

K 205 858  
3

საქართველოს  
საბავშვო მუზეუმი

პირობა

1. კლასიკური

3. პირობა





1972

ნივთიერება	ორთქლადქცევის კუთრი სითბო, კჯ/კგ
წყალი	22 60
სპირტი (ეთილის)	860
აზოტმევა	480
ეთერი	360
ვერცხლისწყალი	290
ნავთი	210

მასალა	დრეკადობის მოდული, კპა ( $\alpha = 20^{\circ}\text{C}$ )
ალუმინი	70 — 71
ბეტონი	14,3 — 23,2
გეტინაკსი	10 — 18
რკინა	190 — 210
ოქრო	79
რეზინი	0,9
ფოლადი	200 — 220
ტიტანი	112

ნივთიერება	ზედაპირული დაქიმულობის კოეფიციენტი მლნ/მ
წყალი	72,8
გლიცერინი	63
ნავთი	29
აბუსალათინის ზეთი	36,4
ნავთობი	30
ვერცხლის-	
წყალი	513
სპირტი (მეთილის)	22,6

ნივთიერება	კრიტიკული ტემპერატურა, $^{\circ}\text{C}$
პელიუმი	— 268
წყალბადი	— 240
აზოტი	— 147
ჟანგბადი	— 188
ქლორი	146
ეთერი	191
ვერცხლისწყალი	1460

ტემპერატურა, $^{\circ}\text{C}$	წყლის ნაჯერი ორთქლის წნევა, კპა
0	0,421
10	1,22
15	1,71
20	2,33
25	3,17
30	4,27
50	12,3
80	46,7
100	101,3



ბ. ბუნოვცევი  
ი. კლიმონტოვიჩი  
ბ. მიაკიშევი



# ფიზიკა

საშუალო სკოლის X კლასის სახელმძღვანელო

დაამტკიცა სსრ კავშირის განათლების  
სამინისტრომ

მეხუთე, გადამუშავებული გამოცემა

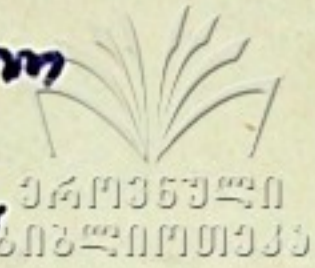
გამომცემლობა „განათლება“  
თბილისი — 1988



63(045)

22. 3  
53  
ბ 994

გიზიკის სახელმძღვანელოები საქართველო  
სკოლები სოფლის



VII თავის დაწერაში მონაწილეობა მიიღეს ბ. ა. სლობოდსკოვმა და  
ა. ზ. სინიაკოვმა.

სადემონსტრაციო ცდების დანადგარები შეარჩია ა. ზ. სინიაკოვმა.

K 205.858  
3

სკოლები-2000  
საქართველო

პე. სსრ კ. შარტის  
სახ. სახ. რესპუბ.  
ბიბლიოთეკა

4306021100 — 079  
Б ————— 70—88  
M 602(08) — 88  
ISBN 5—505—00516—0

©Издательство «Просвещение»,  
1986, с изменениями  
©ქართული თარგმანი, გამომცემლობა  
«განათლება», 1988



## შესავალი

**მექანიკური მოძრაობა.** IX კლასში დაწვრილებით შევისწავლეთ მატერიის მექანიკური მოძრაობა, ე. ი. სივრცეში ერთი სხეულის გადაადგილება მეორის მიმართ დროის მიხედვით, მაგრამ არ გაგვითვალისწინებია, რომ ყველა სხეული შედგება ატომებისა ან მოლეკულებისაგან. სხეული განიხილებოდა როგორც ერთიანი, შინაგან სტრუქტურას მოკლებული.

მექანიკის ამოცანა არ არის სხეულის თვისებების გამოკვლევა. მისი მიზანია სივრცეში სხეულის მდებარეობისა და სიჩქარის განსაზღვრა დროის ნებისმიერ მომენტში.

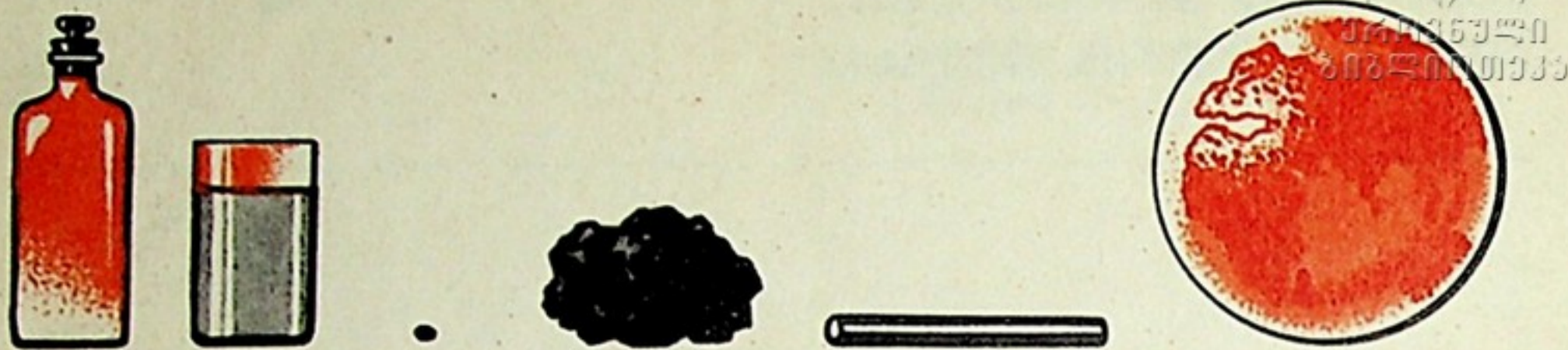
**სითბური მოძრაობა.** ნივთიერების ატომები და მოლეკულები, როგორც VIII კლასის ფიზიკის კურსიდანაა ცნობილი, უწყესრიგოდ (ქაოსურად) მოძრაობენ. მოლეკულებისა და ატომების ასეთ მოძრაობას სითბური მოძრაობა ეწოდება. X კლასის ფიზიკის კურსის ამ განყოფილებაში შევისწავლით მატერიის მოძრაობის სითბური ფორმის ძირითად კანონზომიერებებს.

მოლეკულების მოძრაობა უწყესრიგოა იმის გამო, რომ მათი რიცხვი ნებისმიერ სხეულში წარმოუდგენლად დიდია. თითოეული მოლეკულა გამუდმებით იცვლის სიჩქარეს სხვა მოლეკულებთან შეჯახებისას. ამიტომაც მისი ტრაექტორია დახლართული, მოძრაობა კი — ქაოსური. რამდენიმე მოლეკულისაგან შემდგარი სისტემისთვის სითბური მოძრაობის ცნება არ გამოდგება. უამრავი მოლეკულის ქაოსური მოძრაობა თვისებრივად განსხვავდება ცალკეულ სხეულთა მოწყესრიგებული მექანიკური გადაადგილებისაგან. სწორედ ამიტომაც იგი მატერიის მოძრაობის განსაკუთრებული ფორმა, რომელიც განსაკუთრებული თვისებებით ხასიათდება.

სითბური მოძრაობა განაპირობებს სხეულის შინაგან თვისებებს, ამიტომ მისი შესწავლა საშუალებას მოგვცემს გავერკვეთ სხეულში მიმდინარე ბევრ ფიზიკურ პროცესში.

**მაკროსკოპული სხეული.** სხეულს, რომელიც ძალიან ბევრ ატომს ან მოლეკულას შეიცავს, ფიზიკაში მაკროსკოპული სხეული





სურ. 1.

ეწოდება. მაკროსკოპული სხეულის ზომა ბევრად აღემატება ატომის ზომას. ბალონში მოთავსებული აირი, ჭიქაში ჩასხმული წყალი, ქვის მარცვალი, ქვა, ფოლადის ღერო, დედამიწა მაკროსკოპული სხეულებია (სურ. 1).

ჩვენ შევისწავლით მაკროსკოპულ სხეულში მიმდინარე პროცესებს.

**სითბური მოვლენა.** მოლეკულების სითბური მოძრაობა დამოკიდებულია ტემპერატურაზე. ამის შესახებ საუბარი იყო VII—VIII კლასების ფიზიკის სახელმძღვანელოში. მოლეკულების სითბური მოძრაობის შესწავლით ჩვენ შევისწავლით იმ მოვლენებს, რომლებიც სხეულის ტემპერატურაზეა დამოკიდებული. გახურებისას ნივთიერება ერთი მდგომარეობიდან გადადის მეორეში: მყარი სხეული გარდაიქმნება სითხედ, სითხე კი — აირად. გაცივებისას, პირიქით, აირი გარდაიქმნება სითხედ, სითხე კი — მყარ სხეულად.

ამ და ბევრ სხვა მოვლენას, რომლებიც განპირობებულია ატომებისა და მოლეკულების სითბური მოძრაობით, **სითბური მოვლენა** ეწოდება.

**სითბური მოვლენის მნიშვნელობა.** სითბურ მოვლენებს დიდი მნიშვნელობა აქვს ადამიანისა და ცხოველის სიცოცხლისათვის. წელიწადის დროთა ცვლილებისას ჰაერის ტემპერატურის  $20-30^{\circ}\text{C}$ -ით შეცვლა ყველაფერს ცვლის ჩვენს გარშემო. გაზაფხულზე ბუნება იღვიძებს, ტყე ფოთლით იმოსება, ველ-მინდორი ამწვანდება. ზამთარში კი ზაფხულის ნაირ-ნაირი ფერები ერთფეროვანი თეთრი ფონით იცვლება, მცენარეებისა და ბევრი მწერის სიცოცხლე ჩაკვდება. ჩვენი სხეულის ტემპერატურა ერთი გრადუსითაც რომ შეიცვალოს, შეუძლოდ ვიგრძნობთ თავს.

ადამიანი უძველესი დროიდან დაინტერესდა სითბური მოვლენებით. იგი მხოლოდ მას შემდეგ გახდა გარემო პირობებისაგან შედარებით დამოუკიდებელი, რაც ისწავლა ცეცხლის გაჩენა და შენახვა. ეს იყო ერთ-ერთი უდიდესი აღმოჩენა.

ტემპერატურის შეცვლა გავლენას ახდენს სხეულის ყველა თვისებაზე. მაგალითად, გათბობისა ან გაცივებისას იცვლება მყარი სხეულის



მიხეილ ვასილის ძე ლომონოსოვი (1711—1765) — დიდი რუსი მეცნიერი, ენციკლოპედისტი, პოეტი და საზოგადო მოღვაწე, დამაარსებელი მოსკოვის უნივერსიტეტისა, რომელიც მის სახელს ატარებს. პუშკინმა ლომონოსოვს „პირველი რუსული უნივერსიტეტი“ უწოდა. მ. ლომონოსოვს ეკუთვნის სახელგანთქმული შრომები ფიზიკაში, ქიმიაში, სამთო საქმესა და მეტალურგიაში. მან განავითარა სითბოს მოლეკულურ-კინეტიკური თეორია, იწინასწარმეტყველა მასისა და ენერჯიის მუდმივობის კანონები. ლომონოსოვმა შექმნა ფუნდამენტური შრომები რუსი ხალხის ისტორიის საკითხებზე. იგი თანამედროვე რუსული გრამატიკის ფუძემდებელია.



ზომები და სითხის მოცულობა. მნიშვნელოვნად იცვლება მათი მექანიკური თვისებებიც, მაგალითად, დრეკადობა. ჩაქუჩის დარტყმით რეზინის მილი არ დაზიანდება, მაგრამ  $-100^{\circ}\text{C}$ -ზე უფრო დაბალ ტემპერატურამდე გაცივებისას, იგი მინასავით მყიფე ხდება და მსუბუქი დარტყმითაც კი იმსხვრევა. რეზინის დრეკადობა მხოლოდ გათბობით აღდგება.

ყველა ზემოჩამოთვლილი და მრავალი სხვა სითბური მოვლენა განსაზღვრულ კანონებს ემორჩილება. ამ კანონების აღმოჩენა, საშუალებას იძლევა, მაქსიმალურად გამოვიყენოთ ეს მოვლენები პრაქტიკასა და ტექნიკაში. თანამედროვე სითბური ძრავების, აირის გასათხევადებელი დანადგარების, მაცივარი აპარატებისა და სხვა მოწყობილობათა კონსტრუირება ამ კანონების ცოდნის საფუძველზე ხდება.

**მოლეკულურ-კინეტიკური თეორია.** მოლეკულურ-კინეტიკური თეორია მაკროსკოპულ სხეულებში მიმდინარე სითბურ მოვლენებსა და სხეულების შინაგან თვისებებს ხსნის იმ წარმოდგენის საფუძველზე რომ ყველა სხეული შედგება ქაოსურად მოძრავი ნაწილაკებისაგან. 2

ამ თეორიის ამოცანაა, ცალკეული მოლეკულების ქცევის კანონზომიერებანი დაუკავშიროს მაკროსკოპულ სხეულთა თვისებების დამახასიათებელ სიდიდეებს.

ჯერ კიდევ უძველესი დროის ფილოსოფოსები ხვდებოდნენ, რომ სითბო სხეულის შემადგენელ ნაწილაკთა შინაგანი მოძრაობის სახეა. სითბოს მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის განვითარებაში დიდი წვლილი შეიტანა დიდმა რუსმა მეცნიერმა მ. ლომონოსოვმა. ლომონოსოვი სითბოს განიხილავდა, როგორც ნივთიერების ნაწილაკთა



ბრუნვითს მოძრაობას. თავისი თეორიით მან ზოგადად, სავსებით სწორად ახსნა დნობის, აორთქლებისა და თბოგამტარობის მოვლენები, დაადგინა რომ არსებობს „სიცივის უდიდესი ანუ უკიდურესი ხარისხი“, როცა ნივთიერების ნაწილაკთა მოძრაობა წყდება.

მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის შექმნის სირთულემ გამოიწვია ის, რომ იგი აღიარეს მხოლოდ XX საუკუნის დასაწყისში. საქმე ისაა, რომ მაკროსკოპულ სხეულში უამრავი მოლეკულაა და თითოეული მოლეკულის მოძრაობაზე დაკვირვება შეუძლებელია. აუცილებელია, ვისწავლოთ ცალკეულ მოლეკულათა მოძრაობის კანონების მიხედვით იმ საშუალო შედეგის მონახვა, რომელსაც იძლევა მათი ერთობლივი მოძრაობა. ყველა მოლეკულის მოძრაობის სწორედ ეს საშუალო შედეგი განსაზღვრავს სითბურ მოვლენებს მაკროსკოპულ სხეულში.

**თერმოდინამიკა.** ნივთიერებას ბევრი ისეთი თვისება აქვს, რომლის შესასწავლად საჭირო არ არის მისი აგებულების ცოდნა. სითბური მოვლენები შეიძლება აღვწეროთ სიდიდეებით, რომლებსაც აღნუსხავს ისეთი ხელსაწყოები (მანომეტრი, თერმომეტრი), რომლებიც ცალკეულ მოლეკულათა შემოქმედებაზე არ რეაგირებს.

XIX საუკუნის შუა წლებში, ენერჯის მუდმივობის კანონის აღმოჩენის შემდეგ, შექმნეს სითბური პროცესების პირველი მეცნიერული თეორია—**თერმოდინამიკა**. თერმოდინამიკა სითბურ მოვლენათა ისეთი თეორიაა, რომელიც არ ითვალისწინებს სხეულთა მოლეკულურ აგებულებას. იგი წარმოიშვა მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის საყოველთაო აღიარებამდე დიდი ხნით ადრე, იმ დროს, როცა სწავლობდნენ მუშაობის შესასრულებლად სითბოს გამოყენების ოპტიმალურ პირობებს.

**თერმოდინამიკა და სტატისტიკური მექანიკა.** ამჟამად მეცნიერებასა და ტექნიკაში იყენებენ როგორც თერმოდინამიკას, ისე მოლეკულურ-კინეტიკურ თეორიას, რომელსაც სტატისტიკურ მექანიკასაც უწოდებენ. ეს თეორიები ერთმანეთს ავსებს.

თერმოდინამიკის მთელი შინაარსი გამოხატულია რამდენიმე მტკიცებით, რომლებსაც თერმოდინამიკის კანონები ეწოდება. ეს კანონები დადგენილია ცდებით და მართებულია ყველა ნივთიერებისათვის, მათი შინაგანი აგებულებისაგან დამოუკიდებლად. სტატისტიკური მექანიკა სითბური მოვლენების უფრო ღრმა, მაგრამ სამაგიეროდ უფრო რთული თეორიაა. მისი საშუალებით შეიძლება თეორიულად დავასაბუთოთ თერმოდინამიკის ყველა კანონი.

თავდაპირველად განვიხილავთ მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითად დებულებებს, რომლებიც ნაწილობრივ ცნობილია VII —



VIII კლასების ფიზიკის კურსიდან. შემდეგ გავეცნობით უმარტივესი სისტემის — შედარებით მცირე სიმკვრივის აირის — მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის რაოდენობრივ მხარეს.

