03	4,1	4,3	4,2	4,1	4,2	4,22		
0,04	5,5	5,6	5,7	5,5	5,6	5,58		

0,05	6,9	7,0	6,8	7,2	7,3	7,24		
0,06	8,6	8,3	8,2	8,6	8,6	8,46		
0,07	9,8	9,9	9,7	9,6	9,6	9,72		
0,08	11,3	10,4	11,2	11,4	11,3	11,12		
0,09	12,6	12,7	12,8	12,8	12,8	12,74		
0,10	14,4	13,9	14,6	14,8	14,4	14,42		
0,11	15,3	15,6	15,4	15,6	15,8	15,54		

როგორც ცხრილი 4-დან ჩანს, როცა $\Delta\delta_{01} = 0,01 \text{ კმ/მ}^3$ მაშინ $(\Delta a_1)_1 = 1,3 \text{ მკგ/ლ}$,
 $(\Delta a_2)_1 = 1,4 \text{ მკგ/ლ}$, $(\Delta a_3)_1 = 1,6 \text{ მკგ/ლ}$, $(\Delta a_4)_1 = 1,5 \text{ მკგ/ლ}$, $(\Delta a_5)_1 = 1,6 \text{ მკგ/ლ}$.

(4.2) ფორმულის მიხედვით გამოვთვალოთ მათი საშუალო მნიშვნელობა:

$$\overline{\Delta a_1} = \frac{(\Delta a_1)_1 + (\Delta a_2)_1 + \dots + (\Delta a_5)_1}{5} = \frac{1,3 + 1,4 + 1,6 + 1,5 + 1,6}{5} = 1,48 \text{ მკგ/ლ}$$

ახლა ვიანგარიშოთ $\Delta\rho_{01} = 0,01 \text{ კმ}^3/\text{მ}^3$ -ის შემთხვევაში თითოეული გაზომვის
 ნარჩენი ცდომილება

$$\Delta a_1^I = \overline{\Delta a_1} - (\Delta a_1)_1 = 1,48 - 1,3 = 0,18 \text{ მკგ/ლ}$$

$$\Delta a_1^{II} = \overline{\Delta a_1} - (\Delta a_2)_1 = 1,48 - 1,4 = 0,08 \text{ მკგ/ლ}$$

$$\Delta a_1^{III} = \overline{\Delta a_1} - (\Delta a_3)_1 = 1,48 - 1,6 = -0,12 \text{ მკგ/ლ}$$

$$\Delta a_1^{IV} = \overline{\Delta a_1} - (\Delta a_4)_1 = 1,48 - 1,5 = -0,02 \text{ მკგ/ლ}$$

$$\Delta a_1^V = \overline{\Delta a_1} - (\Delta a_5)_1 = 1,48 - 1,6 = -0,12 \text{ მკგ/ლ}$$

ახლა კი ბოსეტის ფორმულისა (4.3) და ცხრილი 3-ის გამოყენებით
 ვიანგარიშოთ აღნიშნულ გაზომვათა სარწმუნო ცდომილება (Δa_1) . ჩვენი
 შემთხვევისათვის $K = 5$ ამიტომ ვღებულობთ:

$$\Delta a_1 = 0,62 \sqrt{(\Delta a_1^I)^2 + (\Delta a_1^{II})^2 + \dots + (\Delta a_1^V)^2} =$$

$$= 0,62 \sqrt{0,0324 + 0,0064 + 0,0144 + 0,0004 + 0,0144} = 0,62 \sqrt{0,0680} = 0,62 \cdot 0,26 = 0,16$$

მაშასადამე $\Delta a_1 = 0,16 \text{ მკგ/ლ}$.

$\Delta\rho_{01} = 0,01 \text{ კმ}^3/\text{მ}^3$ -ის შემთხვევაში გაზომვის ნამდვილი მნიშვნელობისთვის
 $(\Delta a_{6.1})$ ვღებულობთ:

$$\Delta a_{6.1} = \overline{\Delta a_1} \pm \Delta a_1 = 1,48 \pm 0,16$$

მაშასადამე, მივიღეთ დიაპაზონი, რომელშიც აუცილებლად იქნება
 მოთავსებული გასაზომი სიდიდის ნამდვილი მნიშვნელობა. ჩვენ შეგვიძლია იგი

ავილოთ $\overline{\Delta a_1}$ -ის ტოლად. ე. ი. $\Delta a_{6,1} = 1,48 \text{ mkg/l}$ მაშინ თეორიული ანგარიშით მიღებულ შედეგთან შედარებითაბსოლუტური ცდომილება იქნება:

$$\delta_1 = |\Delta a_{m,1} - \Delta a_{6,1}| = |1,4 - 1,48| = 0,08 \text{ mkg/l}$$

ფარდობითი ცდომილება კი იქნება:

$$\gamma = \frac{\delta_1}{\Delta a_{m,1}} \cdot 100\% = \frac{0,08}{1,4} \cdot 100 = 5,7\%$$

დანარჩენი შემთხვევებისთვის ანალოგიური მსჯელობით ვღებულობთ:

$$1. \quad \Delta \rho_{02} = 0,02 \frac{\text{მბ}}{\text{მ}^3}$$

$$\overline{\Delta a_2} = \frac{(\Delta a_1)_2 + (\Delta a_2)_2 + \dots + (\Delta a_5)_2}{5} = \frac{2,7 + 2,8 + 2,9 + 2,7 + 2,8}{5} = 2,78$$

$$\Delta a_2^I = \overline{\Delta a_2} - (\Delta a_1)_2 = 2,78 - 2,7 = 0,08$$

$$\Delta a_2^{II} = \overline{\Delta a_2} - (\Delta a_2)_2 = 2,78 - 2,8 = -0,02$$

$$\Delta a_2^{III} = \overline{\Delta a_2} - (\Delta a_3)_2 = 2,78 - 2,9 = -0,12$$

$$\Delta a_2^{IV} = \overline{\Delta a_2} - (\Delta a_4)_2 = 2,78 - 2,7 = 0,08$$

$$\Delta a_2^V = \overline{\Delta a_2} - (\Delta a_5)_2 = 2,78 - 2,8 = -0,02$$

$$\Delta a_2 = 0,62 \sqrt{(\Delta a_2^I)^2 + (\Delta a_2^{II})^2 + \dots + (\Delta a_2^V)^2}$$

$$= 0,62 \sqrt{0,0064 + 0,0003 + 0,0144 + 0,0064 + 0,0004} = 0,62 \sqrt{0,28} =$$

$$= 0,62 \cdot 0,529 = 0,328 \approx 0,33$$

ე. ი. $\Delta a_2 \approx 0,33 \text{ mkg/l}$

$$\Delta a_{n,2} = \overline{\Delta a_2} \pm \Delta a_2 = 2,78 \pm 0,33$$

$$\Delta a_{n,2} = 2,78 \text{ mkg/l}$$

$$\delta_2 = |\Delta a_{T,2} - \Delta a_{n,2}| = |2,8 - 2,78| = 0,02 \text{ mkg/l}$$

ფარდობითი ცდომილება კი იქნება:

$$\gamma_2 = \frac{\delta_2}{\Delta a_{T,2}} \cdot 100\% = \frac{0,02}{2,8} \cdot 100 = 0,71\%$$

$$2. \quad \Delta \rho_{03} = 0,03 \frac{\text{მბ}}{\text{მ}^3}$$

$$\overline{\Delta a_3} = \frac{(\Delta a_1)_3 + (\Delta a_2)_3 + \dots + (\Delta a_5)_3}{5} = \frac{4,1 + 4,3 + 4,2 + 4,1 + 4,2}{5} = 4,18 \text{ mkg/l}$$

$$\Delta a_3^I = \overline{\Delta a_3} - (\Delta a_1)_3 = 4,18 - 4,1 = 0,08$$

$$\Delta a_3^{II} = \overline{\Delta a_3} - (\Delta a_2)_3 = 4,18 - 4,3 = -0,12$$

$$\Delta a_3^{III} = \overline{\Delta a_3} - (\Delta a_3)_3 = 4,18 - 4,2 = -0,02$$

$$\Delta a_3^{IV} = \overline{\Delta a_3} - (\Delta a_4)_3 = 4,18 - 4,1 = 0,08$$

$$\Delta a_3^V = \overline{\Delta a_3} - (\Delta a_5)_3 = 4,18 - 4,2 = -0,02$$

$$\begin{aligned} \Delta a_3 &= 0,62 \sqrt{(\Delta a_3^I)^2 + (\Delta a_3^{II})^2 + \dots + (\Delta a_3^V)^2} = \\ &= 0,62 \sqrt{0,0064 + 0,0144 + 0,0004 + 0,0016 + 0,0004} = 0,62 \sqrt{0,0232} = \\ &= 0,62 \cdot 0,1523 = 0,094 \approx 0,09 \end{aligned}$$

г. о. $\Delta a_3 \approx 0,09 \text{ mkgf}$

$$\Delta a_{n,3} = \overline{\Delta a_3} \pm \Delta a_3 = 4,18 \pm 0,09$$

$$\Delta a_{n,3} = 4,18 \text{ mkgf}$$

$$\delta_3 = |\Delta a_{\tau,3} - \Delta a_{n,3}| = |4,2 - 4,18| = 0,02 \text{ mkgf}$$

$$\gamma_3 = \frac{\delta_3}{\Delta a_{\tau,3}} \cdot 100\% = \frac{0,02}{4,2} \cdot 100 = 0,48\%$$