I თ ა ვ ი

## მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის საფუძვლები

### 1. მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი დებულებანი. მოლეკულის ზომა

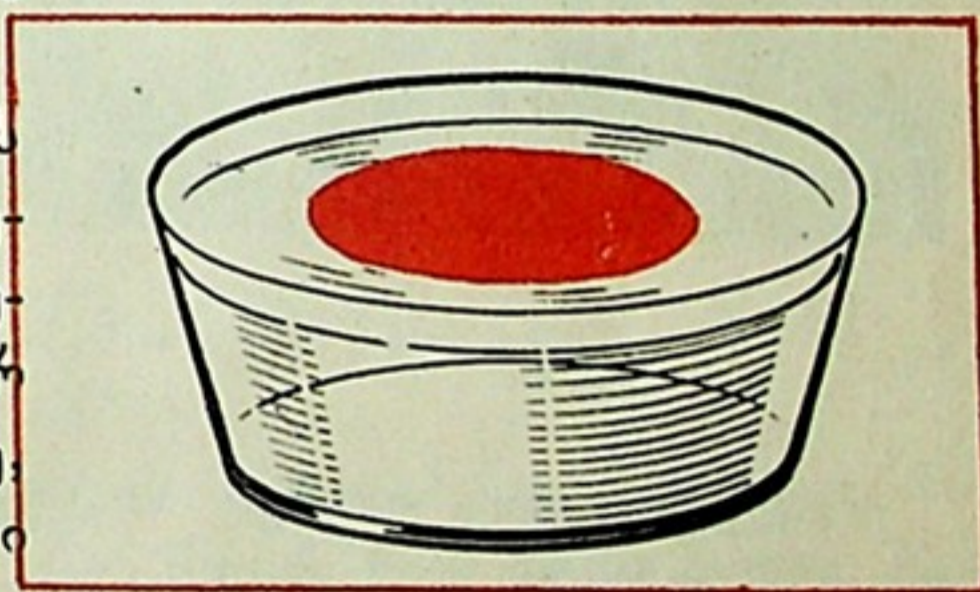
ნივთიერების აგებულების მოლეკულურ-კინეტიკურ თეორიას საფუძვლად უდევს სამი დებულება, რომლებიც დამტკიცებულია ცდებით. ეს დებულებებია: ნივთიერება შედგება ნაწილაკებისაგან; ეს ნაწილაკები ქაოსურად მოძრაობენ; ნაწილაკები ურთიერთქმედებენ.

სხეულის თვისებები და ქცევა განისაზღვრება მისი შემადგენელი ურთიერთმოქმედი ნაწილაკების მოძრაობით. ეს ნაწილაკებია მოლეკულები, ატომები<sup>1</sup>, ან კიდევ უფრო მცირე წარმონაქმნები — ელემენტარული ნაწილაკები.

#### მოლეკულის ზომის შეფასება.

მოლეკულის რეალურად არსებობაში რომ დავრწმუნდეთ, საჭიროა განვსაზღვროთ მისი ზომა.

განვიხილოთ მოლეკულის ზომის შეფასების შედარებით მარტივი მეთოდი. ცნობილია, რომ 1 მმ<sup>3</sup> მოცულობის ზეითუნის ზეთის წვეთს ვერ განვღვრით წყლის ზედაპირზე ისე, რომ მან 0,6 მ<sup>2</sup>-ზე მეტი ფართობი დაიკავოს (სურ. 2). შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ მაქსიმალურ ფართობზე განღვრისას ზეთის ფენის სისქე ტოლი იქნება მოლეკულის ზომისა. ძნელი არ არის განვსაზღვროთ ამ ფენის სისქე და ამით შევაფასოთ ზეითუნის ზეთის მოლეკულის ზომა.



სურ. 2.

<sup>1</sup> გავიხსენოთ: ატომი ქიმიური ელემენტის უმცირესი ნაწილაკია, რომელიც მის ყველა თვისებას ატარებს; მოლეკულა ნივთიერების უმცირესი მდგრადი ნაწილაკია, რომელიც მის ყველა ქიმიურ თვისებას ატარებს; მოლეკულა ატომებისაგან წარმოიქმნება.

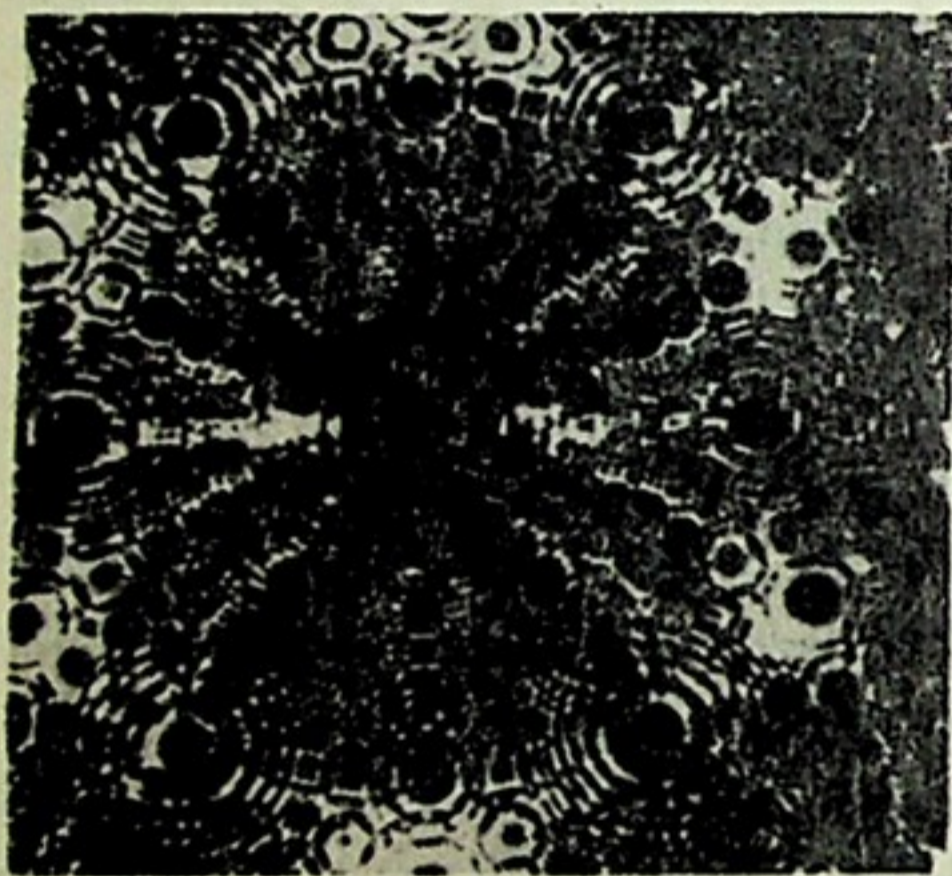


ზეთის ფენის  $V$  მოცულობა ტოლია მისი  $S$  ფართობის ნამრავლი-  
სა  $d$  სისქეზე:  $V = Sd$ . ამრიგად, ფენის სისქე და, მაშასადამე, ზეითუ-  
ნის ზეთის მოლეკულის ზომა ტოლია:

$$d = \frac{0,001}{6000} \text{ სმ}^3/\text{სმ}^2 \approx 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ სმ.}$$

აუცილებელი არაა იმის ჩამოთვლა, თუ რამდენნაირი ხერხით  
მტკიცდება ატომისა და მოლეკულის არსებობა. თანამედროვე ზელსა-  
წყობების საშუალებით შეგვიძლია დავაკვირდეთ ამ ნაწილაკების გა-  
მოსახულებებს. მე-3 სურათზე ნაჩვენებია ატომების განლაგება ვოლ-

ფრამის ნემსის წვერზე. ეს სურა-  
თი მიღებულია ზელსაწყოს საშუ-  
ალებით, რომელსაც იონური  
პროექტორი ეწოდება. პა-  
წაწინა ნათელი ლაქები ცალკეულ  
ატომთა გამოსახულებებია.



სურ. 3.

მოლეკულათა ზომები, კერძოდ,  
ზეითუნის ზეთისა, მეტია ატომთა  
ზომებზე. ატომის დიამეტრი  
 $10^{-8}$  სმ რიგისაა. ეს ზომები იმდენ-  
ად მცირეა, რომ შეუძლებელია  
მისი წარმოდგენა. ასეთ შემთხ-  
ვევაში იყენებენ შედარებებს. აი  
ერთი მათგანი.

თუ მუშტს დედამიწის ზომამ-  
დე გავადიდებთ, მაშინ ასეთივე  
გადიდებით ატომი მუშტისოდენა  
გახდებოდა.

**მოლეკულების რიცხვი.** მოლეკულის ზომის სიმცირის გამო, მათი  
რიცხვი ნებისმიერ მაკროსკოპულ სხეულში ძალიან დიდია. გამოვთ-  
ვალოთ მიახლოებით მოლეკულების რიცხვი 1 გ მასის (1 სმ<sup>3</sup> მოცუ-  
ლობის) წყლის წვეთში. წყლის მოლეკულის დიამეტრი დაახლოებით  
 $3 \cdot 10^{-8}$  სმ-ია. თუ ჩავთვლით, რომ მოლეკულების მჭიდროდ განლა-  
გებისას წყლის თითოეულ მოლეკულას  $(3 \cdot 10^{-8} \text{ სმ})^3$  მოცულობა უკა-  
ვია, მაშინ წვეთში მოლეკულების რაოდენობის გამოსაანგარიშებლად  
წვეთის მოცულობა  $(1 \text{ სმ})^3$  ერთი მოლეკულის მოცულობაზე უნდა  
გავყოთ:

$$N = \frac{1}{(3 \cdot 10^{-8})^3} \approx 3,7 \cdot 10^{22}.$$



ყოველი ჩასუნთქვისას ფილტვებს ვაწვდით იმდენ მოლეკულას, რომ თუ ამოსუნთქვის შემდეგ ყველა მოლეკულა თანაბრად განაწილდება დედამიწის ატმოსფეროში, მაშინ პლანეტის ყოველი მცხოვრები ჩასუნთქავს ჩვენს ფილტვებში ნამყოფ დაახლოებით ორ მოლეკულას.

## 2. მოლეკულების მასა. ავობადროს მუდმივა

წყლის მოლეკულის მასა. ცალკეული მოლეკულებისა და ატომების მასა ძალიან მცირეა. მაგალითად, 1 გ წყალი შეიცავს  $3,7 \cdot 10^{22}$  მოლეკულას. მაშასადამე, ერთი მოლეკულის მასა

$$m_{0H_2O} \approx \frac{1}{3,7 \cdot 10^{22}} \text{ გ} \approx 2,7 \cdot 10^{-23} \text{ გ.} \quad (1.1)$$

ასეთივე რიგისაა სხვა ნივთიერებათა მოლეკულების მასაც, გარდა ორგანულ ნივთიერებათა უზარმაზარი მოლეკულებისა.

ფარდობითი მოლეკულური მასა. რადგან მოლეკულის მასა ძალიან მცირეა, ამიტომ, უმჯობესია, გამოთვლისას ვისარგებლოთ მასის არა აბსოლუტური, არამედ ფარდობითი მნიშვნელობით. საერთაშორისო შეთანხმების მიხედვით (როგორც ეს VIII კლასის ქიმიის კურსიდან ვიცით) ყველა მოლეკულისა და ატომის მასას ადარებენ ნახშირბადის ატომის მასის  $1/12$ -ს (ატომური მასის ე. წ. ნახშირბადური სკალა)<sup>1</sup>. ნივთიერების ფარდობითი მოლეკულური (ან ატომური) მასა ( $M_r$ ) ეწოდება მოცემული ნივთიერების მოლეკულის (ან ატომის) მასის ( $m_0$ ) ფარდობას ნახშირბადის ატომის მასის ( $m_{0C}$ )  $1/12$ -თან:

$$M_r = \frac{m_0}{1/12 m_{0C}} \quad (1.2)$$

ამჟამად ყველა ქიმიური ელემენტის ფარდობითი ატომური მასა დიდი სიზუსტითაა გაზომილი. თუ შევკრებთ მოლეკულის შედგენილობაში შემავალ ატომთა ფარდობით მასებს, მივიღებთ ფარდობით მოლეკულურ მასას. მაგალითად, ნახშირორჟანგის  $CO_2$  ფარდობითი მოლეკულური მასა დაახლოებით 44-ის ტოლია, რადგან ნახშირბადის ფარდობითი ატომური მასაა 12, ორბადისა კი — დაახლოებით  $16:12 + 2 \cdot 16 = 44$ .

<sup>1</sup> ატომისა და მოლეკულის მასის შედარება ნახშირბადის ატომის მასის  $1/12$ -თან შემოიღეს 1961 წ. ასეთი არჩევანის მთავარი მიზეზი ისაა, რომ ნახშირბადი უამრავ სხვადასხვანაირ ქიმიურ ნაერთში შედის.  $1/12$  თანამართლად იმიტომაც აღებული, რომ ატომის ფარდობითი მასა ახლოს იყოს მთელ რიცხვთან. ნახშირბადის ფარდობითი მასა ზუსტად 12-ია, წყალბადისა კი ახლოსაა 1-თან.



ნივთიერების რაოდენობა და ავოგადროს მუდმივა. უფრო ბუნებრივი იქნებოდა, რომ ნივთიერების რაოდენობა გაგვეზომა სხეულში შემავალი მოლეკულებისა და ატომების რიცხვით. მაგრამ, რადგანაც ნებისმიერ მაკროსკოპულ სხეულში უამრავი მოლეკულაა, გამოთვლებისას იყენებენ მოლეკულების არა აბსოლუტურ, არამედ ფარდობით რიცხვს.

ერთეულთა საერთაშორისო სისტემაში ნივთიერების რაოდენობას მოლეკულით გამოსახავენ. [ერთი მოლი ნივთიერების რაოდენობაა, რომელიც იმდენ მოლეკულას ან ატომს შეიცავს, რამდენსაც 0,012 კგ მასის ნახშირბადი.]

ბუნებრივია, რომ ნებისმიერი ნივთიერების ერთი მოლი ერთნაირი რაოდენობის ატომებს ან მოლეკულებს შეიცავს. ატომების ამ რიცხვს აღნიშნავენ  $N_A$ -თი და ავოგადროს მუდმივას უწოდებენ, XIX საუკუნის იტალიელი მეცნიერის პატივსაცემად.

ავოგადროს მუდმივას განსასაზღვრავად უნდა ვიცოდეთ ნახშირბადის (ან რომელიმე სხვა ელემენტის) ერთი ატომის მასა. მასის მიახლოებით შეფასებას ისე მოვახდენთ, როგორც ეს ზემოთ შევასრულეთ წყლის მოლეკულის მასისათვის (უფრო ზუსტი მეთოდები დამყარებულია იონთა კონის გადახრაზე ელექტრომაგნიტურ ველში).

გაზომვები გვიჩვენებს, რომ ნახშირბადის ატომის მასა  $m_0 c = 1,995 \cdot 10^{-26}$  კგ.

ავოგადროს მუდმივას გამოსაანგარიშებლად ერთი მოლი ნახშირბადის მასა უნდა გავყოთ ნახშირბადის ერთი ატომის მასაზე:

$$N_A = 0,012 \text{ კგ/მოლი} \cdot \frac{1}{1,995 \cdot 10^{-26} \text{ კგ}} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ მოლი}^{-1}.$$

დასახელება მოლი  $^{-1}$  გვიჩვენებს, რომ  $N_A$  ერთი მოლი ნებისმიერი ნივთიერების ატომთა რიცხვია. თუ ნივთიერების რაოდენობა  $\nu = 2,5$  მოლს, მაშინ მოლეკულების რაოდენობა სხეულში იქნება  $N = \nu N_A \approx 1,5 \cdot 10^{24}$ . ამრიგად, (ნივთიერების რაოდენობა  $\nu$  ტოლია მოცემულ სხეულში შემავალი მოლეკულების  $N$  რიცხვის შეფარდებისა ავოგადროს მუდმივასთან, ე. ი. ერთ მოლ ნივთიერებაში შემავალ მოლეკულების რაოდენობასთან: )

$$\left[ \nu = \frac{N}{N_A} \right] \quad (1.3)$$

ავოგადროს მუდმივას ეგზომ დიდი რიცხვითი მნიშვნელობა გვიჩვენებს, თუ რამდენად მცირეა მიკროსკოპული მასშტაბები მაკროსკოპულთან შედარებით; სხეულს, რომელიც ერთ მოლ ნივთიერებას შეიცავს, ჩვენთვის ჩვეული მაკროსკოპული ზომები აქვს.



მოლური მასა. ფარდობით მოლეკულურ მასასთან ( $M_r$ ) ერთად, ფიზიკასა და ქიმიაში ფართოდ იყენებენ მოლურ მასას ( $M$ ) (მოლური მასა არის მასა, რომელიც აქვს 1 მოლ ნივთიერებას.) ✓

ამ განსაზღვრის მიხედვით მოლური მასა ტოლია მოლეკულის მასის ნამრავლისა ავოგადროს მუდმივაზე:

$$M = m_0 N_A \quad (1.4)$$

ამა თუ იმ რაოდენობის ნივთიერების  $m$  მასა რომ გავიგოთ, საჭიროა ერთი მოლეკულის მასა გავამრავლოთ სხეულში მოლეკულების რაოდენობაზე.

$$m = m_0 N \quad (1.5)$$

თუ (1.3) ფორმულაში  $N_A$ -სა და  $N$ -ს შევცვლით მათი გამოსახულებით (1.4) და (1.5) ფორმულებიდან, მივიღებთ:

$$v = \frac{m}{M} \quad (1.6)$$

ნივთიერების რაოდენობა ტოლია ნივთიერების მასის შეფარდებისა მის მოლურ მასასთან. ნივთიერების რაოდენობის სწორედ ასეთი განსაზღვრაა მოცემული IX კლასის ქიმიის სახელმძღვანელოში.