3. $\Delta \rho_{04} = 0,04 \frac{\text{жб}}{\text{г}^3}$

$$\overline{\Delta a_4} = \frac{(\Delta a_1)_4 + (\Delta a_2)_4 + \dots + (\Delta a_5)_4}{5} = \frac{5,5 + 5,6 + 5,7 + 5,5 + 5,6}{5} = 5,58 \text{ mkgf}$$

$$\Delta a_4^I = \overline{\Delta a_4} - (\Delta a_1)_4 = 5,58 - 5,5 = 0,08$$

$$\Delta a_4^{II} = \overline{\Delta a_4} - (\Delta a_2)_4 = 5,58 - 5,6 = -0,02$$

$$\Delta a_4^{III} = \overline{\Delta a_4} - (\Delta a_3)_4 = 5,58 - 5,7 = -0,12$$

$$\Delta a_4^{IV} = \overline{\Delta a_4} - (\Delta a_4)_4 = 5,58 - 5,5 = 0,08$$

$$\Delta a_4^V = \overline{\Delta a_4} - (\Delta a_5)_4 = 5,58 - 5,6 = -0,02$$

$$\begin{aligned} \Delta a_4 &= 0,62 \sqrt{(\Delta a_4^I)^2 + (\Delta a_4^{II})^2 + \dots + (\Delta a_4^V)^2} = \\ &= 0,62 \sqrt{0,0064 + 0,0004 + 0,0144 + 0,064 + 0,0004} = 0,62 \sqrt{0,0280} = \\ &= 0,62 \cdot 0,17 = 0,094 \approx 0,11 \end{aligned}$$

г. о. $\Delta a_4 \approx 0,11 \text{ mkgf}$

$$\Delta a_{n,4} = \overline{\Delta a_4} \pm \Delta a_4 = 5,58 \pm 0,11$$

$$\Delta a_{n,4} = 5,58 \text{ mkgf}$$

$$\delta_4 = |\Delta a_{\tau,4} - \Delta a_{n,4}| = |5,6 - 5,58| = 0,02 \text{ mkgf}$$

$$\gamma_4 = \frac{\delta_4}{\Delta a_{\tau,4}} \cdot 100\% = \frac{0,02}{5,6} \cdot 100 = 0,36\%$$

$$4. \quad \Delta\rho_{05} = 0,05 \frac{\delta^3}{\delta^3} \\ \overline{\Delta a_5} = \frac{(\Delta a_1)_5 + (\Delta a_2)_5 + \dots + (\Delta a_5)_5}{5} = \frac{6,9 + 7,0 + 6,8 + 7,2 + 7,3}{5} = 7,24 \text{mkgf}$$

$$\Delta a_5^I = \overline{\Delta a_5} - (\Delta a_1)_5 = 7,24 - 6,9 = 0,34$$

$$\Delta a_5^{II} = \overline{\Delta a_5} - (\Delta a_2)_5 = 7,24 - 7,0 = 0,24$$

$$\Delta a_5^{III} = \overline{\Delta a_5} - (\Delta a_3)_5 = 7,24 - 6,8 = 0,44$$

$$\Delta a_5^{IV} = \overline{\Delta a_5} - (\Delta a_4)_5 = 7,24 - 7,2 = 0,04$$

$$\Delta a_5^V = \overline{\Delta a_5} - (\Delta a_5)_5 = 7,24 - 7,3 = -0,06$$

$$\Delta a_5 = 0,62 \sqrt{(\Delta a_5^I)^2 + (\Delta a_5^{II})^2 + \dots + (\Delta a_5^V)^2} = \\ = 0,62 \sqrt{0,1156 + 0,0576 + 0,1936 + 0,0016 + 0,0036} = 0,62 \sqrt{0,4720} = \\ = 0,62 \cdot 0,69 = 1,31$$

г. о. $\Delta a_{05} = 1,31 \text{mkgf}$

$$\Delta a_{n,5} = \overline{\Delta a_5} \pm \Delta a_5 = 7,24 \pm 1,31$$

$$\Delta a_{n,5} = 7,248 \text{mkgf}$$

$$\delta_5 = |\Delta a_{\tau,5} - \Delta a_{n,5}| = |7,0 - 7,24| = 0,24 \text{mkgf}$$

$$\gamma_5 = \frac{\delta_5}{\Delta a_{\tau,5}} \cdot 100\% = \frac{0,24}{7,0} \cdot 100 = 3,4\%$$

$$5. \quad \Delta\rho_{06} = 0,06 \frac{\delta^3}{\delta^3}$$

$$\overline{\Delta a_6} = \frac{(\Delta a_1)_6 + (\Delta a_2)_6 + \dots + (\Delta a_6)_6}{5} = \frac{8,6 + 8,3 + 8,2 + 8,6 + 8,6}{5} = 8,46 \text{mkgf}$$

$$\Delta a_6^I = \overline{\Delta a_6} - (\Delta a_1)_6 = 8,46 - 8,6 = 0,04$$

$$\Delta a_6^{II} = \overline{\Delta a_6} - (\Delta a_2)_6 = 8,46 - 8,3 = 0,16$$

$$\Delta a_6^{III} = \overline{\Delta a_6} - (\Delta a_3)_6 = 8,46 - 8,2 = 0,26$$

$$\Delta a_6^{IV} = \overline{\Delta a_6} - (\Delta a_4)_6 = 8,46 - 8,6 = -0,14$$

$$\Delta a_6^V = \overline{\Delta a_6} - (\Delta a_5)_6 = 8,46 - 8,6 = -0,14$$

$$\Delta a_6 = 0,62 \sqrt{(\Delta a_6^I)^2 + (\Delta a_6^{II})^2 + \dots + (\Delta a_6^V)^2} = \\ = 0,62 \sqrt{0,0016 + 0,0256 + 0,0676 + 0,0196 + 0,0196} = 0,62 \sqrt{0,1640} = \\ = 0,62 \cdot 0,4 = 0,25$$

г. о. $\Delta a_6 = 0,25 \text{mkgf}$

$$\Delta a_{n,6} = \overline{\Delta a_6} \pm \Delta a_6 = 8,46 \pm 0,25$$

$$\Delta a_{n,6} = 8,46 \text{mkgf}$$

$$\delta_6 = |\Delta a_{\tau,6} - \Delta a_{n,6}| = |8,4 - 8,46| = 0,06 \text{mkgf}$$

$$\gamma_6 = \frac{\delta_6}{\Delta a_{\tau,6}} \cdot 100\% = \frac{0,06}{8,4} \cdot 100 = 0,7\%$$

$$6. \quad \Delta\rho_{07} = 0,07 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\overline{\Delta a_7} = \frac{(\Delta a_1)_7 + (\Delta a_2)_7 + \dots + (\Delta a_5)_7}{5} = \frac{9,8 + 9,9 + 9,7 + 9,6 + 9,6}{5} = 9,72 \text{ mkg/l}$$

$$\Delta a_7^I = \overline{\Delta a_7} - (\Delta a_1)_7 = 9,72 - 9,8 = -0,08$$

$$\Delta a_7^{II} = \overline{\Delta a_7} - (\Delta a_2)_7 = 9,72 - 9,9 = -0,18$$

$$\Delta a_7^{III} = \overline{\Delta a_7} - (\Delta a_3)_7 = 9,72 - 9,7 = 0,02$$

$$\Delta a_7^{IV} = \overline{\Delta a_7} - (\Delta a_4)_7 = 9,72 - 9,6 = 0,12$$

$$\Delta a_7^V = \overline{\Delta a_7} - (\Delta a_5)_7 = 9,72 - 9,6 = 0,12$$

$$\Delta a_7 = 0,62 \sqrt{(\Delta a_7^I)^2 + (\Delta a_7^{II})^2 + \dots + (\Delta a_7^V)^2} =$$

$$= 0,62 \sqrt{0,0064 + 0,0324 + 0,0004 + 0,0144 + 0,0144} = 0,62 \sqrt{0,0680} =$$

$$= 0,62 \cdot 0,26 = 0,16$$

$$j. \quad \Delta a_7 = 0,16 \text{ mkg/l}$$

$$\Delta a_{n,7} = \overline{\Delta a_7} \pm \Delta a_7 = 9,72 \pm 0,16$$

$$\Delta a_{n,7} = 9,72 \text{ mkg/l}$$

$$\delta_{7,6} = |\Delta a_{T,7} - \Delta a_{n,7}| = |9,8 - 9,72| = 0,08 \text{ mkg/l}$$

$$\gamma_7 = \frac{\delta_7}{\Delta a_{T,7}} \cdot 100\% = \frac{0,08}{9,8} \cdot 100 = 0,8\%$$

$$7. \quad \Delta\rho_{08} = 0,08 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\overline{\Delta a_8} = \frac{(\Delta a_1)_8 + (\Delta a_2)_8 + \dots + (\Delta a_5)_8}{5} = \frac{11,3 + 10,4 + 11,2 + 11,4 + 11,3}{5} = 11,12 \text{ mkg/l}$$