თუ ნივთიერების მასა არის  $m$ , მოლური მასა კი —  $M$ , მაშინ (1.3) და (1.6) ფორმულების თანახმად:

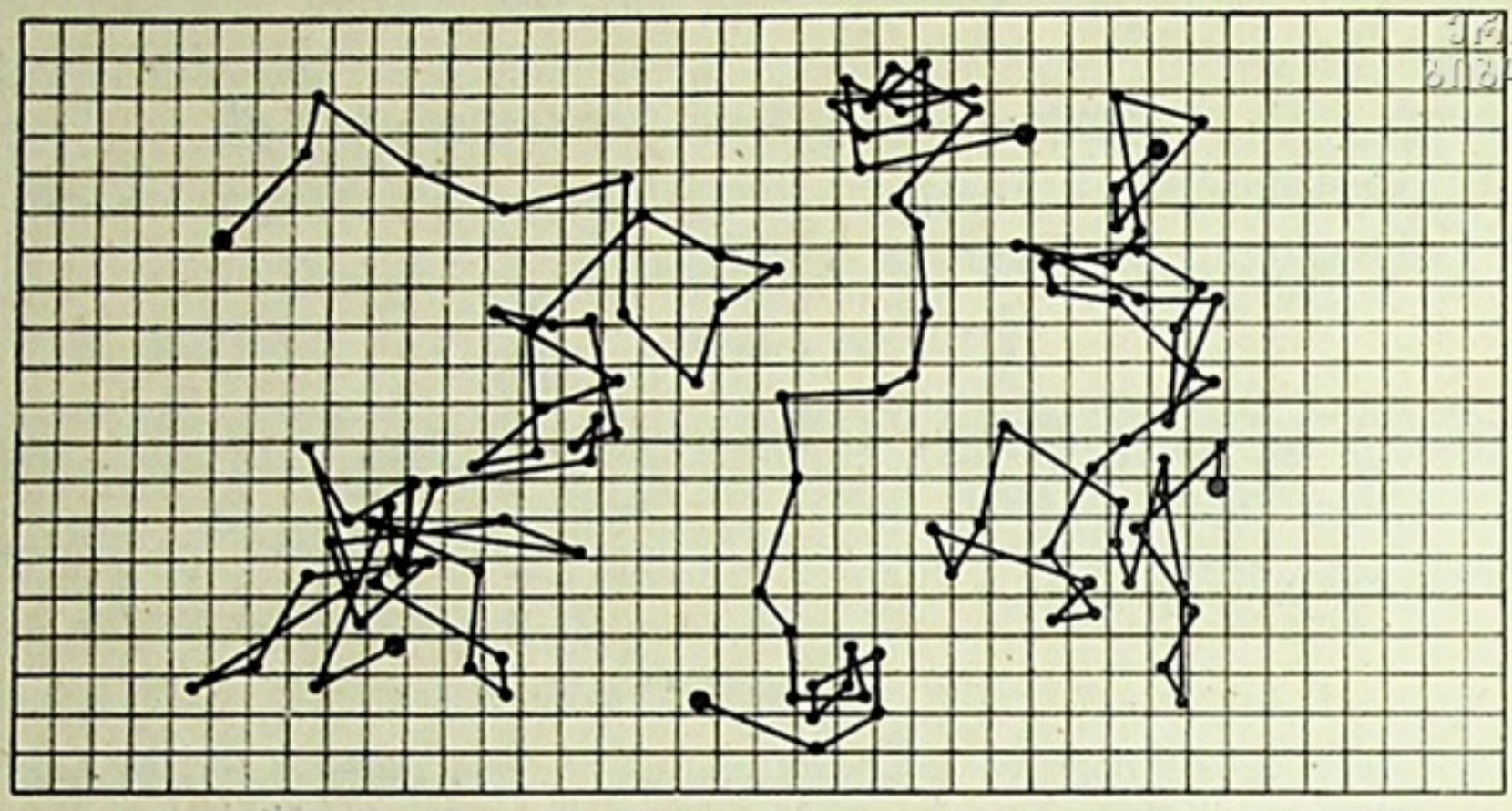
$$N = v N_A = N_A \frac{m}{M} \quad (1.7)$$

- ?
1. ჩამოთვალეთ მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი დებულებანი.
  2. დაასახელეთ მოლეკულათა არსებობის დამამტკიცებელი ფაქტები.
  3. რას ეწოდება ფარდობითი მოლეკულური მასა?
  4. რას უდრის წყლის ფარდობითი მოლეკულური მასა?
  5. რას ეწოდება ნივთიერების რაოდენობა?
  6. განმარტეთ ნივთიერების რაოდენობის ერთეული — მოლი.
  7. რას უდრის ავოგადროს მუდმივა?
  8. განმარტეთ მოლური მასა.
  9. რა კავშირია სხეულის ნივთიერების რაოდენობასა და მასას შორის?
  10. დაამტკიცეთ, რომ მოლური მასა ფარდობით მოლეკულურ მასასთან დაკავშირებულია ფორმულით  $M = 10^{-3} M_r$  კგ. მოლი  $^{-1}$ .
  11. რას უდრის  $\text{CO}_2$ -ის მოლური მასა?
  12. რას უდრის 3 მოლი ნახშირბევა აირის მასა?

## 8. ბროუნის მოძრაობა

VII კლასში გავეცანით დიფუზიას — ნივთიერებათა ურთიერთშერევას მათი უშუალო კონტაქტის დროს. ეს მოვლენა აიხსნება მოლეკულების უწყესრიგო მოძრაობით. მაგრამ მოლეკულების მოძრაობა ყველაზე ნათლად მტკიცდება მაშინ, როცა მიკროსკოპით ვაკვირდებით წყალში შეტივტივებულ რაიმე მყარი ნივთიერების ნაწილაკებს. ეს





სურ. 4.

ნაწილაკები უწესრიგოდ მოძრაობენ. ამ მოძრაობას ბროუნის მოძრაობა ეწოდება.

(ბროუნის მოძრაობა სითხეში (ან აირში) შეტევითი ნაწილაკთა სითბური მოძრაობაა.)

დაკვირვება ბროუნის მოძრაობაზე. ინგლისელმა ბოტანიკოსმა ბროუნმა ეს მოვლენა პირველად 1827 წ. შეამჩნია, როცა მიკროსკოპით აკვირდებოდა წყალში შეტევითი ნაწილაკების სპორებს. ამჟამად იყენებენ გუმბურის (წყალში უხსნადი საღებავის) ნაწილაკებს.) ეს ნაწილაკები ქაოსურად მოძრაობენ. ყველაზე საოცარი და უჩვეულო ისაა, რომ ეს მოძრაობა არასოდეს არ წყდება. ჩვენ მივეჩვიეთ იმას, რომ ყველა მოძრაობა სხეული ადრე თუ გვიან ჩერდება. (ბროუნის მოძრაობა სითბური მოძრაობაა და იგი არ შეიძლება შეწყდეს.) მისი ინტენსიურობა იზრდება ტემპერატურის ზრდით. მე-4 სურათზე მოცემულია ბროუნის ნაწილაკთა მოძრაობის სქემა. ნაწილაკის მდებარეობანი, რომლებიც წერტილებითაა აღნიშნული, განსაზღვრულია დროის ტოლი შუალედების (30 წმ) შემდეგ. ეს წერტილები წრფის მონაკვეთებითაა შეერთებული. სინამდვილეში ნაწილაკის ტრაექტორია გაცილებით რთულია.

ბროუნის მოძრაობას შეიძლება დავაკვირდეთ აირში. მას ასრულებს ჰაერში შეტევითი მტვრის ან ბოლის ნაწილაკები.

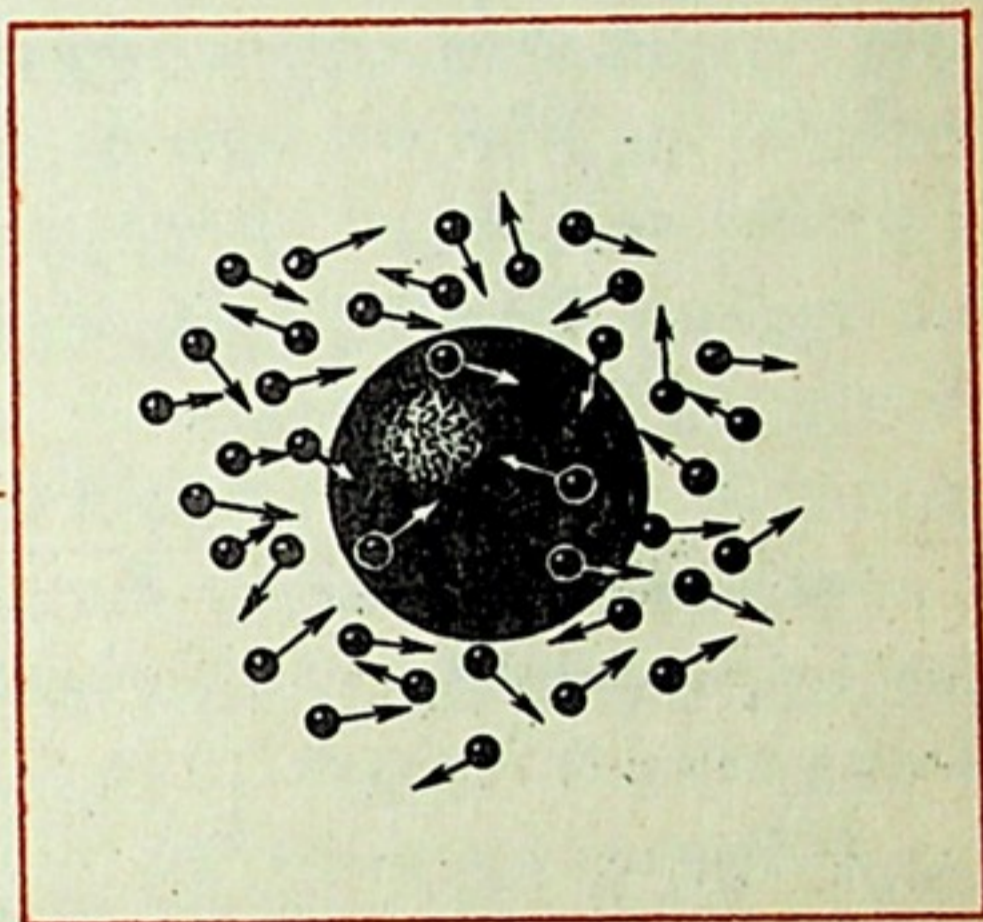
ამჟამად „ბროუნის მოძრაობის“ ცნებას უფრო ფართო მნიშვნელობით იყენებენ. მაგალითად, ბროუნის მოძრაობას წარმოადგენს მგრძნობიარე გამზომ ხელსაწყოთა ისრების ცახცახი. რაც ხელსაწყოს



დეტალებისა და გარემომცველი ნივთიერების ატომთა სითბური მოძრაობის შედეგია.

### ბროუნის მოძრაობის ახსნა.

ბროუნის მოძრაობა შეიძლება ავხსნათ მხოლოდ მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის საფუძველზე. ბროუნის მოძრაობის მიზეზი ისაა, რომ ნაწილაკზე მოლეკულების დაჯახებანი ერთმანეთს არ აკომპენსირებს. მე-5 სურათზე სქემატურად ნაჩვენებია ბროუნის ერთი ნაწილაკისა და მისი მახლობელი მოლეკულების მდებარეობა. მოლეკულების ქაოსური მოძრაობისას ბროუნის ნაწილაკისათვის გადაცემული იმპულსები, მაგალითად, მარცხნიდან და მარჯვნიდან, ერთნაირი არაა. ამიტომ ნულისაგან განსხვავებულია ჯამური წნევის ძალა, რომელიც იწვევს ბროუნის ნაწილაკის მოძრაობის ცვლილებას.



სურ. 5.

საშუალო წნევას განსაზღვრული მნიშვნელობა აქვს როგორც აირში, ისე სითხეში. მაგრამ ხშირია საშუალო მნიშვნელობიდან უმნიშვნელო შემთხვევითი გადახრა. რაც უფრო მცირეა სხეულის ზედაპირი, მით უფრო საგრძნობია მის ფართობზე მოქმედი წნევის ძალის ფარდობითი ცვლილება. მაგალითად, თუ ფართობის ზომა მოლეკულის რამდენიმე დიამეტრის რიგისაა, მაშინ მასზე მოქმედი ძალა მოლეკულების შეხლისას ნახტომისებურად იცვლება ნულიდან რაღაც მნიშვნელობამდე.

ბროუნის მოძრაობის მოლეკულურ-კინეტიკური თეორია შექმნა ა. აინშტაინმა 1905 წ. ბროუნის მოძრაობის თეორიის შექმნამ და ფრანგი ფიზიკოსის ე. პერენის მიერ ექსპერიმენტულად დადასტურებამ საბოლოო გამარჯვება მოუტანა მოლეკულურ-კინეტიკურ თეორიას.



#### 4. მოლეკულათა ურთიერთქმედების ძალები



ქართული  
ენების  
სწავლის  
სამეცნიერო  
ცენტრი

ძნელი არ არის იმის დამტკიცება, რომ ატომები (მოლეკულები) მნიშვნელოვანი სიდიდის ძალებით ურთიერთქმედებენ. აბა ვცადოთ მსხვილი ჯოხის გადატეხა, ის ხომ მოლეკულებისგან შედგება. მოლეკულებს შორის რომ მიზიდულობის ძალები არ მოქმედებდეს, ყველა ნივთიერება ნებისმიერ პირობებში მხოლოდ აირად მდგომარეობაში იქნებოდა. სწორედ ძალები აკავებს მოლეკულებს ერთმანეთის მახლობლად და ქმნის თხევადსა და მყარ სხეულს. მაგრამ მარტო მიზიდულობის ძალები ვერ უზრუნველყოფენ ატომებისა და მოლეკულების მდგრადი წარმონაქმნების არსებობას. ძალიან მცირე მანძილებზე მოლეკულებს შორის მოქმედებს განზიდვის ძალები, რის გამოც მოლეკულები ერთმანეთში არ შეიჭრებიან.

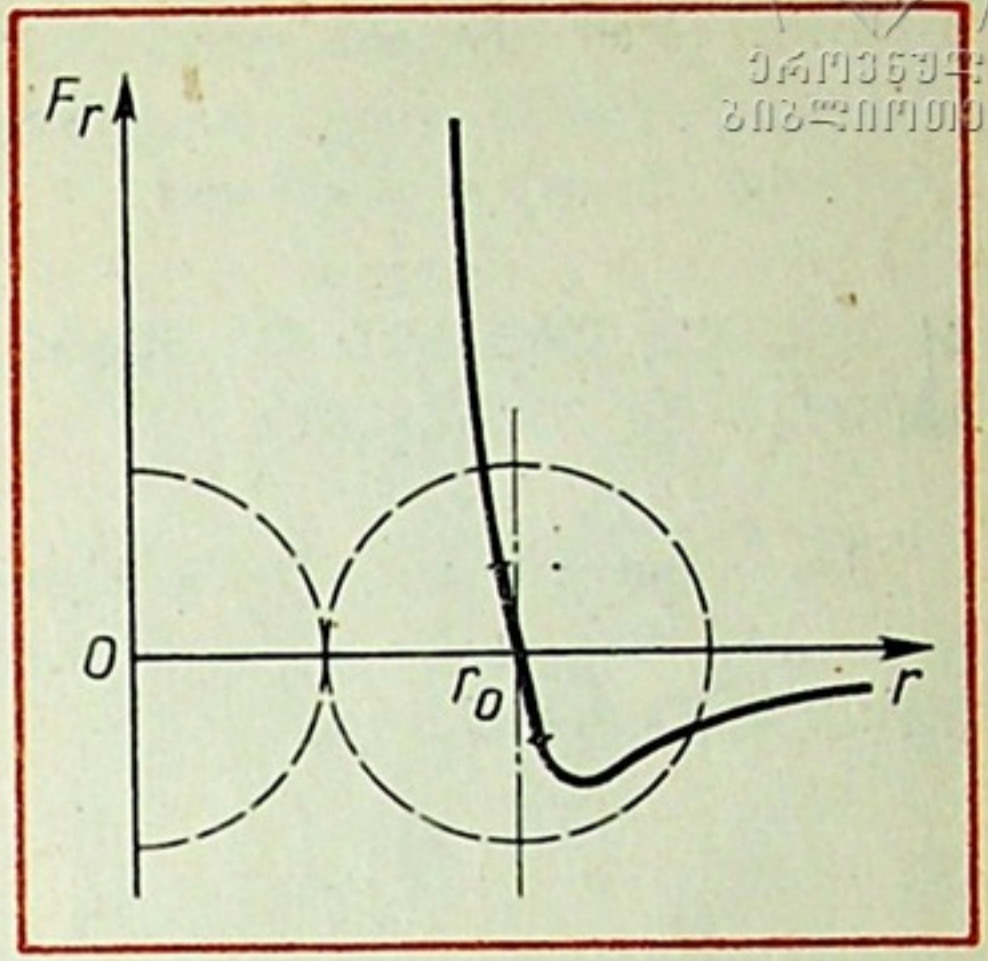
**მოლეკულის აგებულება.** მოლეკულა რთული სისტემაა, რომელიც ცალკეული დამუხტული ნაწილაკებისაგან (ელექტრონებისა და ატომბირთვებისაგან) შედგება. ღმართალია, მთლიანობაში მოლეკულები ელექტრულად ნეიტრალურია, მაგრამ მცირე მანძილებზე მათ შორის მნიშვნელოვანი ელექტრული ძალები მოქმედებს. ურთიერთქმედებენ მეზობელი მოლეკულების ელექტრონები და ბირთვები. ატომებსა და მოლეკულებში ნაწილაკების მოძრაობისა და მოლეკულების ურთიერთქმედების ძალთა აღწერა ერთობ რთული ამოცანაა. მას ატომურ ფიზიკაში განიხილავენ. მოვიყვანოთ მხოლოდ შედეგი: ორი მოლეკულის ურთიერთქმედების ძალის მიახლოებითი დამოკიდებულება მათ შორის მანძილზე.

მოლეკულები შედგება საპირისპირო ნიშნით დამუხტული ნაწილაკებისაგან. ერთი მოლეკულის ელექტრონებსა და მეორის ატომბირთვებს შორის მოქმედებს მიზიდულობის ძალები. ამავე დროს ორივე მოლეკულის ელექტრონები ერთმანეთს განიზიდავს; ურთიერთგანიზიდება მათი ბირთვებიც. მოლეკულების ურთიერთქმედების ჯამური ძალა მიზიდულობისა და განზიდვის ძალთა მოდულების სხვაობის ტოლია.

**მოლეკულური ძალების დამოკიდებულება მოლეკულებს შორის მანძილზე.** ვნახოთ, როგორ იცვლება მოლეკულათა ურთიერთქმედების ძალის გეგმილი მოლეკულების შემაერთებელ წრფეზე იმის მიხედვით, თუ რა მანძილია მათ შორის.