$$\Delta a_8^I = \overline{\Delta a_8} - (\Delta a_1)_8 = 11,12 - 11,3 = -0,18$$

$$\Delta a_8^{II} = \overline{\Delta a_8} - (\Delta a_2)_8 = 11,12 - 10,4 = 0,72$$

$$\Delta a_8^{III} = \overline{\Delta a_8} - (\Delta a_3)_8 = 11,12 - 11,2 = -0,08$$

$$\Delta a_8^{IV} = \overline{\Delta a_8} - (\Delta a_4)_8 = 11,12 - 11,4 = -0,28$$

$$\Delta a_8^V = \overline{\Delta a_8} - (\Delta a_5)_8 = 11,12 - 11,3 = -0,18$$

$$\Delta a_8 = 0,62 \sqrt{(\Delta a_8^I)^2 + (\Delta a_8^{II})^2 + \dots + (\Delta a_8^V)^2} =$$

$$= 0,62 \sqrt{0,0324 + 0,5184 + 0,0064 + 0,0784 + 0,0324} = 0,62 \sqrt{0,6700} =$$

$$= 0,62 \cdot 0,81 = 0,5$$

$$j. \quad \Delta a_8 = 0,5 \text{ mkg/l}$$

$$\Delta a_{n,8} = \overline{\Delta a_8} \pm \Delta a_8 = 11,12 \pm 0,5$$

$$\Delta a_{n,8} = 11,12 \text{ mkg/l}$$

$$\delta_8 = |\Delta a_{T,8} - \Delta a_{n,8}| = |11,2 - 11,12| = 0,08 \text{ mkg/l}$$

$$\gamma_8 = \frac{\delta_8}{\Delta a_{T,8}} \cdot 100\% = \frac{0,08}{11,2} \cdot 100 = 0,7\%$$

$$8. \quad \Delta \rho_{09} = 0,09 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ \bar{\Delta a}_9 = \frac{(\Delta a_1)_9 + (\Delta a_2)_9 + \dots + (\Delta a_5)_9}{5} = \frac{12,6 + 12,7 + 12,8 + 12,8}{5} = 12,74 \text{ mkg/l}$$

$$\Delta a_9^I = \bar{\Delta a}_9 - (\Delta a_1)_9 = 12,74 - 12,6 = 0,14$$

$$\Delta a_9^{II} = \bar{\Delta a}_9 - (\Delta a_2)_9 = 12,74 - 12,7 = 0,04$$

$$\Delta a_9^{III} = \bar{\Delta a}_9 - (\Delta a_3)_9 = 12,74 - 12,8 = 0,06$$

$$\Delta a_9^{IV} = \bar{\Delta a}_9 - (\Delta a_4)_9 = 12,74 - 12,8 = -0,06$$

$$\Delta a_9^V = \bar{\Delta a}_9 - (\Delta a_5)_9 = 12,74 - 12,8 = -0,06$$

$$\Delta a_{9,4} = 0,62 \sqrt{(\Delta a_9^I)^2 + (\Delta a_9^{II})^2 + \dots + (\Delta a_9^V)^2} = \\ = 0,62 \sqrt{0,0196 + 0,0016 + 0,0036 + 0,0036 + 0,0036} = 0,62 \sqrt{0,0300} = \\ = 0,62 \cdot 0,17 = 0,79 \approx 0,8$$

$$j. \quad \Delta a_9 = 0,8 \text{ mkg/l}$$

$$\Delta a_{n,9} = \bar{\Delta a}_9 \pm \Delta a_9 = 12,74 \pm 0,8$$

$$\Delta a_{n,9} = 12,74 \text{ mkg/l}$$

$$\delta_9 = |\Delta a_{T,9} - \Delta a_{n,9}| = |12,6 - 12,74| = 0,14 \text{ mkg/l}$$

$$\gamma_9 = \frac{\delta_9}{\Delta a_{T,9}} \cdot 100\% = \frac{0,14}{12,6} \cdot 100 = 1,2\%$$

$$9. \quad \Delta \rho_{010} = 0,10 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ \bar{\Delta a}_{10} = \frac{(\Delta a_1)_{10} + (\Delta a_2)_{10} + \dots + (\Delta a_5)_{10}}{5} = \frac{14,4 + 13,9 + 14,6 + 14,8 + 14,4}{5} = 14,42 \text{ mkg/l}$$

$$\Delta a_{10}^I = \bar{\Delta a}_{10} - (\Delta a_1)_{10} = 14,42 - 14,4 = 0,02$$

$$\Delta a_{10}^{II} = \bar{\Delta a}_{10} - (\Delta a_2)_{10} = 14,42 - 13,9 = 0,52$$

$$\Delta a_{10}^{III} = \bar{\Delta a}_{10} - (\Delta a_3)_{10} = 14,42 - 14,6 = -0,18$$

$$\Delta a_{10}^{IV} = \bar{\Delta a}_{10} - (\Delta a_4)_{10} = 14,42 - 14,8 = -0,38$$

$$\Delta a_{10}^V = \bar{\Delta a}_{10} - (\Delta a_5)_{10} = 14,42 - 14,4 = 0,02$$

$$\Delta a_{10} = 0,62 \sqrt{(\Delta a_{10}^I)^2 + (\Delta a_{10}^{II})^2 + \dots + (\Delta a_{10}^V)^2} = \\ = 0,62 \sqrt{0,0004 + 0,2744 + 0,0324 + 0,1444 + 0,0004} = 0,62 \sqrt{0,4520} = \\ = 0,62 \cdot 0,67 = 0,4$$

$$j. \quad \Delta a_{10} = 0,4 \text{ mkg/l}$$

$$\Delta a_{n,10} = \overline{\Delta a}_{10} \pm \Delta a_{10} = 14,42 \pm 0,4$$

$$\Delta a_{n,10} = 14,42 \text{mkgf}$$

$$\delta_{10} = |\Delta a_{T,10} - \Delta a_{n,10}| = |14,0 - 14,42| = 0,42 \text{mkgf}$$

$$\gamma_{10} = \frac{\delta_{10}}{\Delta a_{T,10}} \cdot 100\% = \frac{0,42}{14,0} \cdot 100 = 3\%$$

$$10. \Delta \rho_{011} = 0,11 \frac{\text{გ}}{\text{სმ}^3}$$

$$\overline{\Delta a}_{11} = \frac{(\Delta a_1)_{11} + (\Delta a_2)_{11} + \dots + (\Delta a_5)_{11}}{5} = \frac{15,3 + 15,6 + 15,4 + 15,6 + 15,8}{5} = 15,54 \text{mkgf}$$

$$\Delta a_{11}^I = \overline{\Delta a}_{11} - (\Delta a_1)_{11} = 15,54 - 15,3 = 0,24$$

$$\Delta a_{11}^{II} = \overline{\Delta a}_{11} - (\Delta a_2)_{11} = 15,54 - 15,6 = 0,06$$

$$\Delta a_{11}^{III} = \overline{\Delta a}_{11} - (\Delta a_3)_{11} = 15,54 - 15,4 = 0,14$$

$$\Delta a_{11}^{IV} = \overline{\Delta a}_{11} - (\Delta a_4)_{11} = 15,54 - 15,6 = -0,06$$

$$\Delta a_{11}^V = \overline{\Delta a}_{11} - (\Delta a_5)_{11} = 15,54 - 15,8 = -0,26$$

$$\Delta a_{11} = 0,62 \sqrt{(\Delta a_{11}^I)^2 + (\Delta a_{11}^{II})^2 + \dots + (\Delta a_{11}^V)^2} =$$

$$= 0,62 \sqrt{0,0576 + 0,0036 + 0,0196 + 0,0036 + 0,0676} = 0,62 \sqrt{0,1490} =$$

$$= 0,62 \cdot 0,37 = 0,9$$

$$j. \text{ o. } \Delta a_{11} = 0,9 \text{mkgf}$$

$$\Delta a_{n,11} = \overline{\Delta a}_{11} \pm \Delta a_{11} = 15,54 \pm 0,9$$

$$\Delta a_{n,11} = 15,54 \text{mkgf}$$

$$\delta_{11} = |\Delta a_{T,11} - \Delta a_{n,11}| = |15,4 - 15,54| = 0,14 \text{mkgf}$$

$$\gamma_{11} = \frac{\delta_{11}}{\Delta a_{T,11}} \cdot 100\% = \frac{0,14}{15,49} \cdot 100 = 0,9\%$$

ახლა შევადგინოთ სიმძიმის ძალის აჩქარების ცვლილების ჰაერის სიმკვრივის ცვლილებასთან დამოკიდებულების გამომსახველი ემპირიული ფორმულა.

ცხრილი 4-ის მონაცემების მიხედვით გრაფიკულად გამოვსახოთ დამოკიდებულება $\Delta \rho_{on}$ -ის მნიშვნელობებსა და შესაბამის $\overline{\Delta a}_n$ -ის მნიშვნელობებს შორის. ორდინატთა ღერძზე გადავზომოთ $\overline{\Delta a}_n$ -ის მნიშვნელობები, აბსცისათა ღერძზე კი $\Delta \rho_{on}$ -ის მნიშვნელობები (ნახ. 4.1.)