თუ მოლეკულებს შორის მანძილი რამდენჯერმე აღემატება მათ ზომებს, მაშინ ურთიერთქმედების ძალები პრაქტიკულად არ ვლინდება. ელექტრულად ნეიტრალურ მოლეკულებს შორის მოქმედი ძალები ახლო შემდეგია. მანძილზე, რომელიც მოლეკულის დიამეტრს 2—3-ჯერ აღემატება, განზიდვის ძალა ნულის ტოლია; შესამჩნევია მხოლოდ მიზიდულობის ძალა. მანძილის შემცირებით მიზიდულობის ძალა ჯერ იზრდება, მაგრამ მანძილის შემდგომი შემცირებისას თანდათან ვლინდება განზიდვის ძალა. იგი ძალიან სწრაფად იზრდება, როცა ატომთა ელექტრონული გარსები ურთიერთგადაფარვას იწყებენ.



სურ. 6.

მე-6 სურათზე ნაჩვენებია მარჯვენა მოლეკულაზე (სურათის მიხედვით) მოქმედი  $F_r$  ძალის გეგმილის დამოკიდებულება მანძილზე.  $r=r_0$  მანძილზე, რომელიც დაახლოებით მოლეკულათა რადიუსების ჯამის ტოლია,  $F_r = 0$ , რადგან მიზიდულობისა და განზიდვის ძალები მოდულით ტოლია. როცა  $r > r_0$ , მოლეკულებს შორის მოქმედებს მიზიდულობის ძალა და  $F_r$  გეგმილი უარყოფითია. თუ  $r < r_0$ , მაშინ მოქმედებს განზიდვის ძალა და  $F_r$  გეგმილი დადებითია.

**დრეკადობის ძალების წარმოქმნა.** მოლეკულათა ურთიერთქმედების ძალის დამოკიდებულება მათ შორის მანძილზე გვიხსნის დრეკადობის ძალის წარმოქმნას სხეულთა კუმშვისა და გაჭიმვისას. თუ კუმშვის გზით მოლეკულებს შორის მანძილს გავხდით  $r_0$ -ზე ნაკლებს, მაშინ მოქმედებას იწყებს დაახლოების შემფერხებელი ძალა. პირიქით, მოლეკულების ურთიერთდაშორებისას (გაჭიმვით) მოქმედებს მიზიდულობის ძალა, რომელიც გარე ზემოქმედების შეწყვეტის შემდეგ მოლეკულებს პირვანდელ მდებარეობაში აბრუნებს.

მცირე უბანზე მრუდი შეიძლება წრფის მონაკვეთად ჩავთვალოთ. ამიტომაც, მცირე დეფორმაციებისას მართებულია ჰუკის კანონი, რომლის მიხედვით დრეკადობის ძალა დეფორმაციის პროპორციულია. მოლეკულების წანაცვლებისას ჰუკის კანონი უკვე უმართებულოა.

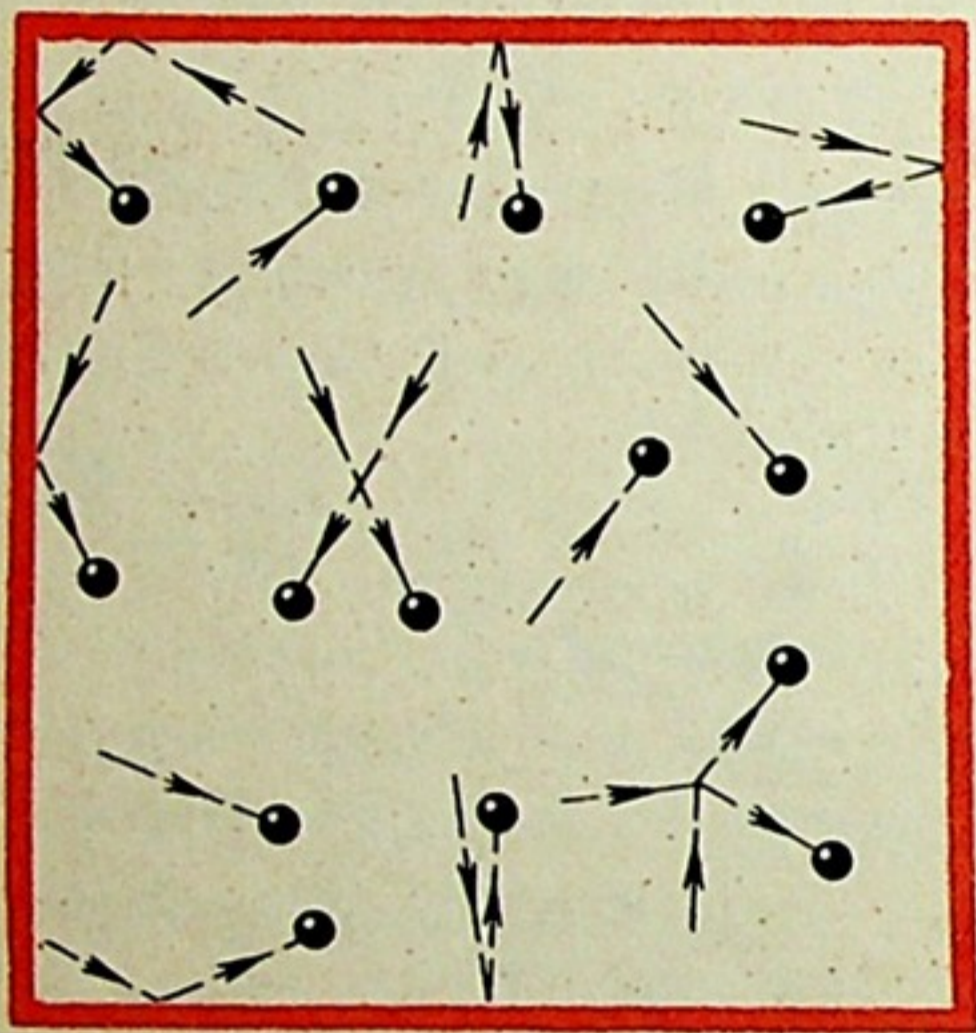
რადგან სხეულის დეფორმაციისას იცვლება მანძილი ყველა მოლეკულას შორის, მოლეკულების მეზობელი ფენების წილად მოდის



საერთო დეფორმაციის უმნიშვნელო ნაწილი. ამიტომ ჰუკის კანონი სრულდება მაშინ, როცა დეფორმაციის ზომა რამდენიმე მილიონჯერ აღემატება მოლეკულის ზომას.

**5/ აირადი, თხევადი და მყარი სხეულების აგებულება**

მოლეკულურ-კინეტიკური თეორია საშუალებას გვაძლევს გავერკვეთ, თუ რატომ შეუძლია ნივთიერებას იყოს აირად, თხევად და მყარ მდგომარეობაში.



სურ. 7.

აირი. აირში ატომთა ან მოლეკულათა შორის მანძილი საშუალოდ მრავალჯერ აღემატება თვით მოლეკულის ზომას (სურ. 7). მაგალითად, ატმოსფერული წნევის დროს ჰურჭლის მოცულობა რამდენიმე ათეულათასჯერ აღემატება მასში მყოფი მოლეკულების მოცულობას.

აირი ადვილად იკუმშება, ჰრადგან შეკუმშვისას მცირდება მხოლოდ საშუალო მანძილი მოლეკულებს შორის, მაგრამ მოლეკულები ერთმანეთს არ „აწვებიან“ (სურ. 8). მოლეკულები ძალიან დიდი სიჩქარით — ასეული მეტრობით წამში — მოძრაობენ სივრცეში. შეჯახების შემდეგ ისინი

ბილიარდის ბირთვების მსგავსად გაიტყორცნებიან სხვადასხვა მხარეს. აირის მოლეკულების სუსტ ურთიერთმიზიდვას არ ძალუძს მათი შეკავება ერთმანეთის ახლოს. ამიტომ აირს შეუძლია უსაზღვროდ გაფართოება, ვერ ინარჩუნებს ვერც ფორმას და ვერც მოცულობას.

ჰურჭლის კედელთან მოლეკულების უამრავი შეჯახება წარმოქმნის აირის წნევას.

ხითხე. ხითხეში მოლეკულები თითქმის მჭიდროდ ეკვრიან ერთმანეთს (სურ. 9). ამიტომ მოლეკულა ხითხეში სულ სხვანაირად იქცევა, ვიდრე აირში. სხვა მოლეკულების მიერ თითქოს „გალიაში“ მომწყვდევული, ის ადვილზე „დარბის“ (ირხევა წონასწორობის მდებარეობის მახლობლად და ეჯახება მეზობელ მოლეკულებს). მხოლოდ



იაკობ ილიას ძე ფრენკელი (1894—1952) გამოჩენილი საბჭოთა ფიზიკოსი-თეორეტიკოსია, რომელმაც მნიშვნელოვანი წვლილი შეიტანა ფიზიკის სრულიად სხვადასხვა დარგში. ი. ფრენკელი ავტორია ნივთიერების თხევადი მდგომარეობის თანამედროვე თეორიისა. მან საფუძველი ჩაუყარა ფერომაგნეტიზმის თეორიას. ფართოდაა ცნობილი ი. ფრენკელის შრომები ატმოსფერული ელექტრობისა და დედამიწის მაგნიტური ველის წარმოქმნის შესახებ. ფრენკელმა შექმნა ურანის ბირთვების დაყოფის პირველი რაოდენობრივი თეორია.

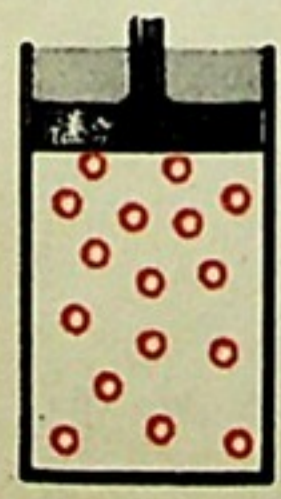


ფრენკელი

დროდადრო აკეთებს მოლეკულა „ნახტომებს“ და გაიჭრება „გალიის ლობურიდან“, მაგრამ მაშინვე ხვდება ახალი მეზობლების მიერ შექმნილ ახალ „გალიაში“. წყლის მოლეკულის „ბინადარი ცხოვრების“ დრო, ე. ი. წონასწორობის ერთი გარკვეული მდებარეობის მახლობლად რხევის დრო, ოთახის ტემპერატურაზე, საშუალოდ  $10^{-11}$  წმ-ის ტოლია. ერთი რხევის დრო კი საგრძნობლად ნაკლებია ( $10^{-12}$ — $10^{-13}$  წმ). ტემპერატურის მომატებისას მოლეკულების „ბინადარი ცხოვრების“ დრო მცირდება. სითხეში მოლეკულების მოძრაობის ხასიათი, რომელიც პირველად საბჭოთა ფიზიკოსმა ი. ფრენკელმა დაადგინა, საშუალებას გვაძლევს გავერკვეთ სითხის ძირითად თვისებებში.

სითხის მოლეკულები ერთმანეთთან ახლოსაა. ამიტომ, თუ შევეცდებით სითხის მოცულობის თუნდაც მცირე სიდიდით შეცვლას, იწყება თვით მოლეკულების დეფორმაცია (სურ. 10), რისთვისაც საჭიროა ძალიან დიდი ძალა. სწორედ ამით აიხსნება სითხის მცირე კუმშვადობა.

სითხე, როგორც ვიცით, დენადია, ე. ი. ვერ ინარჩუნებს თვის ფორმას. ეს შემდეგნაირად აიხსნება: თუ სითხე არ მიედინება, მაშინ მოლეკულათა გადახტომა ერთი „ბინადარი“ მდებარეობიდან მეორეში ერთნაირი სიხშირით მოხდება ყველა მიმართულებით (სურ. 9). გარე



სურ. 8.



სურ. 9.

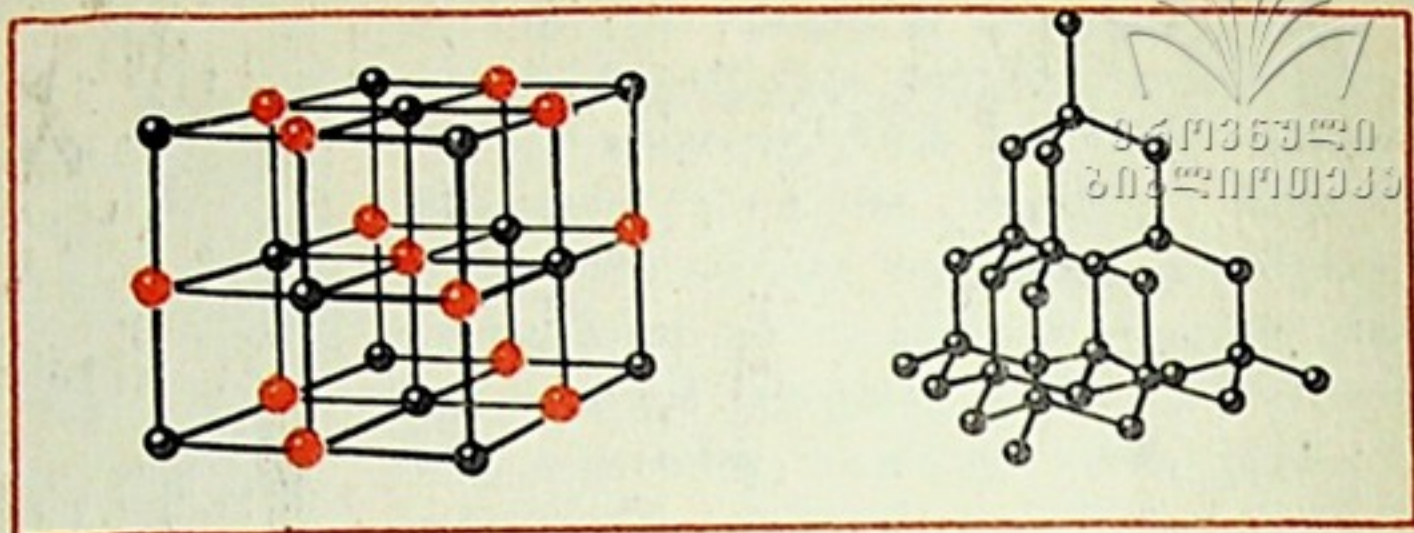


საქ. სსრკ. მეცნიერებათა  
თბ. სსრ. ბიბლიოთეკა  
ბრძოლითა

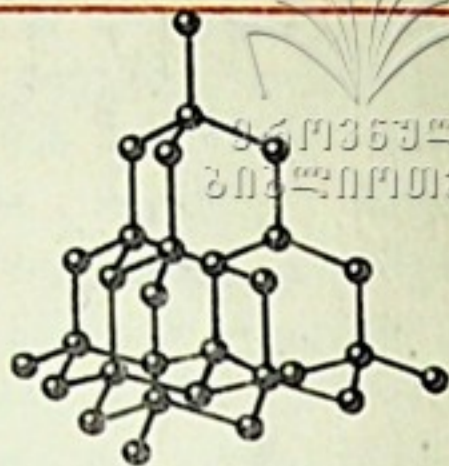




სურ 11.



სურ. 12.



სურ. 13.

ძალა შესამჩნევად არ ცვლის მოლეკულების გადახტომათა რიცხვს წამში, მაგრამ გადახტომა ერთი „ბინადარი“ მდებარეობიდან მეორეში უპირატესად გარე ძალის მოქმედების მიმართულებით ხდება (სურ. 11). სწორედ ამიტომ არის სითხე დენადი და ამიტომ ღებულობს იგი ჭურჭლის ფორმას.

**მყარი სხეული.** სითხისაგან განსხვავებით მყარი სხეულის ატომები ან მოლეკულები, გარკვეული წონასწორობის მდებარეობის მახლობლად ირხევა. მართალია, ზოგჯერ მოლეკულები იცვლის წონასწორობის მდებარეობას, მაგრამ ეს ძალიან იშვიათია. ამიტომაც, რომ მყარი სხეული ინარჩუნებს არა მარტო მოცულობას, არამედ ფორმასაც.