როგორც აგებული დიაგრამიდან ჩანს დამოკიდებულება $\Delta\alpha_n$ -სა და $\Delta\rho_n$ -ს შორის არის წრფივი, ამიტომ აღნიშნული ემპირიული ფორმულა უნდა ვეძებოთ სახით:

$$y = Ax + B \quad (4.12)$$

ამ უკანასკნელში A და B კოეფიციენტების (7.5) და (7.6) ფორმულების მეშვეობით საპოვნელად ჯერ ვიპოვოთ აღნიშნულ ფორმულაში შემავალ სიდიდეთა მნიშვნელობები და შევადგინოთ მათი ცხრილი (ცხრილი 5.)

ახლა კი (4.8) და (4.9) ფორმულების გამოყენებით შეგვიძლია ვიპოვოთ A და B კოეფიციენტების მნიშვნელობები (ჩვენ შემთხვევაში $n = 11$)

$$A = \frac{11 \cdot 7,1060 - 0,66 \cdot 92,72}{11 \cdot 0,0506 - 0,66^2} = \frac{16,9708}{0,121} = 140,26$$

$$B = \frac{92,72 \cdot 0,0506 - 0,66 \cdot 7,1060}{11 \cdot 0,0506 - 0,66^2} = \frac{0,0017}{0,121} = 0,014$$

მაშინ (4.12) ფორმულის მიხედვით ვღებულობთ:

$$y = 140,26x + 0,014$$

ანუ

$$\Delta a = 140,26\Delta\rho_0 + 0,014$$

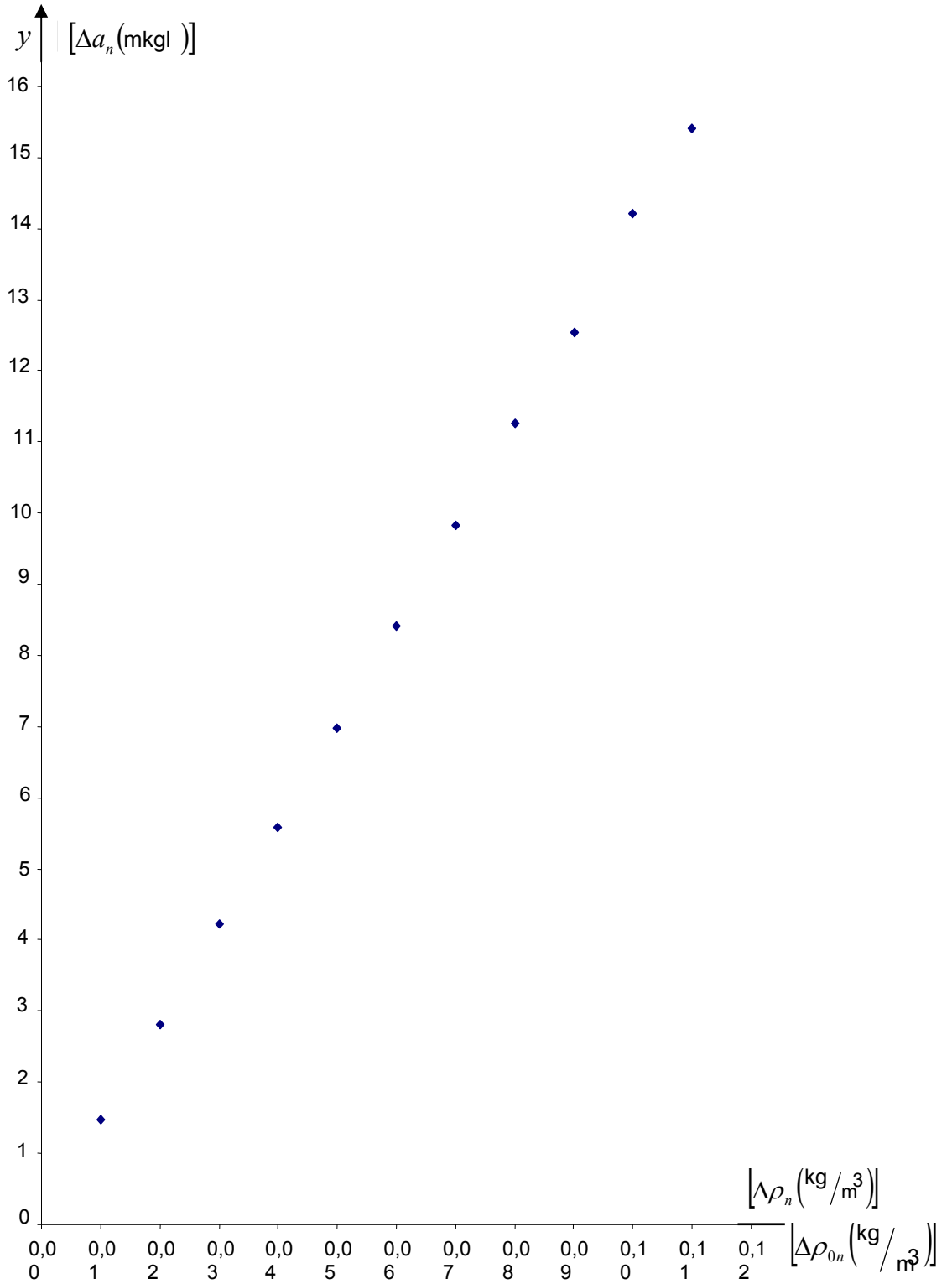
x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
0,01	1,48	0,0001	0,0148
0,02	2,82	0,0004	0,0564
0,03	4,22	0,0009	0,1266
0,04	5,58	0,0016	0,2232
0,05	6,98	0,0025	0,3490
0,06	8,42	0,0036	0,5052
0,07	9,82	0,0049	0,6874
0,08	11,26	0,0064	0,9008
0,09	11,54	0,0081	1,1286
0,10	14,20	0,0100	1,4200
0,11	15,40	0,0121	1,6940
$\sum_{i=1}^n x_i$	$\sum_{i=1}^n y_i$	$\sum_{i=1}^n x_i^2$	$\sum_{i=1}^n x_i y_i$
0,66	92,72	0,0506	7,1060

4.3.2. გრავიმეტრის ჩვენების დამოკიდებულება

სენსორ – კომპენსატორს შირის მანძილის ცვლილებებზე

პარაგრაფ 3.7-ში თეორიულად გამოთვლილია თუ რა მინიმალურ მანძილზე უნდა მოთავსდეს სენსორიდან გრავიკომპენსატორის ტვირთი, რომ მასზე ვერავითარი გავლენა ვერ მოახდინოს და გამოთვლილია ყველა ის მანძილები საიდანაც გრავიკომპენსატორი გრავიმეტრის სენსორზე მოახდენს 1 mkgI , 2 mkgI და ა.შ. 14 mkgI ზემოქმედებას. ექსპერიმენტულმა შემოწმებამ აჩვენა, რომ აღნიშნულ ზემოქმედებებს კომპენსატორი ახდენს არა მხოლოდ თეორიულად გამოთვლილი მანძილებიდან, არამედ მათ მახლობლობაში მყოფ სხვა მანძილებიდანაც, რომელთა მნიშვნელობები მოცემულია ცხრილი 6-ში.

ვიანგარიშით გაზომვათა ცდომილებები და გამოვსახოთ, როგორც გრაფიკულად ისე ანალიზურად, დამოკიდებულება გრავიმეტრის ჩვენებათა ცვლილებებსა და სენსორიდან კომპენსატორამდე მანძილის ცვლილებებს შორის, ანუ შევადგინოთ Δa -სა და ΔZ -ს შორის დამოკიდებულების ემპირიული ფორმულა.



(ნახ. 4.1.)

როგორც ცხრილი 6-დან ჩანს როცა გრავიმეტრის ჩვენება $\Delta a_1 = 1\text{mkg}$. მაშინ გრავიმეტრის სენსორიდან გრავიკომპენსატორის ტვირთამდე მანძილი Z^I შეიძლება იყოს: $Z_1^I = 1,000\text{მ}$. $Z_2^I = 0,990\text{მ}$. $Z_3^I = 0,980\text{მ}$. $Z_4^I = 0,970\text{მ}$. $Z_5^I = 0,960\text{მ}$. $Z_6^I = 0,950\text{მ}$. $Z_7^I = 0,940\text{მ}$.

(4.2) ფორმულის მიხედვით გამოვთვალოთ მათი საშ. მნიშვნელობა

$$\begin{aligned} \bar{Z}_1 &= \frac{Z_1^I + Z_2^I + \dots + Z_7^I}{7} = \\ &= \frac{1,000 + 0,990 + 0,980 + 0,970 + 0,960 + 0,950 + 0,940}{7} = 0,970\text{მ} \end{aligned}$$

ახლა ვიანგარიშოთ $\Delta a = 1\text{mkg}$.-ის შემთხვევაში თითოეულ გაზომვის ნარჩენი ცდომილება:

$$\begin{aligned} \Delta Z_1^I &= \bar{Z}_1 - Z_1^I = 0,970 - 1,000 = -0,030\text{მ}. \\ \Delta Z_2^I &= \bar{Z}_1 - Z_2^I = 0,970 - 0,990 = -0,020\text{მ} \\ \Delta Z_3^I &= \bar{Z}_1 - Z_3^I = 0,970 - 0,980 = -0,010\text{მ} \\ \Delta Z_4^I &= \bar{Z}_1 - Z_4^I = 0,970 - 0,970 = 0\text{მ}. \\ \Delta Z_5^I &= \bar{Z}_1 - Z_5^I = 0,970 - 0,960 = 0,010\text{მ}. \\ \Delta Z_6^I &= \bar{Z}_1 - Z_6^I = 0,970 - 0,950 = 0,020\text{მ}. \\ \Delta Z_7^I &= \bar{Z}_1 - Z_7^I = 0,970 - 0,940 = 0,030\text{მ}. \end{aligned}$$

ცხრილი 6.

გრავიმეტრის ჩვენება $\Delta a_n, \text{mkg}$	მანძილის სენსორიდან ბრავიკომპენსატორის ტვირთამდე (მ.)								საშ.	საშ.	საშ.
	თეორიული	ე ქ ს პ ე რ ი მ ე ნ ტ უ ლ ი									
	Z_n	Z_1^I	Z_2^I	Z_3^I	Z_4^I	Z_5^I	Z_6^I	Z_7^I			
1	0,980	1,000	0,990	0,980	0,970	0,960	0,950	0,940	0,970	0,007	1,27
2	0,740	0,740	0,730	0,720	0,710	0,700	0,690	0,680	0,710		
3	0,580	0,600	0,590	0,580	0,570	0,560	0,550	0,540	0,570		
4	0,500	0,530	0,520	0,510	0,500	0,470	0,480	-	0,505		
5	0,450	0,470	0,460	0,450	0,440	0,430	0,420	-	0,445		
6	0,408	0,415	0,410	0,400	0,390	0,385	-	-	0,400		
7	0,378	0,383	0,379	0,375	0,371	0,368	-	-	0,375		
8	0,354	0,360	0,355	0,350	0,345	0,340	-	-	0,350		
9	0,333	0,336	0,333	0,330	0,327	0,325	-	-	0,330		
10	0,316	0,320	0,318	0,16	0,313	0,310	-	-	0,315		
11	0,302	0,305	0,302	0,300	0,298	0,295	-	-	0,298		
12	0,289	0,293	0,290	0,287	0,284	0,281	-	-	0,286		

13	0,278	0,280	0,278	0,276	0,274	0,272	–	–	0,276		
14	0,268	0,270	0,268	0,267	0,265	0,263	–	–	0,262		

ახლა კი ბოსეტის ფორმულისა და ცხრილი 3-ის გამოყენებით ვიანგარიშით აღნიშნულ გაზომვათა აბსოლუტური სააღბათო ცდომილება. მოცემული შემთხვევისათვის $K = 7$ ამიტომ ვღებულობთ:

$$\begin{aligned} \Delta Z_1 &= 0,38\sqrt{(\Delta Z_1')^2 + (\Delta Z_2')^2 + \dots + (\Delta Z_7')^2} = \\ &= 0,38\sqrt{0,0009 + 0,0004 + 0,0001 + 0 + 0,0001 + 0,0004 + 0,0009} = 0,39 \cdot \sqrt{0,0028} = \\ &= 0,38 \cdot 0,0053 = 0,02\text{m} \end{aligned}$$

მაშინ $Z_{n.1} = \bar{Z}_1 \pm \Delta Z_1 = 0,970 \pm 0,02$ ე. ი. მივიღეთ დიაპაზონი, რომელშიც აუცილებლად მოთავსდება გასაზომი სიდიდის ნამდვილი მნიშვნელობა. ჩვენ შეგვიძლია იგი ავიღოთ \bar{Z}_1 -ის ტოლად. მაშინ თეორიულ შედეგთან შედარებით აბსოლუტური ცდომილება იქნება:

$$\delta_1 = |Z_{T.1} - Z_{n.1}| = |0,980 - 0,970| = 0,01$$

ფარდობითი ცდომილება კი:

$$\gamma_1 = \frac{\delta_1}{Z_{T.1}} \cdot 100\% = \frac{0,01}{0,980} \cdot 100 = 1,02\%$$

დანარჩენი შემთხვევებისთვის გამოთვლები მიმდინარეობს ანალოგიურად ამიტომ მოვიყვანო მხოლოდ საბოლოო შედეგებს.

1. $\Delta a_2 = 2\text{mkgf}$.

$$Z_{T.2} = 0,740\text{m} \quad \bar{Z}_2 = 0,710\text{m}$$

$$\delta_2 = 0,030\text{m}$$

$$\gamma_2 = 4,22\%$$

2. $\Delta a_3 = 3\text{mkgf}$.

$$Z_{T.3} = 0,580\text{m} \quad \bar{Z}_3 = 0,570\text{m}$$

$$\delta_3 = 0,010\text{m}$$

$$\gamma_3 = 1,75\%$$

3. $\Delta a_4 = 4\text{mkgf}$.

$$Z_{T.4} = 0,500\text{m} \quad \bar{Z}_4 = 0,505\text{m}$$

$$\delta_4 = 0,005\text{m}$$

$$\gamma_4 = 0,99\%$$

4. $\Delta a_5 = 5 \text{mkgl}$.
 $Z_{T,5} = 0,450\text{m}$ $\bar{Z}_5 = 0,445\text{m}$
 $\delta_5 = 0,005\text{m}$
 $\gamma_5 = 1,12\%$
5. $\Delta a_6 = 6 \text{mkgl}$.
 $Z_{T,6} = 0,408\text{m}$ $\bar{Z}_6 = 0,400\text{m}$
 $\delta_6 = 0,008\text{m}$
 $\gamma_6 = 2\%$
6. $\Delta a_7 = 7 \text{mkgl}$.
 $Z_{T,7} = 0,378\text{m}$ $\bar{Z}_7 = 0,375\text{m}$
 $\delta_7 = 0,003\text{m}$
 $\gamma_7 = 0,8\%$
7. $\Delta a_8 = 8 \text{mkgl}$.
 $Z_{T,8} = 0,354\text{m}$ $\bar{Z}_8 = 0,350\text{m}$
 $\delta_8 = 0,004\text{m}$
 $\gamma_8 = 1,14\%$
8. $\Delta a_9 = 9 \text{mkgl}$.
 $Z_{T,9} = 0,333\text{m}$ $\bar{Z}_9 = 0,330\text{m}$
 $\delta_9 = 0,003\text{m}$
 $\gamma_9 = 0,9\%$
9. $\Delta a_{10} = 10 \text{mkgl}$.
 $Z_{T,10} = 0,316\text{m}$ $\bar{Z}_{10} = 0,315\text{m}$
 $\delta_{10} = 0,001\text{m}$
 $\gamma_{10} = 0,3\%$
10. $\Delta a_{11} = 11 \text{mkgl}$.
 $Z_{T,11} = 0,302\text{m}$ $\bar{Z}_{11} = 0,298\text{m}$
 $\delta_{11} = 0,004\text{m}$
 $\gamma_{11} = 0,38\%$
11. $\Delta a_{12} = 12 \text{mkgl}$.
 $Z_{T,12} = 0,316\text{m}$ $\bar{Z}_{12} = 0,286\text{m}$
 $\delta_{12} = 0,003\text{m}$
 $\gamma_{12} = 1,07\%$
12. $\Delta a_{13} = 13 \text{mkgl}$.
 $Z_{T,13} = 0,278\text{m}$ $\bar{Z}_{13} = 0,276\text{m}$
 $\delta_{13} = 0,002\text{m}$
 $\gamma_{13} = 0,74\%$

$$\begin{aligned}
 13. \quad \Delta a_{14} &= 14 \text{mkgf} . \\
 Z_{T,14} &= 0,268\text{m} \quad \bar{Z}_{14} = 0,262\text{m} \\
 \delta_{14} &= 0,006\text{m} \\
 \gamma_{14} &= 2,3\%
 \end{aligned}$$

გაზომვათა საშუალო აბსოლუტური ცდომილება შეადგენს: $\bar{\delta} = 0,007\text{m}$ საშ. ფარდობითი ცდომილება კი $\bar{\gamma} = 1,27\%$.

ახლა შევადგინოთ გრავიმეტრის ჩვენებათა ცვლილების სენსორიდან გრაფიკომპენსატორის ტვირთამდე მანძილის ცვლილებასთან დამოკიდებულების ემპირიული ფორმულა.

ცხრილი 5-ის მონაცემების მიხედვით გრაფიკულად გამოვსახოთ დამოკიდებულება აღნიშნულ სიდიდეთა შორის. ამ მიზნით ორდინატა ღერძზე გადავზომოთ მანძილები, აბსცისათა ღერძზე კი გრავიმეტრის ჩვენებები. (ნახ. 4.2.)

როგორც ნახ. 4.2.-დან ჩანს სიბრტყეზე წერტილთა განლაგების ფორმა წააგავს ჰიპერბოლას ან რომელიღაც სხვა ხარისხოვან მრუდს, ამიტომ აღნიშნულ სიდიდეთა შორის დამოკიდებულება უნდა ვეძებოთ სახით:

$$y = bx^a \quad (4.13)$$

ამ უკანასკნელის გალოგარითმებით ვღებულობთ:

$$\lg y = a \lg x + \lg b \quad (4.14)$$

შემოვიღოთ აღნიშვნები:

$$X = \lg x, \quad Y = \lg y \quad \text{და} \quad B = \lg b$$

მაშინ (4.10) ფორმულა მიიღებს სახეს:

$$Y = aX + B \quad (4.15)$$

(4.15) გამოსახულებაში a და b კოეფიციენტები უნდა განისაზღვროს უმცირეს კვადრატთა მეთოდის გამოყენებით ანუ (4.8) და (4.9) ფორმულებით, რისთვისაც საჭიროა დამატებით განისაზღვროს n -ის, X -ის, Y -ის, X^2 -ის და XY -ის მნიშვნელობები ანუ შევავსოთ სპეციალური ცხრილი (ცხრილი 6.)