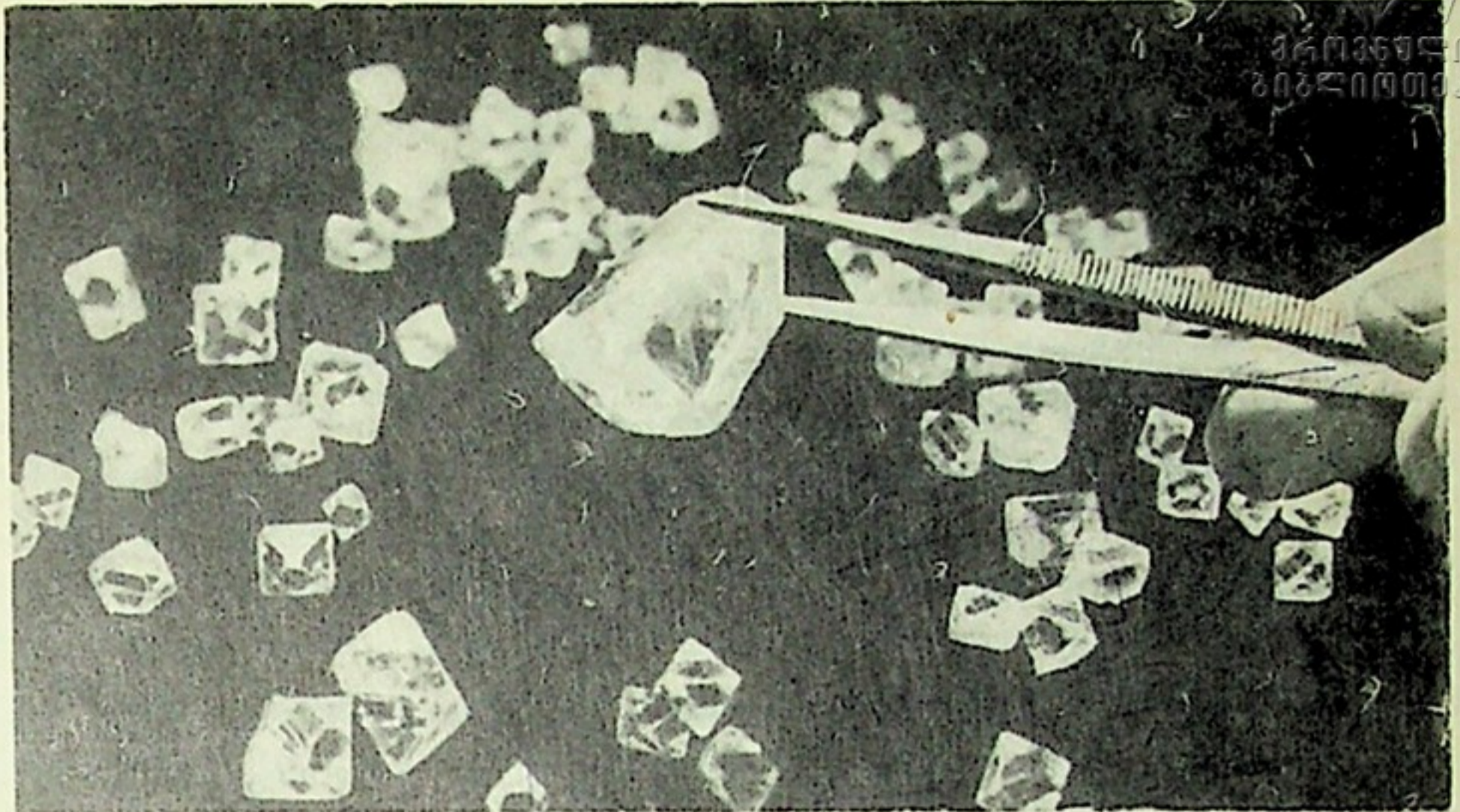
არის კიდევ მნიშვნელოვანი განსხვავება სითხესა და მყარ სხეულს შორის. სითხე შეიძლება შევადაროთ ადამიანთა შეჯგუფებას, სადაც თითოეული მოუსვენრად მოძრაობს ადგილზე, მყარი სხეული კი მოგვაგონებს მწყობრ კოჭორტას, სადაც წევრები, მართალია, „სმენაზე“ არ დგანან (სითბური მოძრაობის გამო), მაგრამ საშუალოდ განსაზღვრულ ინტერვალს ინარჩუნებენ ერთმანეთს შორის. ესე იგი მყარი სხეულის ატომების ან იონების წონასწორობულ მდებარეობათა ცენტრებს შევაერთებთ, მაშინ მივიღებთ წესიერ სივრცულ მესერს, რომელსაც კ რ ი ს ტ ა ლ უ რ ი მესერი ეწოდება. )

მე-12 და მე-13 სურათებზე გამოსახულია სუფრის მარილისა და ალმასის კრისტალური მესრები. კრისტალთა ატომების განლაგების შიდა წესრიგი გვაძლევს გეომეტრიულად წესიერ გარეგნულ ფორმას.

მე-14 სურათზე ნაჩვენებია იაკუტიის ალმასები.

- 9 1. მოიყვანეთ მოლეკულების სითბური მოძრაობის დამადასტურებელი ფაქტები. 2. რატომაც, რომ ბროუნის მოძრაობა შესამჩნევია მხოლოდ მცირე მასის ნაწილაკებისათვის? 3. როგორია მოლეკულური ძალების ბუნება? 4. როგორია დამოკიდებული მოლეკულების ურთიერთქმედების ძალები მათ შორის მანძილზე? 5. რატომ შეეზრდება ერთმანეთს მიჭერით ტყვიის ძელაკის გლუვი სუფთა გადანაჭრები? 6. რა განსხვავებაა აირის, სითხისა და მყარი სხეულის მოლეკულების სითბურ მოძრაობებს შორის?





სურ. 14.

### ნ. იდეალური აირი მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის თვალსაზრისით

ნივთიერების ძირითად თვისებათა ახსნა მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის საფუძველზე არც თუ ისე რთულია. მაგრამ თეორია, რომელიც აღგენს რაოდენობრივ კავშირს ცდით გაზომილ სიდიდეებსა (წნევას, ტემპერატურასა და სხვ.) და თვით მოლეკულების თვისებებს (მათ რაოდენობასა და მოძრაობის სიჩქარეს) შორის, ერთობ რთულია. ჩვენ გავეცნობით მხოლოდ საკმაოდ გაუხშობეული აირის თეორიას.

**იდეალური აირი.** გაუხშობეულ აირში მოლეკულებს შორის მანძილი ბევრად აღემატება მათ ზომებს. ამ შემთხვევაში მოლეკულების ურთიერთქმედება უმნიშვნელოა, შეიძლება მისი უგულებელყოფა, მოლეკულების კინეტიკური ენერგია კი ბევრად დიდია ურთიერთქმედების პოტენციურ ენერგიაზე. აირის მოლეკულები შეიძლება მივიჩნიოთ ძალიან მცირე მყარ ბირთვებად. მოლეკულებს (ბირთვებს) შორის მიზიდვა არ არის, განზიდვის ძალები კი დროის მხოლოდ უაღრესად მცირე შუალედებში ვლინდება მოლეკულების ურთიერთდაჯახებისას.

რეალური აირის ნაცვლად, რომლის მოლეკულებს შორის რთული ურთიერთქმედებებია, ჩვენ განვიხილავთ მის ფიზიკურ მოდელს. ამ მოდელს იდეალური აირი ეწოდება. **იდეალური აირი ის აირია, რომლის მოლეკულათა ურთიერთქმედება უგულებელყოფილია.**

Handwritten signature or mark.



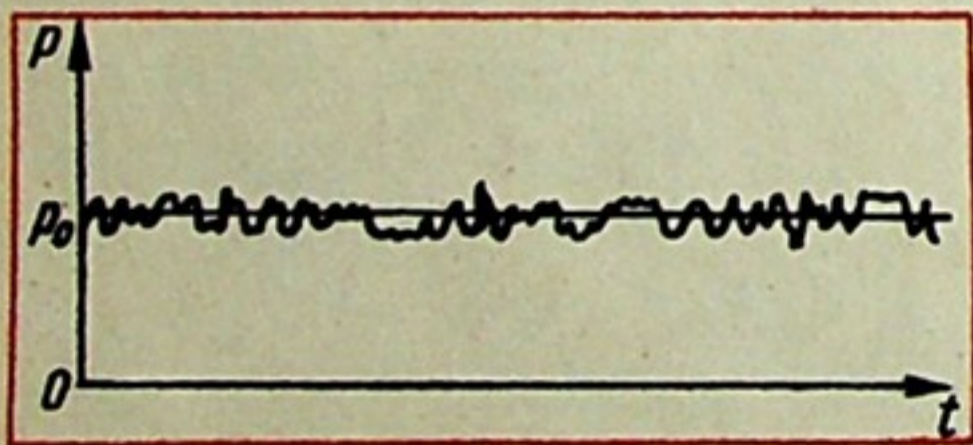
ფიზიკურ მოდელში რეალური სისტემის მხოლოდ იმ თვისებებს იღებენ მხედველობაში, რომელთა გათვალისწინება აუცილებლად საჭიროა ამ სისტემის ქცევის კანონზომიერებათა ასახსნელად.

არც ერთ მოდელს არ შეუძლია ასახოს სისტემის ყველა თვისება. ჩვენ ახლა საკმაოდ ვიწრო ამოცანას გადავწყვეტთ. მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის მიხედვით გამოვთვლით გაუხშობებული აირის წნევას ჭურჭლის კედელზე. ამ ამოცანისათვის იდეალური აირის მოდელი სრულიად დამაკმაყოფილებელია. მას მივყავართ შედეგებამდე, რომლებიც ცდით დასტურდება. რეალური გაუხშობებული აირი იდეალური აირის მსგავსად იქცევა.

აირის წნევა მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის მიხედვით. ვთქვათ, აირი მოთავსებულია დახშულ ჭურჭელში. მანომეტრი აჩვენებს აირის  $p_0$  წნევას<sup>1</sup>. როგორ წარმოიქმნება ეს წნევა? აირის თითოეული მოლეკულა კედელზე დაჯახებისას რაღაც ძალით მოქმედებს მასზე დროის მცირე შუალედში. მოლეკულების უწყესრიგო დარტყმის შედეგად კედლის ფართობის ერთეულზე მოქმედი ძალა, ე. ი. წნევა, სწრაფად იცვლება დროის მიხედვით დაახლოებით ისე, როგორც მე-15 სურათზეა ნაჩვენები. მაგრამ ცალკეული მოლეკულების დარტყმით გამოწვეული შემოქმედება იმდენად სუსტია, რომ მისი რეგისტრაცია მანომეტრით შეუძლებელია. მანომეტრი აღნიშნავს დროის მიხედვით საშუალო ძალას, რომელიც მოქმედებს მისი მგრძობიარე ელემენტის — მემბრანის ფართობის თითოეულ ერთეულზე.

მიუხედავად წნევის მცირე ცვლილებისა, წნევის საშუალო მნიშვნელობა  $p_0$  პრაქტიკულად სრულიად განსაზღვრული სიდიდეა, რადგან დარტყმა კედელზე უამრავია, მოლეკულების მასა კი — ძალიან მცირე.

აირის წნევა მით უფრო დიდი იქნება, რაც უფრო მეტი მოლეკულა დაეჯახება კედელს დროის რაღაც შუალედში და რაც მეტი იქნება კედელთან დაჯახებულ მოლეკულათა სიჩქარე.



სურ. 15.

ის რაღაც შუალედში და რაც მეტი იქნება კედელთან დაჯახებულ მოლეკულათა სიჩქარე.

<sup>1</sup> გავიხსენოთ: წნევა არის ზედაპირის მართობულად მოქმედი ძალის მოდულის შეფარდება ზედაპირის ფართობთან:  $p = \frac{F}{S}$ . წნევა გამოისახება პასკალებით ან ვერცხლისწყლის სვეტის მილიმეტრებით:  $13a = 1 \cdot 6 / m^2 = 7,5 \cdot 10^{-3} m m \text{ ვწყ. სვ.}$



აირის წნევა შეიძლება ავხსნათ მარტივი მექანიკური მოლეკულის საშუალებით. ავიღოთ დისკო (ის ასრულებს მანომეტრის მეზბრანის როლს) და დავამაგროთ ღეროზე ისე, რომ მოთავსდეს ვერტიკალურად და შეეძლოს ღეროსთან ერთად შემობრუნება ვერტიკალური ღერძის გარშემო (სურ. 16). დახრილი ღერის საშუალებით დისკოზე მივმართოთ წვრილი საფანტის ნაკადი (საფანტი ასრულებს მოლეკულების როლს). საფანტის მარცვლების მრავალი დარტყმის შედეგად დისკოზე იმოქმედებს რაღაც საშუალო ძალა, რომელიც იწვევს ღეროს შემობრუნებას და (ფ) დრეკადი ფირფიტის გაღუნვას. საფანტის ცალკეულ დარტყმათა ეფექტი კი შეუმჩნეველია.

**მოლეკულების სითბური მოძრაობა.** თავიდანვე უარი ვთქვათ იმაზე, რომ დავაკვირდებით აირის შემადგენელი თითოეული მოლეკულის მოძრაობას. მათი რაოდენობა ძალიან დიდია და მოძრაობა — ძალიან რთული. არც არის საჭირო იმის ცოდნა, თუ როგორ მოძრაობს თითოეული მოლეკულა. ჩვენ უნდა გავარკვიოთ, თუ რა შედეგს იძლევა ყველა მოლეკულის ერთობლივი მოძრაობა.

აირის მოლეკულათა ერთობლივი მოძრაობის ხასიათი კი ცნობილია ცდიდან (იხ. § 3). მოლეკულები მონაწილეობენ ქაოსურ (სითბურ) მოძრაობაში. ეს ნიშნავს, რომ ნებისმიერი მოლეკულის სიჩქარე შეიძლება იყოს როგორც ძალიან დიდი, ისე ძალიან მცირე, მოლეკულების მოძრაობის მიმართულება კი განუწყვეტლივ იცვლება მათი ურთიერთდაჯახებისას.

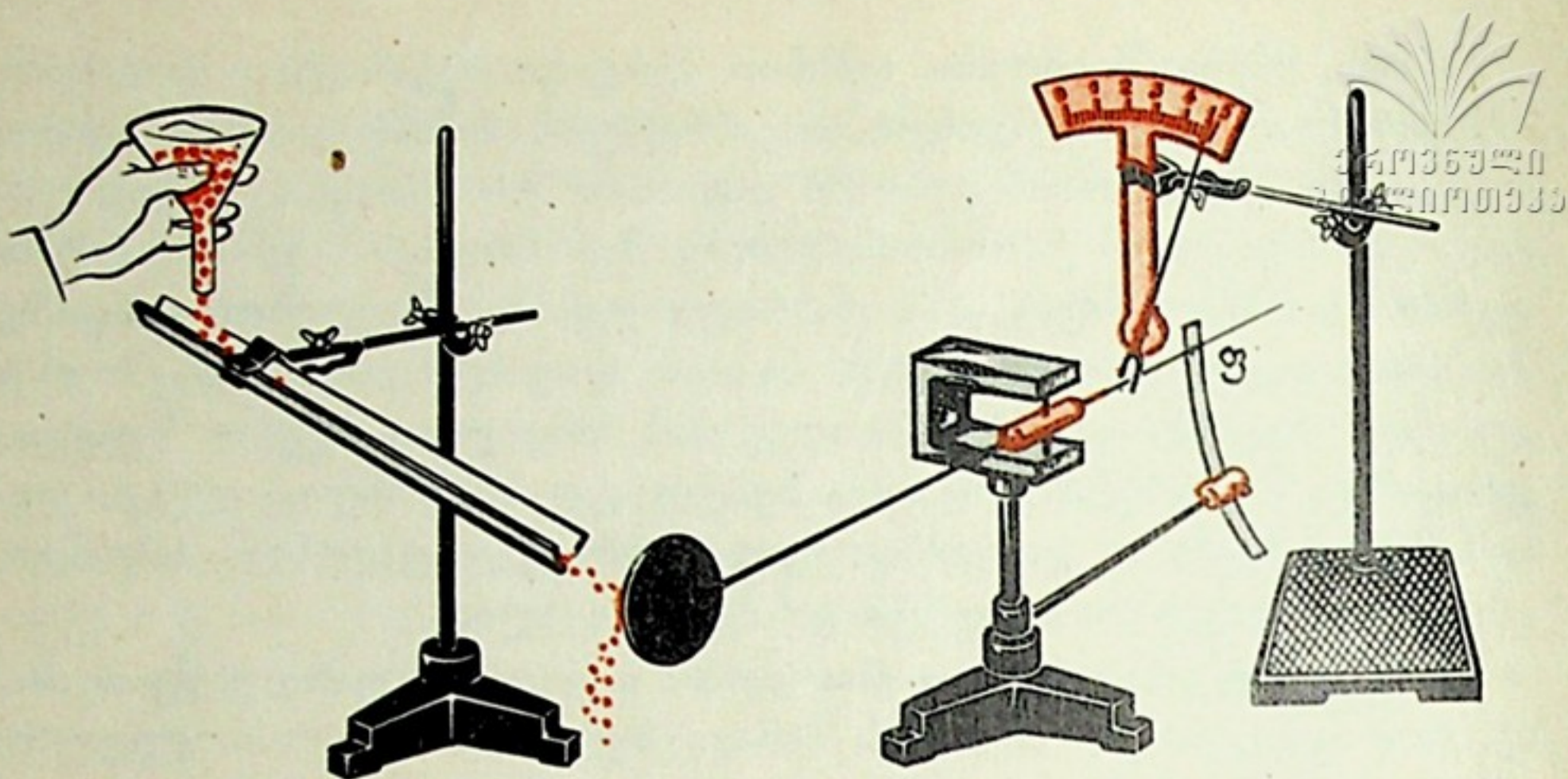
ცალკეულ მოლეკულათა სიჩქარე შეიძლება ნებისმიერი იყოს, მაგრამ მათი სიჩქარის მოდულის საშუალო მნიშვნელობა სრულიად განსაზღვრული სიდიდეა. ზუსტად ასევე, კლასში სხვადასხვა სიმაღლის მოსწავლეებია, მაგრამ მათი სიმაღლის საშუალო მნიშვნელობა სავსებით განსაზღვრული სიდიდეა. ეს სიდიდე რომ ვიპოვოთ, მოსწავლეთა სიმაღლეები უნდა შევკრიბოთ და მიღებული ჯამი გავყოთ მათ რაოდენობაზე.

**სიჩქარის მოდულის კვადრატის საშუალო მნიშვნელობა.** შემდეგში დაგვჭირდება არა თვით სიჩქარის, არამედ სიჩქარის კვადრატის საშუალო მნიშვნელობა. ამ სიდიდეზეა დამოკიდებული მოლეკულების საშუალო კინეტიკური ენერგია. საშუალო კინეტიკურ ენერგიას კი, როგორც მალე დავრწმუნდებით, ძალიან დიდი მნიშვნელობა აქვს მთელ მოლეკულურ-კინეტიკურ თეორიაში.

აღვნიშნოთ ცალკეული მოლეკულების სიჩქარეა მოდულები:  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_N$ . სიჩქარის კვადრატის საშუალო მნიშვნელობა განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_N^2}{N}, \quad (1.8)$$





სურ. 16.

სადაც  $N$  მოლეკულების რიცხვია.