ცხრილი 6

x	y	$X = \lg x$	$Y = \lg y$	X^2	xy
1	0,970	0	-0,0132	0	0
2	0,710	0,3010	-0,1487	0,0906	-0,0448
3	0,570	0,4771	-0,2441	0,2276	-0,1165
4	0,505	0,6020	-0,2924	0,3624	0,1760
5	0,445	0,6989	-0,3467	0,4884	-0,2423
6	0,400	0,7781	-0,3979	0,6054	0,3096
7	0,375	0,8450	-0,4436	0,7140	-0,3748
8	0,350	0,9030	-0,4559	0,8154	-0,4117
9	0,330	0,9542	0,4814	0,9106	-0,4594
10	0,315	1	-0,4948	1	-0,4948
11	0,298	1,0413	0,5228	1,0843	-0,5444
12	0,289	1,0794	-0,5374	1,1651	-0,5803
13	0,276	1,1139	0,5528	1,2408	-0,6158
14	0,262	1,1461	0,5686	1,3135	-0,6517
–	–	$\sum_{i=1}^n x_i = 10,9390$	$\sum_{i=1}^n y_i = -5,5005$	$\sum_{i=1}^n x_i^2 = 10,018$	$\sum_{i=1}^n x_i y_i = -5,022$

ცხრილი 6-ისა და (4.8) და (4.9) ფორმულების გამოყენებით, სადაც მოცემული შემთხვევისათვის $n = 14$ შეგვიძლია ვიანგარიშოთ a -სა და B -ს მნიშვნელობები.

$$a = \frac{14 \cdot (-5,0225) - 10,9390 \cdot (-5,5005)}{14 \cdot 10,018 - 10,9390^2} = \frac{-10,1451}{20,5903} = -0,4927$$

$$B = \frac{-5,5005 \cdot 10,018 - 10,9390 \cdot (-5,0225)}{14 \cdot 10,018 - 10,9390^2} = \frac{0,1629}{20,5903} = 0,493$$

ახლა ვიპოვოთ b . ამისათვის ვისარგებლოთ დამოკიდებულებით: $\lg b = B$ თუ ამ უკანასკნელში გავითვალისწინებთ B -ს მნიშვნელობას მივიღებთ:

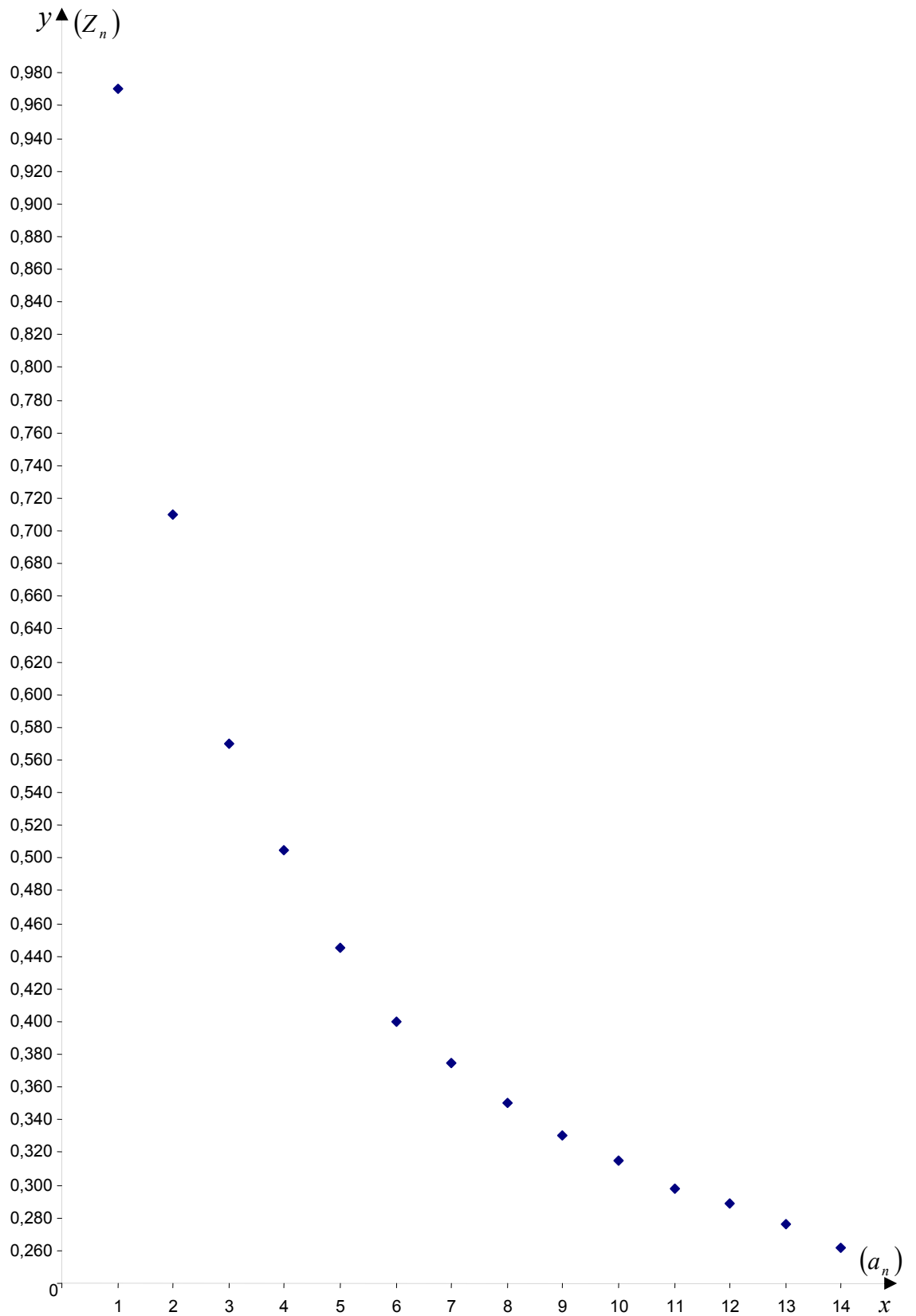
$$\lg b = 0,493$$

$$b = 10^{0,493} = 3,152$$

ასე, რომ (4.13) გამოსახულებაში სათანდო მნიშვნელობების გათვალისწინებით მივიღებთ საძიებელ ემპირიულ ფორმულას, რომელსაც აქვს სახე:

$$y = 3,15 \cdot x^{-0,49}$$

ეს უკანასკნელი გამოსახულება წარმოადგენს საძიებელი დამოკიდებულების გამომსახველ ემპირიულ ფორმულას.



бсб. 4.2.