მაგრამ სიჩქარის ვექტორის მოდულის კვადრატი ტოლია კოორდინატთა  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  ღერძებზე სიჩქარის გეგმილთა კვადრატების ჯამისა<sup>1</sup>:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2. \quad (1.9)$$

$\overline{v_x^2}$ ,  $\overline{v_y^2}$  და  $\overline{v_z^2}$  საშუალო მნიშვნელობანი შეიძლება განვსაზღვროთ (1.8)-ის ანალოგიური ფორმულებით.  $\overline{v^2}$  საშუალო მნიშვნელობასა და გეგმილთა კვადრატების საშუალო მნიშვნელობათა შორის ისეთივე თანაფარდობაა, როგორიც (1.9) ფორმულითაა გამოსახული:

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}. \quad (1.10)$$

მართლაც, თითოეული მოლეკულისათვის მართებულია (1.9) გამოსახულება. თუ შევკრებთ ცალკეული მოლეკულებისათვის ამ გამოსახულებებს და მიღებული განტოლების ორივე მხარეს გავყოფთ მოლეკულათა  $N$  რიცხვზე, მივიღებთ (1.10) ფორმულას. რადგან მოლეკულათა მოძრაობის ქაოსურობის გამო  $Ox$ ,  $Oy$  და  $Oz$  მიმართულებათაგან არც ერთს უპირატესობა არა აქვს, სიჩქარის გეგმილთა კვადრატების საშუალო მნიშვნელობანი ერთმანეთის ტოლია:

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}. \quad (1.11)$$

<sup>1</sup> მექანიკის კურსიდან ცნობილია, რომ სიბრტყეზე მოძრაობისას  $v^2 = v_x^2 + v_y^2$ . (1.9) ფორმულა ამ გამოსახულების განზოგადებაა სივრცეში მოძრაობის შემთხვევისათვის.



გავითვალისწინოთ (1.11) დამოკიდებულება და (1.10) ფორმულაში  $\overline{v_y^2}$  და  $\overline{v_z^2}$ -ის ნაცვლად ჩავსვათ  $\overline{v_x^2}$ , მაშინ სიჩქარის გეგმილის კვადრატის საშუალო იქნება:

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}, \quad (1.12)$$

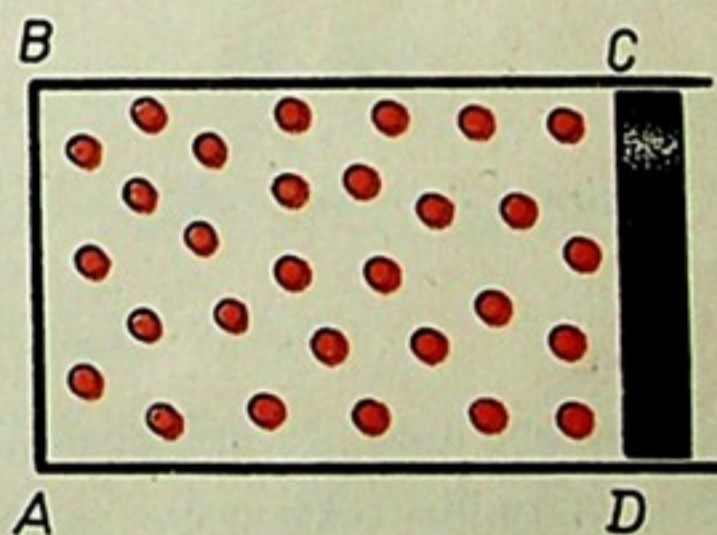
ე. ი. სიჩქარის გეგმილის კვადრატის საშუალო თვით სიჩქარის კვადრატის საშუალოს  $1/3$ -ის ტოლია.  $1/3$  მამრავლი მიიღება იმის გამო, რომ სივრცე სამგანზომილებიანია და ყველა ვექტორს სამი გეგმილი აქვს.

## 7. აირის მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლება

ვთქვათ, აირი მოთავსებულია  $ABCD$  მართკუთხა კვების მქონე ჭურჭელში, რომლის ერთი გვერდი არის  $CD$  დგუში; დგუშს შეუძლია ხახუნის გარეშე გადაადგილება (სურ. 17). აირისა და ჭურჭლის ტემპერატურა ერთნაირია.

გამოვთვალოთ აირის წნევა  $S$  ფართობის  $CD$  დგუშზე. დგუშის ზედაპირი  $Ox$  ღერძის მართობულია. აირის წნევა წარმოიქმნება დგუშზე მოლეკულათა დაჯახების გამო. დგუში რომ ჭურჭლიდან არ ამოვარდეს, საჭიროა გარედან ვიმოქმედოთ რაღაც  $\overline{F}$  ძალით.

აირის წნევის ფორმულის გამოყვანა არც ისე რთულია, მაგრამ პროცესი საკმაოდ გრძელია. დავყოთ იგი ოთხ ეტაპად. ჯერ გამოვთვალოთ იმ ძალის იმპულსი, რომლითაც ერთი მოლეკულა მოქმედებს დგუშზე მასთან შეხლისას. შემდეგ აღვრიცხოთ დგუშზე მოლეკულების დაჯახებანი  $\Delta t$  დროის შუალედში. გადავამრავლოთ ეს სიდიდეები ერთმანეთზე და გავითვალისწინოთ მოლეკულათა სიჩქარის კვადრატის საშუალო მნიშვნელობა; მოვნახავთ იმ საშუალო ძალის იმპულსს, რომლითაც ყველა მოლეკულა მოქმედებს დგუშზე.



სურ. 17.

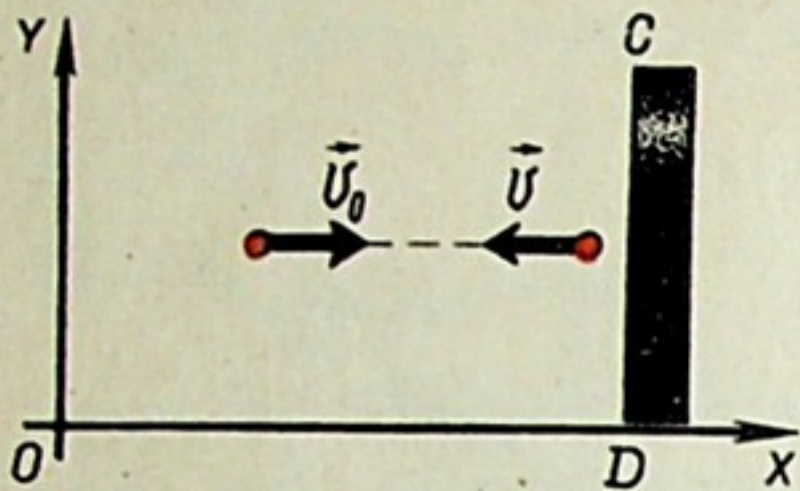
მიღებულ სიდიდეს გავყოფთ  $\Delta t$  დროის შუალედზე და დგუშის ფართობზე. მივიღებთ აირის წნევის გამოსახულებას.

**მოლეკულის დაჯახება დგუშზე.** ჯერ განვიხილოთ შემთხვევა, როცა მოლეკულის  $\overline{v_0}$  სიჩქარე დგუშზე დაჯახებამდე (სურ. 18) მისი ზედაპირის მართობულია. ჩვენს მოდელში მოლეკულები მყარი ბირთვე-

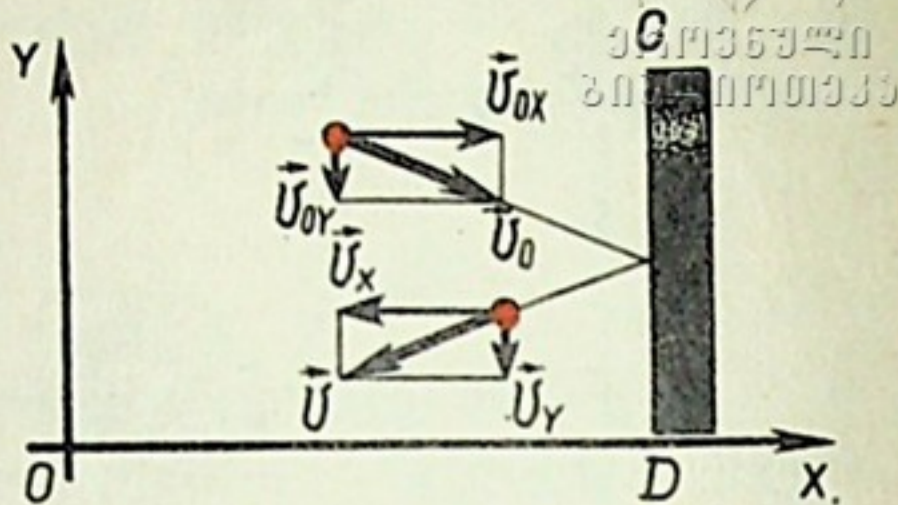
$$p = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2}$$

$$p = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2} \quad 23$$





სურ. 18.

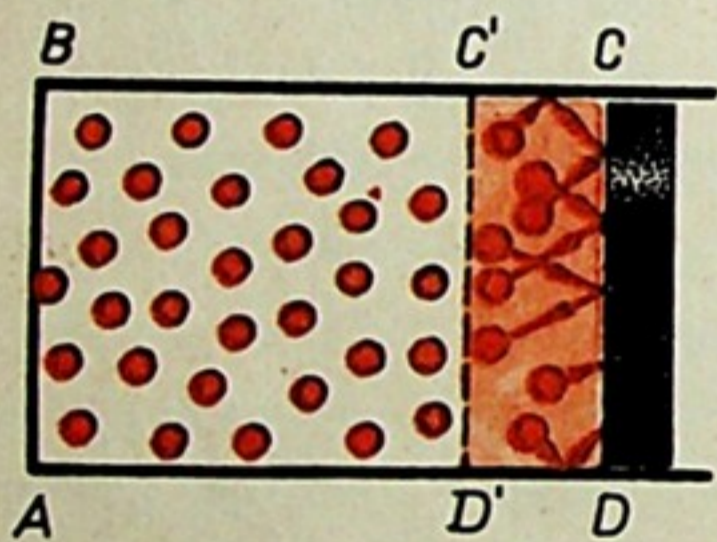


სურ. 19.

ბია. კედელზე დაჯახებისას ისინი უკუიგდებიან კინეტიკური ენერგიის შეუცვლელად. მსგავს დაჯახებებს აბსოლუტურად დრეკადი ეწოდება. ამ დროს სიჩქარის მოდული იგივე რჩება, მოძრაობის მიმართულება კი საპირისპირო ხდება:  $v = -v_0$ . მოლეკულის იმპულსის ცვლილება ტოლია:

$$m_0 \vec{v} - m_0 \vec{v}_0 = m_0 \vec{v} - (-m_0 \vec{v}) = 2m_0 \vec{v}.$$

თუ მოლეკულის სიჩქარე დგუშისადმი ნებისმიერი კუთხით არის მიმართული (სურ. 19), მაშინ დგუშზე მოლეკულის დაჯახებისას დგუშის ზედაპირის მართობ მიმართულებაზე სიჩქარის  $v_{0x}$  გეგმილი ნიშანს იცვლის:  $v_{0x} = -v_{0x}$ , ხოლო დგუშის ზედაპირის პარალელურ მიმართულებებზე სიჩქარის  $v_{0y}$  და  $v_{0z}$  გეგმილები უცვლელი რჩება:  $v_y = v_{0y}$ ,  $v_z = v_{0z}$ , იგივე ხდება გლუვ კედელზე ბურთის დაჯახებისას, თუ დაჯახებას აბსოლუტურად დრეკადად მივიჩნევთ.



სურ. 20.

მოლეკულის იმპულსის გეგმილის ცვლილება  $Ox$  ღერძზე ტოლია:

$$m_0 v_x - m_0 v_{0x} = m_0 v_x - (-m_0 v_x) = 2m_0 v_x. \quad (1.13)$$

იმპულსის მუდმივობის კანონის თანახმად მოლეკულისა და დგუშის ჯამური იმპულსი უცვლელი რჩება. ეს ნიშნავს, რომ დგუშის იმპულსის ცვლილების მოდული ტოლია მოლეკულის იმპულსის ცვლილების მოდულისა. სხვანაირად, დგუშზე მოლეკულის დაჯახებისას დგუშს გადაეცემა იმპულსი, რომლის მოდულია  $2m_0 |v_x|$ .

ნიუტონის მეორე კანონის თანახმად, სხეულის იმპულსის ცვლილება ტოლია ძალის იმპულსისა — ძალისა და მისი ქმედების დროის ნამრავლისა. ამიტომ მოდული იმ ძალის იმპულსისა, რომლითაც მოლეკულა მოქმედებს დგუშზე დაჯახების დროს უშუალოდ ტოლია  $2m_0 |v_x|$ -ის.





**დგუშზე მოლეკულების დაჯახებათა რიცხვი.** იმისათვის, რომ გამოვთვალოთ ძალის იმპულსი, რომლითაც ყველა მოლეკულა მოქმედებს დგუშზე, საჭიროა გამოვთვალოთ დგუშზე მოლეკულების დაჯახებათა რიცხვი დროის რაღაც  $\Delta t$  შუალედში, რომელიც გაცილებით მეტია ერთი მოლეკულის დაჯახების ხანგრძლივობაზე.

$\Delta t$  დროში დგუშამდე მიაღწევს მხოლოდ ის მოლეკულები, რომელთა დაშორება დგუშიდან არ აღემატება  $CC' = |v_x| \Delta t$  მანძილს (სურ. 20). უფრო მეტად დაშორებული მოლეკულები დგუშამდე მისვლას ვერ მოასწრებენ. მხედველობაში უნდა მივიღოთ ისიც, რომ  $CD$  კედელს აღწევს მხოლოდ ის მოლეკულები, რომელთა  $v_x > 0$ , ე. ი. რომლებიც მოძრაობენ მარცხნიდან მარჯვნივ.

სიჩქარის  $v_y$  და  $v_z$  გეგმილთა მნიშვნელობები გავლენას არ ახდენს  $CD$  დგუშამდე მოლეკულების მიღწევაზე. თუ მოლეკულა დრეკადად ეჯახება  $BC$  ან  $AD$  კედელს (სურ. 20), სიჩქარის  $v_x$  გეგმილი არ შეიცვლება და მოლეკულა  $Ox$  ღერძის გასწვრივ მაინც  $|v_x| \Delta t$  მონაკვეთით გადაინაცვლებს.

გამოყოფილი  $CC'D'D$  მოცულობა  $|v_x| \Delta t \cdot S$ -ის ტოლია. თუ მოლეკულების კონცენტრაცია (მოლეკულების რიცხვი მოცულობის ერთეულში) არის  $n = \left(\frac{N}{V}\right)$ , მაშინ მოლეკულების რიცხვი გამოყოფილ მოცულობაში იქნება  $n|v_x| \Delta t \cdot S$ .

მოძრაობის ქაოსურობის გამო ამ მოცულობაში საშუალოდ მოლეკულების მხოლოდ ნახევარს აქვს სიჩქარის გეგმილი დადებითი ( $v_x > 0$ ) და ეს ნახევარი მარცხნიდან მარჯვნივ მოძრაობს. მოლეკულათა მეორე ნახევარი ( $v_x < 0$ ) კი საპირისპირო მიმართულებით მოძრაობს.

მაშასადამე,  $\Delta t$  დროში დგუშზე მოლეკულების დაჯახებათა  $z$  რიცხვი, რომელიც გამოყოფილ მოცულობაში არსებულ მოლეკულათა რაოდენობის ნახევრის ტოლია, ასე გამოისახება:

$$z = \frac{n}{2} |v_x| \Delta t \cdot S. \tag{1. 14}$$

**დგუშზე ყველა მოლეკულის მოქმედებით გამოწვეული საშუალო ძალის იმპულსი.** დაჯახებისას თითოეული მოლეკულა დგუშის იმპულსს  $2m_0 |v_x|$  სიდიდით ცვლის.  $\Delta t$  დროის შუალედში  $z$  მოლეკულა დგუშის იმპულსს ცვლის  $2m_0 |v_x| z$  სიდიდით. ნიუტონის მეორე კანონის თანახმად, დგუშზე მოქმედი ძალის  $F \Delta t$  იმპულსის მოდული ტოლია დგუშის იმპულსის ცვლილების მოდულისა:

$$F \Delta t = z 2m_0 |v_x| = n m_0 S v_x^2 \Delta t. \tag{1. 15}$$



ახლა გავითვალისწინოთ შემდეგი: მსჯელობისას ვგულისხმობდით, რომ ყველა მოლეკულის სიჩქარე ერთნაირია. სინამდვილეში მოლეკულათა სიჩქარე სხვადასხვაა და დგუშზე შეჯახებისას თითოეულმა თანაგან თავისი წვლილი შეაქვს წნევაში. გავითვალისწინოთ ეს შემდეგნაირად:  $v_x^2$ -ის ნაცვლად ავიღოთ ყველა მოლეკულის სიჩქარის გეგმილის კვადრატის  $\overline{v_x^2}$  საშუალო მნიშვნელობა.

ძალის იმპულსის მოდულის საშუალო მნიშვნელობა გამოისახება ფორმულით:

$$\overline{F} \Delta t = m_0 n S \overline{v_x^2} \Delta t.$$

რადგან

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2} \quad (\text{იხ. 1.12}), \text{ ამიტომ}$$

$$\overline{F} \Delta t = \frac{1}{3} m_0 n S \overline{v^2} \Delta t. \quad (1.16)$$

აირის წნევა (თუ (1.16) განტოლების ორივე მხარეს გავყოფთ  $S \Delta t$ -ზე, მივიღებთ აირის წნევას:

$$\left[ p = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2} \right] \quad (1.17)$$

ეს არის მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლება.

(1.17) ფორმულა მაკროსკოპულ სიდიდეს — წნევას, რომელიც მანომეტრით იზომება, აკავშირებს მოლეკულების დამახასიათებელ მიკროსკოპულ სიდიდეებთან და თითქოსდა წარმოადგენს ხიდს ორ სამყაროს — მაკროსკოპულსა და მიკროსკოპულს შორის.

თუ მოლეკულის გადატანითი მოძრაობის საშუალო კინეტიკურ ენერგიას აღვნიშნავთ  $\overline{E}$ -თი,  $\overline{E} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$ , და (1.17) განტოლება შეიძლება შემდეგი სახით დავწეროთ:

$$p = \frac{2}{3} n \overline{E}. \quad (1.18)$$

იდეალური აირის წნევა პროპორციულია მოლეკულების კონცენტრაციის ნამრავლისა მოლეკულის გადატანითი მოძრაობის საშუალო კინეტიკურ ენერგიაზე.)

მომდევნო თავში დამტკიცდება, რომ მოლეკულების საშუალო კინეტიკური ენერგია აირის ტემპერატურით განისაზღვრება.)