ძირითადი დასკვნები

1. დასაბუთებულია, რომ ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივის ცვალებადობა გრავიმეტრის ჩვენებაში განაპირობებს მნიშვნელოვან ცდომილებათა წარმოქმნას არა მხოლოდ ხელსაწყოს მგრძობიარე ელემენტზე (სენსორზე), ჰაერის მხრიდან არქიმედეს ძალით მოქმედების გამო, არამედ გრავიმეტრის თავზე, გარკვეულ მოცულობაში, წარმოქმნილ ჰაერის ცვალებადი მასების მხრიდან ხელსაწყოს სენსორზე ასევე ცვალებადი გრავიტაციული მიზიდულობის ძალთა მოქმედებითაც.
2. გამოთვლილი და დასაბუთებულია, რომ გრავიმეტრის სენსორზე გრავიტაციული მიზიდულობის ძალით მოქმედი ჰაერის ბირთვისათვის არსებობს ოპტიმალური რადიუსი და ის ტოლია 5,5 კმ-ის.
3. ოპტიმალური რადიუსისა და არაერთგვაროვანი სიმკვრივის მქონე ჰაერის ბირთვისათვის გეომეტრიული კვთების, მათემატიკური მოდელირებისა და ექსპერიმენტული მეთოდების გამოყენებით დადგენილია მისი სიმძიმის ცენტრის აპლიკატის დამოკიდებულება მისსავე რადიუსთან, რომელსაც აქვს სახე: $d=0,82r$, სადაც d – ჰაერის ბირთვის რადიუსია.
4. თეორიულად გამოთვლილია და ექსპერიმენტულად დასაბუთებული, რომ ატმოსფერული ჰაერის საშუალო სიმკვრივის ცვალებადობა ყოველი 0,01 კგ/მ³-ით, გრავიმეტრის ჩვენებაში იწვევს 2,3 მკგლ. ცდომილების გაჩენას.
5. ვიზუალური დაკვირვების გრავიმეტრებისათვის შედგენილია სპეციალური ცხრილი, რომელიც საშუალებას იძლევა, ატმოსფერული ჰაერის სიმკვრივის 0,01 კგ/მ³-ით ცვლილებისას, სათანადო შესწორებები იქნას შეტანილი მათ ჩვენებაში, რითაც გასწორებული იქნება ის ცდომილებები, რომელთა წარმოქმნასაც ჰაერის სიმკვრივის ცვალებადობა განაპირობებს.
6. უწყვეტი დაკვირვების გრავიმეტრებისათვის შექმნილია გრავიკომპენსატორის კონსტრუქცია და გამოთვლილია ჰაერის სიმკვრივის ყოველი 0,01კგ/მ³ –ით ცვლილებისას, მისი მოძრავი მასის ხელსაწყოს სენსორის მიმართ მოთავსების მანძილები, რაც უზრუნველყოფს ზემოთ აღნიშნულ ცდომილებათა აღმოფხვრას.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. ვ. აბაშიძე., გეოდეზიური გრავიმეტრიის მოკლე კურსი. გამომცემლობა «ჯისიაი» თბილისი, 2004 წ. 268 გვ.
2. ვ. აბაშიძე., მ. თევზაძე, ნ. გუგუტიშვილი. ლაბორატორიული პრაქტიკუმი გეოდეზიურ გრავიმეტრიაში. გამომცემლობა «ტექნიკური უნივერსიტეტი», თბილისი, 1999 წ. 252 გვ.
3. ი. აივაზაშვილი., ე. კაპანაძე. დედამიწისა და სამყაროს ზოგიერთი საიდუმლოება. გამომცემლობა «განათლება». თბილისი 1986 წ. 89 გვ.
4. ბ. ბალავაძე., გრავიმეტრიის კურსი, თბილისი, თსუ, 1996 წ. 384 გვ.
5. ზ. ბარკალაია., დ. ვაშაკიძე. უმაღლესიმათემატიკა ვარიაციული სტატისტიკური ელემენტებით. გამომცემლობა «გამომცემლობა». თბილისი, 1988 წ. 263 გვ.
6. ნ. გიორგობიანი., შ. გლოველი, დ. ვარძელაშვილი. გაზომვათა ერთიანობის უზრუნველყოფის საფუძვლები. გამომცემლობა “განათლება” თბილისი, 1990 წ., 329 გვ.
7. შ. გლოველი., ნ. გიორგობიანი, დ. ვარძელაშვილი. ფიზიკურ სიდიდეთა ერთეულები. თბილისი «მეცნიერება» 1982 წ. 235 გვ.
8. ნ. გრუშინსკი., მიზიდულობის ძალათა სამყაროში, თბილისი, თსუ, 1975 წ. 180 გვ.
9. ნ. თევზაძე., საინჟინრო გეოდეზია I ტ, განათლება, თბილისი, 1974 წ.
10. გ. მანია. ალბათობის თეორია და მათემატიკური სტატისტიკა თბილისის უნივერსიტეტის გამომცემლობა, 1976 წ.
11. ა. პერიშკინი, ნ. როდინა. ფიზიკა. გამომცემლობა “განათლება” თბილისი 1987 წ. 342 გვ.
12. პ. შოკინი. როგორ და რისთვის ზომავენ სიმძიმის ძალას. თბილისი, 1955 (საქ. სსრ მეცნიერებათა აკადემია. მეცნ. პოპულარული სერია) 76 გვ.

13. ვ. ჯიქია. გეოიდეს ფიგურის და შვეული ხაზის გადახრის განსაზღვრა კავკასიისათვის გრავიმეტრიული მონაცემებით. საქ. მეც.აკად. გეოფიზიკის ინსტიტუტის ფონდები, თბილისი 1941-42 წწ.
14. Абельский М. Е., Андреев Б. А. и др. Курс гавиразведки. ГНТИ литературы по геологии и охране недр, М. 1954 г.
15. Андреев Б.А. Гефизическте методы в региональной структурной геодогии. Изд-во «Недра», 1965 г.
16. Андреев Б.А. Курс гравитационной разведки. М -Лб 1941 г.
17. Архангельский А.Д. Геология и гравиметрия. Тр. Научно-исл. Инст. геологии и минералогии. Вып. 1, 1933 г.
18. Архангельский А.Д. геологические результаты общих магнитометрических и гравиметрических работ в СССР, Тр. 27 сесия Междунар. Геолог ю конгрб т. 1. 1939 г.
19. Архангельский А. Д. и Фединский В,В. геологические результаты гравиметрических работ в Восточном Азербайджане. Бюллет. Моск. Обш. Испыт. Природы, новб т. 40, отд.геол, т. 10 вып. 3-4б 1932 г.
20. Архангельский А. Д. Михайлов А. А. Фединский В. В. Люстих Е. Н. Геологические значения аномалии силы тяжести в СССР. Изв. АН СССР. сер, геол, №4. 1937 г.
21. Абашидзе В. Г. Отермических эффектах в кварцевых гравиметрах типа ГАК.Сб.тр. «Прикладная геофизика», выпю 47. М. 1966.
22. Аристов Е.М. Физические величины и единицы их измерения. Л., Судромгиз 1963. 96с.
23. Балавадзе А., Михайлов В. Федынский В. Геологическое значение аномалии сили тяжести в СССР. Изв. АН СССР, сер. Геол. №1. 1955.
24. Балавадзе Б, Вариометрические наблюдения в юго-заподной части Колхиды и результаты их интерпретации. Тр. Инст.геофиз. АН ГССР. Т. 16, Тбилиси, 1957.
25. Балавадзе Б, Гравитационное поле и строение земной коры в Грузии. изд.-во АН ГССР, Тбилиси, 1957.
26. Балавадзе Б, и Шенгелаия Г. К. вопросу об экспериментальном определении вертикального градиента силы тяхести. ДАН СССР, т. XLV, №1, 1954.
27. Бончиковский В. Строение земной коры. Вестн. Моск. Унив. №11, 1948
28. Буланже Ю. Таблицы обработки наблюдении с кварцевыми гравиметрами. М. Изд-во АН СССР, 1952.

29. Буланже Ю. Влияние магнитного поля Земли на инварные маятники. Тр. геоф. Инст. АН СССР, №2 1948.
30. Буланже Ю. О. некоторых систематических ошибках кварцевых гравиметров с горизонтальной нитью. Изв. АН СССР, сер. геофиз, №2, 1952.
31. Буланже Ю. Об определении температурных коэффициентов кварцевых гравиметров. Тр. геоф. Инст. АН СССР, №16 1952.
32. Базакуца В. международная система единиц. Под общ. Ред. Г. Д. Бурдуна. Издн. 4-е. Харьков, изд-во Харьк. Ун-та, 1973. 236 ст.
33. Бурдун Г. Единицы физических величин. Изд. 4-е. М, изд-во стандартов, 1967, 216 с.
34. Бурдун Г. Калашников Н.В. Международная система единиц. Учебн. Пособие для вузов. Под ред. Г.Д. Бурдуна. б. «Высшая школа», 1964, 279с
35. Бурдун Г. Марков Б. Основы метрологии . М. изд-во стандартов 1975
36. Бурдун Г. справочник по международной системе единиц. изд-во стандартов, 1977 . 231 с.
37. Вебер В. и Федынский В. гравиметрическая картина юго-восточного Кавказа в палеогеографическом освещении. изд-во АН СССР, сер. Геол №3 1947.
38. Венинг-Меинес Ф. Гравиметрические наблюдения на море (теория и практика) М.1940.
39. Веселов К. и Сагитов М. Гравиметрическая разветка. изд-во «Недра» 1968.
40. Володарский и Ланда Т. геологическая интерпретация гравитационных и магнитных полей с помощью ЭВМ. изд-во «Недра» 1970.
41. Винник В. Артемьев Б. Метрологический надзор. М. изд-во стандартов, 1980.
42. Виноградов Ю. Математическая статистика. изд-во «лёгкая индустрия». Москва 1970. 305 с.
43. Венцель Е. Теория вероятностей, изд-во «наука» 1964.
44. Вовк И. , Канушин В. Ральченко В. Непривлинные вариации силы тяжести в районе водохранилища, В кн, Повторные гравиметрические наблюдения. ВНИИ Геофизика, М. 1980.
45. Воробьев А. международная система единиц. Учёб. Пособие М. 1963. 24с
46. Гамбурцев Г. методика интерпретации гравитационных наблюдении. Прикладная геофизика, вып. 1 ОНТИ. М.-Л , 1936.
47. Гамбурцев Г. глубинное сейсмическое зондирование земной коры. Тр. Геофизич. Инст. АН СССР, №25 (152) 1954.