1. რას ეწოდება იდეალური აირი მოლეკულურ-კინეტიკურ თეორიაში?
2. როგორ ხსნის მოლეკულურ-კინეტიკური თეორია აირის წნევას? 3. რას უდრის მოლეკულის სიჩქარის გეგმილის საშუალო მნიშვნელობა  $0x$  ღერძზე?
4. განმარტეთ მოლეკულათა სიჩქარის კვადრატის საშუალო მნიშვნელობა.
5. რას უდრის მოლეკულის იმპულსის ცვლილება კედელზე დაჯახებისას?



6. რაზეა დამოკიდებული  $S$  ფართობის დგუშთან  $\Delta t$  დროში მოლეკულების დაჯახებათა რიცხვი? 7. დაწერეთ მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლება.

### ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები

პირველი თავის ამოცანათა უმეტესი ნაწილის ამოხსნისათვის უნდა ვიცოდეთ ნივთიერებათა მოლური მასის განსაზღვრა. ამისათვის საჭიროა მენდელეევის ცხრილიდან ცნობილი ფარდობითი ატომური მასით განვსაზღვროთ ფარდობითი მოლეკულური მასა, შემდეგ კი — მოლური მასა  $M = 10^{-3} M_r$  კგ/მოლი ფორმულით, სადაც  $M$  მოლური მასაა,  $M_r$  კი — ფარდობითი მოლეკულური მასა.

ბევრ ამოცანაში საჭიროა სხეულის ცნობილი მასით განისაზღვროს ნივთიერების რაოდენობა ან მოლეკულების (ატომების) რიცხვი მასში. ამისათვის გამოვიყენებთ  $\nu = \frac{m}{M}$  და  $N = \frac{m}{M} N_A$  ფორმულებს. ცალ-

კეული მოლეკულების მასა განისაზღვრება  $m_0 = \frac{M}{N_A}$  ფორმულით. ზო-

გიერთ ამოცანაში ნივთიერების მასა უნდა გამოვსახოთ მისი  $\rho$  სიმკვრივითა და  $V$  მოცულობით.

ამოცანების ამოხსნისას ზემოაღნიშნულთან ერთად უნდა გვახსოვდეს მე-2 პარაგრაფის ყველა ფორმულა. რიგ ამოცანებში ვიყენებთ მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითად განტოლებას (1.17) ან (1.18) სახით.

#### 1. განვსაზღვროთ წყლის მოლური მასა.

ამოხსნა. წყალბადის ფარდობითი ატომური მასა ტოლია 1,00797-სა, ჟანგბადისა კი — 15,9994-ის. წყლის ქიმიური ფორმულაა  $H_2O$ . ამიტომ წყლის ფარდობითი მოლეკულური მასა ტოლია:

$$M_r = 2 \cdot 1,00797 + 15,9994 = 18,01534 \approx 18.$$

წყლის მოლური მასა  $M \approx 10^{-3} \cdot 18$  კგ/მოლი  $\approx 0,018$  კგ/მოლი.

#### 2. განვსაზღვროთ ნივთიერების რაოდენობა და მოლეკულების რიცხვი, რომელსაც შეიცავს 1 კგ ნახშირორჟანგი.

ამოხსნა. რადგან ნახშირორჟანგის მოლური მასა  $M = 0,044$  კგ/მოლი, ამიტომ ნივთიერების რაოდენობა  $\nu = \frac{m}{M} = \frac{1}{0,044}$  მოლი  $\approx 23$  მოლი. მოლეკულების რიცხვი

$$N = \frac{m}{M} N_A = \nu N_A = 23 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \approx 1,4 \cdot 10^{25}.$$



8.  $V=0,1$  მ<sup>3</sup> მოცულობის ჭურჭელში მოთავსებულია აირის  $N=2,7 \cdot 10^{27}$  მოლეკულა. წნევა ჭურჭლის კედელზე  $p=10^5$  პა. რას უდრის მოლეკულების კინეტიკური ენერჯია  $\bar{E}$ ?  
 ნიტი მოძრაობის საშუალო კინეტიკური ენერჯია  $\bar{E}$ ?

ამოხსნა: აირთა მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლების (1.18) თანახმად,  $p = \frac{2}{3} n \bar{E}$ . მოლეკულების კონცენტრაცია.

$$n = \frac{N}{V} = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ მ}^{-3}.$$

აქედან

$$\bar{E} = \frac{3}{2} \frac{p}{n} = \frac{3 \cdot 10^5 \text{ ნ/მ}^2}{2 \cdot 2,7 \cdot 10^{25} \text{ მ}^{-3}} \approx 5,6 \cdot 10^{-21} \text{ ჯ.}$$

4. ელექტრონათურას ბალონში აირის სიმკვრივე  $\rho = 0,9$  კგ/მ<sup>3</sup>. ნათურას ვარვარისას მასში წნევა გაიზარდა  $p_1 = 8 \cdot 10^4$  პა-დან,  $p_2 = 1,1 \cdot 10^5$  პა-მდე, რამდენით გაიზარდა ამ დროს აირის მოლეკულების საშუალო სიჩქარე?

ამოხსნა. ერთი მოლეკულის  $m_0$  მასის ნამრავლი მოლეკულების  $n$  კონცენტრაციაზე (მოლეკულების რიცხვი მოცულობის ერთეულში) ტოლია ერთეულ მოცულობაში მოთავსებული მოლეკულების მასისა, ე. ი. აირის სიმკვრივისა  $\rho = m_0 n$ . მაშასადამე, მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლება (1.17) შეიძლება დავწეროთ

შემდეგი სახით:  $p = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2$ . ამიტომ

$$\bar{v}_1 = \sqrt{\frac{3p_1}{\rho}}, \quad \bar{v}_2 = \sqrt{\frac{3p_2}{\rho}}$$

საიდანაც

$$\bar{v}_2 - \bar{v}_1 = \sqrt{\frac{3}{\rho}} (\sqrt{p_2} - \sqrt{p_1});$$

$$\bar{v}_2 - \bar{v}_1 \approx 90 \text{ მ/წმ.}$$

### სავარჯიშო 1

1. რა ფართობზე განიღვრება  $0,02$  სმ<sup>3</sup> მოცულობის ზეთუნის ზეთის წვეთი წყლის ზედაპირზე?
2. რას უდრის წყალბადისა და ჰელიუმის მოლური მასები.
3. რამდენჯერ აღემატება  $12$  კგ ნახშირბადის ატომთა რიცხვი  $16$  კგ ჟანგბადის მოლეკულათა რიცხვს?
4. რა ნივთიერების რაოდენობას (მოლეზით) შეიცავს  $1$  გ წყალი?





5. რამდენი მოლეკულაა 10 გ ჟანგბადში?
6. აზოტის მოლური მასაა, 0,028 კგ/მოლი. რას უდრის აზოტის მოლეკულის მასა?
7. განვსაზღვროთ ატომთა რიცხვი 1 მ<sup>3</sup> სპილენძში. სპილენძის მოლური მასა  $M=0,0635$  კგ/მოლი და სიმკვრივე  $\rho=9000$  კგ/მ<sup>3</sup>.
8. ალმასის სიმკვრივეა 3500 კგ/მ<sup>3</sup>. რა მოცულობას დაიკავებს ამ ნივთიერების 10<sup>22</sup> ატომი?
9. როგორ შეიცვლება აირის წნევა, თუ მისი მოლეკულების კონცენტრაცია 3-ჯერ გაიზარდება. მოლეკულების საშუალო სიჩქარე კი 3-ჯერ შემცირდება?
10. რას უდრის აირის წნევა ჰურბელში, თუ მისი მოლეკულების სიჩქარის კვადრატის საშუალო  $\overline{v^2}=10^6$  მ<sup>2</sup>/წმ<sup>2</sup>, მოლეკულების კონცენტრაცია  $n=3 \cdot 10^{25}$  მ<sup>-3</sup>, თითოეული მოლეკულის მასა  $m_0=5 \cdot 10^{-26}$  კგ?
11. 1,2 ლ მოცულობის კოლბაში ჰელიუმის 3 · 10<sup>22</sup> მოლეკულაა, რას უდრის მოლეკულის საშუალო კინეტიკური ენერგია? კოლბაში აირის წნევაა 10<sup>5</sup> პა.
12. გამოვთვალოთ აირის მოლეკულების სიჩქარის კვადრატის საშუალო, თუ მისი მასა  $m=6$  კგ, მოცულობა  $V=4,9$  მ<sup>3</sup> და წნევა  $p=200$  კპა.

### მოკლე დასკვნა

მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი დებულების თანახმად, ყველა სხეული მოლეკულებისაგან (ან ატომებისაგან) შედგება; მოლეკულებს შორის მცირე მანძილზე, რომელიც ნაკლებია მოლეკულების საკუთარ ზომებზე, მოქმედებს განზიდვის ძალები, დიდი მანძილებზე კი მოქმედებს მიზიდვის ძალები; მოლეკულები მონაწილეობენ ქაოსურ სითბურ მოძრაობაში.

მოლეკულების მასა მცირეა, რაოდენობა კი მაკროსკოპულ სხეულებში — ძალიან დიდი. ამიტომ მოლეკულების მასას და მათ რაოდენობას მაკროსკოპულ სხეულებში ფარდობითი ერთეულებით გამოსახავენ.

ფარდობითი მოლეკულური (ან ატომური) მასა ეწოდება მოლეკულის (ან ატომის) მასის შეფარდებას ნახშირბადის ატომის მასის 1/12-თან (1.2).

ნივთიერების რაოდენობა ტოლია სხეულის შემადგენელ მოლეკულათა რიცხვის შეფარდებისა ავოგადროს მუდმივასთან.

ნივთიერების რაოდენობას ზომავენ მოლებით. მოლი ნივთიერების რაოდენობაა, რომელიც იმდენ მოლეკულას შეიცავს, რამდენ ატომსაც შეიცავს 0,012 კგ ნახშირბადი.



ნივთიერების ერთ მოლში მოლეკულების (ან ატომების) რაოდენობას ავოგადროს მუდმივა ეწოდება  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{მოლი}}$ .

ერთი მოლი ნივთიერების მასას მოლური მასა ეწოდება (1.4).

აირის მოლეკულებს შორის მანძილი ბევრად მეტია მათ ზომებზე. სითხესა და მყარ სხეულში მოლეკულები (ან ატომები) უშუალო მახლობლობაშია ერთმანეთთან. მყარ სხეულში ატომების (ან მოლეკულების) განლაგება მკაცრად მოწესრიგებულია. ისინი რხევას ასრულებენ წონასწორობის უცვლელი მდებარეობის მახლობლად. სითხეში მოლეკულები განლაგებულია უწესრიგოდ და დროდადრო ხტებიან წონასწორობის ერთი მდებარეობიდან მეორეში. მოლეკულურ-კინეტიკურ თეორიაში იდეალურს უწოდებენ აირს, რომლის მოლეკულათა ურთიერთქმედება უმნიშვნელოა.

მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლების თანახმად, აირის წნევა მოლეკულების კონცენტრაციისა და მოლეკულების გადატანითი მოძრაობის საშუალო კინეტიკური ენერჯის ნამრავლის პროპორციულია:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}, \text{ სადაც } \bar{E} = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}.$$

## II ტ ა ვ ი

### ტემპერატურა. მოლეკულების სითბური მოძრაობის ენერჯია

#### 8. სითბური წონასწორობა. ტემპერატურა

მაკროსკოპული პარამეტრები. აირსა და სხვა მაკროსკოპულ სხეულში მიმდინარე პროცესების აღწერისათვის აუცილებელი არ არის ყოველთვის მოლეკულურ-კინეტიკურ თეორიას მივმართოთ. მაკროსკოპული სხეულის, კერძოდ, აირის ქცევა შეიძლება დახასიათდეს რამდენიმე ფიზიკური სიდიდით, რომლებიც ეხება სხეულის შემადგენელ არა ცალკეულ მოლეკულებს, არამედ ერთად აღებულ ყველა მოლეკულას. ასეთ სიდიდეებს განუკუთვნება  $V$  მოცულობა,  $p$  წნევა,  $t$  ტემპერატურა და სხვ.

მოცემული მასის აირს ყოველთვის უჭირავს რაღაც მოცულობა, აქვს განსაზღვრული წნევა და ტემპერატურა. მოცულობა და წნევა





მექანიკური სიდიდეებია, რომლებიც აირის მდგომარეობას აღწერს ტემპერატურა კი მექანიკაში არ განიხილება, რადგან ის ახასიათებს სხეულის შინაგან მდგომარეობას.

ნებისმიერ მაკროსკოპულ სხეულს ან მაკროსკოპულ სხეულთა ჯგუფს თერმოდინამიკური სისტემა ეწოდება. სიდიდეებს, რომლებიც ახასიათებს თერმოდინამიკურ სისტემას სხეულთა მოლეკულური აგებულების გაუთვალისწინებლად ( $V, p, t$ ) მაკროსკოპული (ანუ თერმოდინამიკური) პარამეტრები ეწოდება. მაკროსკოპული პარამეტრები არ იფარგლება მოცულობით, წნევითა და ტემპერატურით. მაგალითად, აირთა ნარევის შემთხვევაში საჭიროა ვიცოდეთ ნარევის ცალკეულ კომპონენტთა კონცენტრაცია. აირთა ასეთი ნარევია ატმოსფერული ჰაერი.

**ცივი და ცხელი სხეულები.** სითბურ მოვლენათა მთელ მოძღვრებაში ცენტრალური ადგილი უკავია ტემპერატურის ცნებას. ყველამ კარგად ვიცით, თუ რა განსხვავებაა ცივ და ცხელ სხეულებს შორის. შეხებით ვარკვევთ, თუ რომელი სხეულია უფრო გამთბარი და ვამბობთ, რომ ამ სხეულს აქვს უფრო მაღალი ტემპერატურა. ტემპერატურა ახასიათებს სხეულის მთბარობის ხარისხს (ცივი, თბილი, ცხელი). ტემპერატურის გასაზომად შექმნეს ხელსაწყო, რომელსაც თერმომეტრი ეწოდება, მასში გამოყენებულია სხეულის თვისება შეიცვალოს მოცულობა გათბობისა და გაცივებისას.

**სითბური წონასწორობა.** ადამიანის სხეულის ტემპერატურის გასაზომად საჭიროა სამედიცინო თერმომეტრი გავაჩეროთ ილღიაში 5—8 წუთი, ამ დროს თერმომეტრში ვერცხლისწყალი თბება და მისი დონე მატულობს. ვერცხლისწყლის სვეტის სიმაღლის მიხედვით შეიძლება ტემპერატურის განსაზღვრა. იგივე ხდება ნებისმიერი სხეულის ტემპერატურის რომელიმე თერმომეტრით ზაზომვის დროსაც. რაღაც დროა საჭირო იმისათვის, რომ სხეულისა და თერმომეტრის ტემპერატურა გათანაბრდეს და მათ შორის დამყარდეს სითბური წონასწორობა, ამ დროს ტემპერატურის ცვლილება წყდება.

სითბური წონასწორობა დროის განმავლობაში მყარდება სხვადასხვა ტემპერატურის ნებისმიერ სხეულებს შორის. ჩავაგდოთ წყლიან ჭიქაში ყინულის ნატეხი და მჭიდროდ დავახუროთ თავი. ყინული დაიწყებს დნობას, წყალი კი — გაცივებას. როცა ყინული გადნება. წყალი იწყებს თბობას და როცა მისი ტემპერატურა მიაღწევს გარემომცველი ჰაერის ტემპერატურას, წყლიან ჭიქაში არავითარი ცვლილება აღარ მოხდება



აღნიშნული და მისი მსგავსი მარტივი დაკვირვებებიდან შეიძლება დავასკვნათ, რომ სითბურ მოვლენებს აქვთ მეტად მნიშვნელოვანი საერთო თვისება. ყოველი სხეული, ან მაკროსკოპულ სხეულთა ჯგუფი—თერმოდინამიკური სისტემა—უცვლელი გარეშე პირობების დროს თავის თავად გადადის სითბური წონასწორობის მდგომარეობაში. სითბური ან თერმოდინამიკური წონასწორობა ეწოდება ისეთ მდგომარეობას, რომლის დროსაც ყველა მაკროსკოპული პარამეტრი განუსაზღვრელად დიდხანს რჩება უცვლელი. ეს ნიშნავს, რომ სისტემაში არ იცვლება მოცულობა და წნევა, არ ხდება თბოცვლა, აირების, სითხეებისა და მყარი სხეულების ურთიერთგარდაქმნა და ა. შ. კერძოდ, არ იცვლება ვერცხლისწყლის სვეტის მოცულობა თერმომეტრში. ეს ნიშნავს, რომ სისტემის ტემპერატურა მუდმივი რჩება.

სხეულში მიკროსკოპული პროცესები არ წყდება სითბური წონასწორობის დროსაც კი. იცვლება მოლეკულების მდებარეობა, მათი სიჩქარე დაჯახებისას.

**ტემპერატურა.** თერმოდინამიკური სისტემა შეიძლება სითბური წონასწორობის სხვადასხვა მდგომარეობაში იმყოფებოდეს. თითოეულ ამ მდგომარეობაში ტემპერატურას აქვს მკაცრად განსაზღვრული მნიშვნელობა. სხვა სიდიდეებს სითბური წონასწორობისას შეიძლება ჰქონდეს სხვადასხვა (მაგრამ მუდმივი) მნიშვნელობა. მაგალითად, მყარი ტიხრების არსებობისას სისტემის სხვადასხვა ნაწილის მოცულობა და მათში არსებული წნევა შეიძლება სხვადასხვა იყოს. თუ გარედან ოთახში შევიტანთ ბურთს, რომელშიც შეკუმშული ჰაერია, გარკვეული დროის შემდეგ ჰაერის ტემპერატურა ბურთსა და ოთახში გათანაბრდება. ჰაერის წნევა კი ბურთში მაინც მეტი იქნება, ვიდრე ოთახში.