48. Гамбурцев Г. Вейцман Пю и Тулина Ю. Строение земной коры в районе северного Тянь-Шаня по данным глубинного сейсмического зондирования. ДАН СССР, т. 105, №1. 1955.
49. Гамбурцев Г. и Вейцман П. Сопоставление данных глубинного зондирования о строении земной коры в районе северного Тянь-Шаня с данными сейсмологии и гравиметрии. Изв. АН СССР, сер. Геофиз, №9 1956.
50. Горшков П. и Горшков Г, Гравиметрическая характеристика одного из участков северо-западного Кавказа. Изв. Всесоюз. Геогр, общ, т. 79, вып. 1, 1947.
51. Гутенберг Б, и Рихтер К, Строение земной коры. Континенты и океаны. Внутр. Строение земли. Сборник. Изд-во ИЛ. М, 1949.
52. Гутенберг Б, Физика земных недр. ИЛ. 1963.
53. Грушинский Н. Теория фигуры Земли, М, «наука». 1963. 235 с.
54. Грушинский Н. Основы Гравиметрии М, «наука» 1983. 260 с.
55. Горфман А. Международная тема единиц. Учеб. пособие, М, 1963, 24с (Моск, химико-технолог. Ин.им. Д. Менделеева, кафедра физики).
56. Гнеденко Б. Беседы по математической статистике, изд-во «Знание», 1968. 231 с.
57. Гнеденко Б. Курс теории вероятностей, изд-во «наука» 1965. 218 с.
58. Гнеденко Б. Коваленко И. Введение в теорию массового обслуживания, изд-во «Наука», 1966 , 198 с.
59. Гнеденко Б. Математические методы в теории надёжности, изд-во «Наука» 1965. 217с.
60. Деменицкая Р. кора имантия земли. Изд-во «недра». 1967.
61. Донабедов А. и Мещеряков Ю. О. соотношения между локальными антиклинальными структурами и аномалиями силы тяжести в пределах рууской платформы. ДАН СССР, т. XXIX, №3 1951.
62. Давидов В. применение новой Международной системы единиц в технике. М, «транспорт», 1964. 34 с.
63. Добичин В. вопросы теории и методологии исследований и текстильной технологии, Ростехиздат, 1960. 223 с.
64. Дунин-Барковский И. Смирнов Н. Теория вероятностей и математическая статистика в технике (общая часть) ГИТТЛ, 1955. 257с.
65. Долинский Е. Обработка результатов измерений. М. Изд-во стандартов. 1973. 185 с.
66. Евсеев С. изостатические аномалии силы тяжести на Северном Кавказе и проблемы геодезической гравиметрии. Тр. ЦНИИГА иК, вып. 29 1938.

67. Евсеев С. исследование топографо-изостатической редукции отклонения от веса и силы тяжести и испытание наличия изостазии на Кавказе. Тр. ЦНИИГА иК, вып. 29 1938.
68. Евсеев С. Аномалия силы тяжести в горных районах Средней Азии, бюллет. Астр. Инст. АН СССР №51 1941.
69. Евсеев С. редукция силы тяжести горных районах Тр. ЦНИИГА иК, вып. 51. 1948.
70. Еремеев В. расчёт палетки для вычисления высот квазигеоида и отклонении отвеса по формулам Стокса и Вининг-Мейнеса. Тр. ЦНИИГА иК, вып. 121 М. «Геодиздат» 1957. 165 с.
71. Жоголович И. О редкциях силы тяжести. Тр. ЦНИИГА и К, вып. 68 1949
72. Жонголович И. Внешнее гравитационное поле Земли и фундаментальные постоянные, связанные с ним. Тр. Инст. теор. астр., вып. III АН СССР, 1952.
73. Идельсон Н. Теория потенциала, ОНТИ. Л.-М, 1936.
74. Коридалие Е. Изучение строения земной коры сейсмическими методами. Изд. АН СССР 1939.
75. Кортнев А. Рублёв Ю. Куценко А. практикум по физике, Государственное изд-во «высшая школа» М. 1963 515 с.
76. Картвелишвили К. планетарная плотностная модель и нормальное гравитационное поле Земли, М. «наука», 1982, 238 с.
77. Коуден Д. Статистические методы контроля качества, Физматгиз, 1961, 192 с.
78. Коротков В. основы метрологии и теории точности измерительных устройств. М. Изд-во стандартов. 1978, 160с
79. Лукавченко П. к вопросу об измерениях силы тяжести в буровых скважинах. Прикладная геофизика, Сб. ст. вып. 4 НИИПГ, Гостехиздат, М. -Л, 1948
80. Лукавченко П. таблицы и номограммы для вычисления поправок силы тяжести за рельеф местности при съёмке с гравиметрами, НИИГТР, Гостехиздат, М. 1951
81. Люстих Е. Выбар редукции силы тяжести в связи с решением геологических вопросов. Изв. АН СССР, сер. Геол. 1938
82. Люстих Е. Геологический смысл различных методов вычисления аномалии силы тяжести. Тр. Инст. тер. Геофизики АН СССР т. III, М. 1947
83. Люстих Е. Опыт исследования зональных аномалий силы тяжести для изучения причин длительных вертикальных движений платформы. ДАН СССР, т XI №2 1948

84. Люстих Е. Гравиметрический метод изучения причин колебательных движений земной коры и некоторые результаты его применения. Изд АН СССР, сер. Геол. №6 1948.
85. Лебедев А. беседы о надёжности . изд. «знание» , 1968 102с
86. Лисенков А. международная системы единиц СИ. М. «наука», 1966, 70с
87. Магницкий В. о структурных аномалиях силы тяжести. Сборн. Науч. Техн. Ипроизводств статей, вып. IX. ГУГК. При СНК СССР, М. 1945
88. Магницкий В. о редукциях силы тяжести. Тр. ЦНИИГАиК вып 51, 1948
89. Магницкий В. о возможном характере деформации глубоких слоях земной коры и подкоровом слое. Бюллет. Моск. Общ, испытат. Природы, новая серия т III, отдел геол., т XXIII, вып. 2 , 1948.
90. Магницкий В. к вопросу о выделении локальных гравитационных аномалий . изв. АН СССР , сер. Геогр. Геофиз, т. XIII, №6 1949.
91. Магницкий В. основные аопросы геологического использования гравиметрических и геофизических данных. Тр. МИИГАиК, вып. 8, 1950.
92. Магницкий В. внутриннее строение и физика Земли. Идв.- во «Недра», 1965.
93. Маковер С. гравиметры, их устройство и применение. Сб. стат. Гостоптехиздат 1941,
94. Малкин Н. Зависимость между градиентами ньютонического потенциала на плоскости и применении к исследованию гравитационных и магнитных аномалий. Изд-во АН СССР, отд.физ. мат. Наук, ст - 757-770, 1930.
95. Малкин Е. Об определении вертикального градиента с. т. из наблюдении с крутильными весами. Астр. журн. т . XIII , вып. 5, 1936.
96. Малкин В. к определению физияеской поверхности Земли без редукции и конденсации. Тр. ЦНИИГАиК, вып. 68, 1949.
97. Маловичко А. исследования по аналитическому продолжению гравитационных аномалий. Тр. Новосибирского инст. инженеров геод., аэросъёмки и картографии, т IV 1951.
98. Маловичко А. орешении обратной гравиметрическтй задачи. Изв. АН СССР, сер. геофиз, №3 1953.
99. Михайлов А. курс гравиметрии и теории Земли. идз-во Ред-бюро ГУГК при СНК СССР. М . 1939
100. Макаров Н. Геодезическая гравиметрия. М., «Недра» 1968.
101. Пискунов Н. дифференциальное и интегральное исчисления. М. «Наука». 1978. 451с

102. Перельштейн Е. Метрологическая служба промышленного предприятия. М. Изд-во стандартов, 1987, 83с
103. Тевзадзе М. Пиралишвили С. Садунишвили М. По поводу решения прямой задачи теории потенциала на ГЕС. Гон. жур. Тр. ГТУ, №2 (7) 2001.
104. Южаков В. международная система единиц. Л. 1964 31с.
105. Юзефович А. Огородова Л. гравиметрия . М. «недра» 1980.
106. Ewing M. and Worzel L., Gravity anomalies and structure of the West Indies. Part I-II. Bull. of the Geolog. Soc. of Amer. vol. 65, # 2, p. 165-174, 195-200. 1954.
107. Garland G. D., Discussion of "The Geophysical applications of gravity anomalies" by W. Heiskanen. Trans. Amer. Geophys. Un. vol. 34, #6, p-945-947. 1953.
108. Glennie E. A., Gravity anomalies and the structure of the Earth's crust. Survey of India, Professional paper, # 27. 1932.
109. Gutenberg B., Seismological Evidence for Roots of Mountains. Bull, of the Geol. Soc. of Amer. vol. 54, April 1, (p. 473-498), 1943.
110. Gutenberg B., Crustal Layers of the Continents and Oceans. Bull, of the Geol. Soc. of Amer., vol. 62, May. (p. 427-439), 1951.
111. Haalck H., Die Frage der Messung des Vertikalen Schweregradienten. Beitr. angew. Geophysic. B., 9, № 2, 107. 1941.
112. Haalck H., Ergebnissc der volstandigen Berechnung des gravimetrischen Stö rungsfeldes in Gebiet von Gifhorn. - Beitr. angew. Geophys. 9, p. 290-302. 1942.
113. Hammer S., Investigation of the vertical gradients of gravity. Trans. Amert Geophys. Un., April, p. 72. 1938.
114. Hammer S., Density determinations by underground gravity measurements' Geophysics, vol. XV, № 4, p. 637-652. 1950.
115. Hayford I. F. and Bowie W., The Effect of Topography and Isostatic Compensation upon the Intensity of Gravity. U. S. Coast and Geodetic Survey, Special Publ., № 10, Washington. 1912.
116. Heiskanen W., Untersuchungen über Schwerekralt und isostasy. Veröffentlich des Finnischen Geodet. Inst, №4. 1924.