**ტემპერატურა ახასიათებს მაკროსკოპული სისტემის სითბური წონასწორობის მდგომარეობას: სითბური წონასწორობისას სისტემის ყველა ნაწილში ტემპერატურა ერთნაირია.**

როცა ორ სხეულს ერთნაირი ტემპერატურა აქვს, მათ შორის არ ხდება თბოცვლა, სხეულები სითბური წონასწორობის მდგომარეობაშია. თუ სხეულთა ტემპერატურა სხვადასხვაა, მაშინ მათ შორის სითბური კონტაქტის დამყარებისას მოხდება ენერგიის გაცვლა: მეტი ტემპერატურის სხეული ენერგიას გადასცემს ნაკლები ტემპერატურის სხეულს. სხეულების ტემპერატურათა სხვაობა მიუთითებს მათ შორის თბოცვლის მიმართულებაზე.

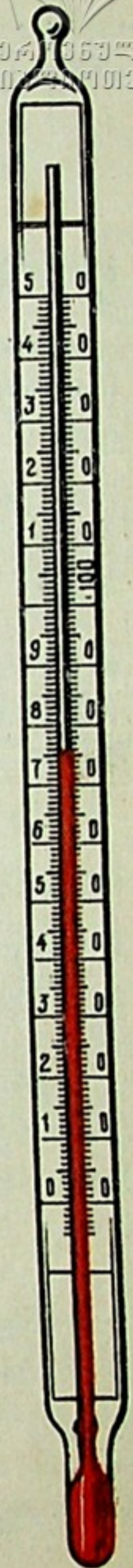


**ტემპერატურის გაზომვა. თერმომეტრი.** ტემპერატურის გასაზომად შეიძლება გამოვიყენოთ ნებისმიერი მაკროსკოპული სიდიდის (მოცულობა, წნევა, ელექტრული წინაღობა) ცვლილება ტემპერატურაზე დამოკიდებულებით.

უფრო ხშირად პრაქტიკაში იყენებენ სითხის (ვერცხლის-წყლის ან სპირტის) მოცულობის ტემპერატურის ცვლილებაზე დამოკიდებულებას. თერმომეტრის დაგრაღურებისას ჩვეულებრივ, ათვლის საწყისად (0) მიიჩნევენ მდნობარე ყინულის ტემპერატურას; მეორე მუდმივ წერტილად (100) კი — წყლის დუდილის ტემპერატურას ნორმალური ატმოსფერული წნევის დროს (ცელსიუსის სკალა). 0 და 100-ს შორის სკალას ყოფენ 100 ტოლ ნაწილად, ე. წ. გრადუსებად (სურ. 21). სითხის სვეტის ერთი დანაყოფით წანაცვლება შეესაბამება ტემპერატურის  $1^{\circ}\text{C}$ -ით შეცვლას. სხვადასხვა სითხე გათბობისას ერთნაირად არ ფართოვდება, ამიტომ აღნიშნული წესით დადგენილი სკალა გარკვეულად დამოკიდებულია სითხის თვისებებზე. 0 და  $100^{\circ}\text{C}$ , რა თქმა უნდა, ყველა თერმომეტრისათვის ერთხვევა, მაგრამ ვთქვათ,  $50^{\circ}\text{C}$  შეიძლება ერთმანეთს არ დაემთხვეს.

რა ნივთიერება უნდა შეირჩეს იმისათვის, რომ ეს დამოკიდებულება გამოირიცხოს? შენიშნულ იქნა, რომ სითხისაგან განსხვავებით, ყველა გაუხშოებელი აირი, წყალბადი, ჰელიუმი, ჟანგბადი — გათბობისას ერთნაირად ფართოვდება და ერთნაირად იცვლის წნევას ტემპერატურის შეცვლისას. ამიტომ რაციონალური ტემპერატურული სკალის დასადგენად ფიზიკაში სარგებლობენ განსაზღვრული რაოდენობის გაუხშოებელი აირის წნევის შეცვლით მუდმივი მოცულობისას ან აირის მოცულობის შეცვლით მუდმივი წნევისას. ასეთ სკალას ხშირად ტემპერატურის იდეალური აირიან სკალას უწოდებენ. მისი შემოღება თავიდან გვაშორებს ცელსიუსის სკალის არსებით ნაკლს — ათვლის საწყისის, ე. ი. ნულოვანი ტემპერატურის ნებისმიერობას. ყინულის დნობის ტემპერატურის ნაცვლად, ათვლის საწყისად ჩვენ ასევე შეგვეძლო აგვედო წყლის დუდილის ტემპერატურა.

ახლა დაწვრილებით განვიხილოთ, თუ როგორ ვისარგებლოთ გაუხშოებელი აირით ტემპერატურის განსაზღვრისათვის.



სურ. 21

1. რა სიდიდეები ახასიათებს მაკროსკოპული სხეულის მდგომარეობას? 2. რა განმასხვავებელი ნიშნებით ხასიათდება სითბური წონასწორობის მდგომარეობა? 3. მოიყვანეთ თქვენს გარემომცველ სხეულებში სითბური წონასწო-

3. ფიზიკა, X კლ.



რობის დამყარების მაგალითები. 4. რა ფიზიკური სიდიდით ხასიათდება სითბური წონასწორობის მდგომარეობა? 5. მაკროსკოპულ სხეულთა ბუნებით სარგებლობენ ტემპერატურის გაზომვისათვის? 6. რა უპირატესობა აქვს გაუხშობულ აირს ტემპერატურის გაზომვისას?

## 9. ტემპერატურის განსაზღვრა

აირის მოლეკულების საშუალო კინეტიკური ენერგია სითბური წონასწორობის დროს. სითბური წონასწორობის მდგომარეობაში ყველა აირს ერთნაირი ტემპერატურა აქვს; იგი დამოკიდებული არ არის გვარობაზე. ტემპერატურის განსაზღვრისათვის გავარკვიოთ, თუ მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის მიხედვით რომელ ფიზიკურ სიდიდეს აქვს ტემპერატურის ეს თვისება.

VII კლასის ფიზიკის კურსიდან ვიცით, რომ, რაც უფრო სწრაფად მოძრაობენ მოლეკულები, მით უფრო მაღალია სხეულის ტემპერატურა. დახშულ ჭურჭელში აირის გათბობისას მისი წნევა მატულობს. მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლების (1.18) მიხედვით კი წნევა  $p$  პროპორციულია მოლეკულების გადატანითი მოძრაობის საშუალო კინეტიკური ენერგიისა:  $p = \frac{2}{3} n \bar{E}$ . სითბური

წონასწორობის დროს, როცა მოცემული მასის აირის წნევა და მოცულობა განსაზღვრული სიდიდისაა, აირის მოლეკულის საშუალო კინეტიკურ ენერგიას, ისევე როგორც ტემპერატურას, მკაცრად განსაზღვრული მნიშვნელობა უნდა ჰქონდეს.

ბუნებრივია ვივარაუდოთ, რომ სითბური წონასწორობის დროს სწორედ ყველა აირის მოლეკულების საშუალო კინეტიკური ენერგიაა ერთნაირი. რა თქმა უნდა, ჯერჯერობით ეს მხოლოდ ვარაუდია, და უნდა შემოწმდეს ექსპერიმენტულად. პრაქტიკულად ამის უშუალოდ შემოწმება შეუძლებელია, რადგან მოლეკულების საშუალო კინეტიკური ენერგიის გაზომვა ძალიან ძნელია. მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლების საფუძველზე კი მისი გამოსახვა შესაძლებელია მაკროსკოპული პარამეტრებით.

რადგან აირის მოლეკულების კონცენტრაცია  $n = \frac{N}{V}$ , (1.18) განტოლებიდან გამომდინარეობს, რომ:

$$p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{E}, \text{ ანუ } \dots$$

$$p \frac{V}{N} = \frac{2}{3} \bar{E}. \quad (2.1)$$



წნევა და მოცულობა უშუალოდ იზომება. მოლეკულების რიცხვს ვა-  
ვიგებთ აირის  $m$  მასის,  $N_A$  ავოგადროს მუდმივასა და  $M$  მოლეკული  
მასის მეშვეობით. (1.7) ფორმულის მიხედვით

$$N = \frac{m}{M} N_A.$$

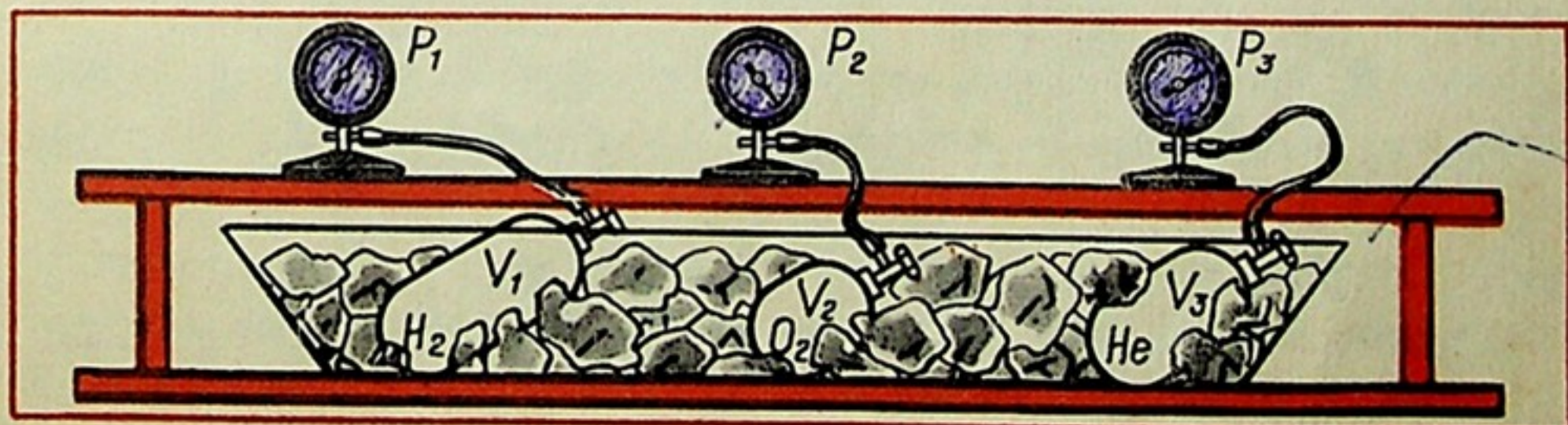
თუ სითბური წონასწორობის მდგომარეობაში ყველა აირის  $\bar{E}$  საშუ-  
ალო კინეტიკური ენერგია მართლაც ერთნაირია, მაშინ  $p \frac{V}{N}$  სიდიდე  
ერთნაირი უნდა იყოს ყველა აირისათვის. ამ ვარაუდის დადასტურება  
ან უარყოფა მხოლოდ ცდით შეიძლება.

აირი სითბური წონასწორობის მდგომარეობაში. ცდა შეიძლება  
ასე ჩავატაროთ. ავიღოთ რამდენიმე ჭურჭელი, რომლებიც ავსებულია  
სხვადასხვა აირით, მაგალითად, წყალბადით, ჰელიუმითა და ჟანგბა-  
დით. ჭურჭლებს აქვს განსაზღვრული მოცულობა; ისინი შეერთებუ-  
ლია მანომეტრებთან, რომლებითაც ვზომავთ წნევას თითოეულ მათ-  
განში. აირთა მასები ცნობილია, რითაც ცნობილი ხდება მოლეკულე-  
ბის რიცხვი.

ჭურჭლები მოვათავსოთ მდნობარე ყინულში და დაველოდოთ  
სითბური წონასწორობის დამყარებასა და აირთა წნევის ცვლილების  
შეწყვეტას (სურ. 22). ამის შემდეგ შეიძლება ვთქვათ, რომ ყველა  
აირის ტემპერატურა ერთნაირია და  $0^{\circ}\text{C}$ -ის ტოლია. წნევა, მოცულო-  
ბა და მოლეკულათა რიცხვი სხვადასხვა იქნება. ვიპოვოთ  $\frac{pV}{N}$  ფარ-  
დობა წყალბადისათვის. მაგალითად, თუ 1 მოლი წყალბადის მოცუ-  
ლობა  $V_{\text{H}_2} = 0,1 \text{ მ}^3$ , მაშინ  $0^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურაზე მისი წნევა  $p_{\text{H}_2} =$   
 $= 2,265 \cdot 10^4 \text{ პა}$ .

აქედან

$$\frac{p_{\text{H}_2} V_{\text{H}_2}}{N_{\text{H}_2}} = \frac{2,265 \cdot 10^4 \cdot 0,1}{6,02 \cdot 10^{23}} \cdot \frac{6 \text{ მ}^3}{\text{გ}^2} = 3,76 \cdot 10^{-21} \text{ ჯ.} \quad (2. 2)$$



სურ. 22.



ასეთივე იქნება წნევისა და მოცულობის რაოდენობის მარადიანობის რაოდენობასთან შეფარდება ყველა აირისათვის მდნობარე ყინულის ტემპერატურაზე. აღვნიშნოთ, ეს შეფარდება  $\Theta_0$ -ით, მაშინ

$$\frac{\rho_{H_2} V_{H_2}}{N_{H_2}} = \frac{\rho_{He} V_{He}}{N_{He}} = \frac{\rho_{O_2} V_{O_2}}{N_{O_2}} = \Theta_0. \quad (2.3)$$

ამრიგად, ჩვენი ვარაუდი სწორი გამოდგა.

ამასთან აღვნიშნავთ, რომ (2.3) თანაფარდობა აბსოლუტურად ზუსტი როდია. როცა წნევა ასობით ატმოსფეროა და აირი ძლიერ მკვრივდება, მაშინ  $\frac{pV}{N}$  ფარდობა უკვე აღარ არის მკაცრად განსაზღვრული — აირის მოცულობისაგან დამოუკიდებელი. იგი სრულდება საკმაოდ გაუხშობელი აირისთვის, როცა აირი იდეალურად შეიძლება ჩავთვალოთ.

თუ ყველა ჭურჭელს მოვათავსებთ მდულარე წყალში ( $100^\circ\text{C}$ ) ნორმალური ატმოსფერული წნევისას, მაშინ  $\frac{pV}{N} = \Theta_{100}$  გაიზრდება, მაგრამ კვლავ ერთნაირი იქნება ყველა აირისათვის. როგორც ცდა გვიჩვენებს,

$$\frac{pV}{N} = \Theta_{100} = 5,14 \cdot 10^{-21} \text{ ჯ.} \quad (2.4)$$

**ტემპერატურის განსაზღვრა.** ზემოთქმულის საფუძველზე შეგვიძლია ვამტკიცოთ, რომ  $\Theta$  იზრდება ტემპერატურის მომატებისას. უფრო მეტიც,  $\Theta$  არაფერზე არაა დამოკიდებული, გარდა ტემპერატურისა. როგორც ვნახეთ, გაუხშობელი აირის  $\Theta$  არაა დამოკიდებული აირის გვარობაზე, არც მის მოცულობასა და წნევაზე, არც ნაწილაკთა რიცხვზე და არც ჭურჭლის ფორმაზე. ამ ცდისეული ფაქტის მიხედვით  $\Theta$  შეიძლება ჩავთვალოთ ტემპერატურის ბუნებრივ ზომად, რომელიც აირის სხვა მაკროსკოპული პარამეტრებით განისაზღვრება. კაცმა რომ თქვას, ისიც შესაძლებელია, რომ თვით  $\Theta$  ჩავთვალოთ ტემპერატურად და იგი გავზომოთ ენერგეტიკული ერთეულებით — ჯოულებით. მაგრამ, ჯერ ერთი, ეს უხერხულია ერთეულის პრაქტიკული გამოყენების თვალსაზრისით. ამ შემთხვევაში  $100^\circ\text{C}$ -ს ძალიან მცირე  $10^{-21}$  ჯ რიგის სიდიდე შეესაბამება: მეორეც, და ეს მთავარია, უკვე დიდი ზანია ტემპერატურა გრადუსებით იზომება.





10. აბსოლუტური ტემპერატურა. ტემპერატურა —  
მოლეკულების საშუალო კინეტიკური ენერგიის ზომა

Θ ტემპერატურის ნაცვლად, რომელიც ენერგეტიკული ერთეულებით იზომება, შემოვიღოთ ტემპერატურა, რომელიც გრადუსობით იზომება.

განსაზღვრის თანახმად Θ სიდიდე, გრადუსებით გაზომილი T ტემპერატურის პროპორციულად ჩავთვალოთ.

$$\Theta = kT, \tag{2.5}$$

სადაც k პროპორციულობის კოეფიციენტია. (2.5) ტოლობით განსაზღვრულ ტემპერატურას აბსოლუტური ტემპერატურა ეწოდება. ამ სახელწოდებას საკმაო საფუძველი აქვს.

(2.5) განსაზღვრის გათვალისწინებით მივიღებთ, რომ:

$$\frac{pV}{N} = kT. \tag{2.6}$$

ამ ფორმულის საფუძველზე დადგინდა ტემპერატურული სკალა, რომელიც არ არის დამოკიდებული ტემპერატურის გასაზომად გამოყენებულ ნივთიერებაზე.

ტემპერატურის აბსოლუტური ნული. (2.6) ფორმულით განსაზღვრული ტემპერატურა, ცხადია, არ შეიძლება იყოს უარყოფითი (ფორმულის მარცხენა ნაწილში ყველა სიდიდე დადებითია). ამიტომ T ტემპერატურის უმცირესი შესაძლო მნიშვნელობაა T=0, როცა ან p წნევა, ან V მოცულობა ნულის ტოლია. ზღვრულ ტემპერატურას, რომლის დროსაც იდეალური აირის წნევა ნული ხდება მუდმივი მოცულობისას, ან იდეალური აირის მოცულობა ნულისკენ მიისწრაფვის მუდმივი წნევისას — ტემპერატურის აბსოლუტური ნული ეწოდება. ეს ყველაზე დაბალი ტემპერატურაა ბუნებაში, ის „უდიდესი ანუ უკანასკნელი ხარისხის სიცივე“, რომლის არსებობაც იწინასწარმეტყველა ლომონოსოვმა.

ტემპერატურის აბსოლუტური სკალა. ინგლისელმა მეცნიერმა უ. კელვინმა შემოიღო ტემპერატურის აბსოლუტური სკალა (მას ტემპერატურის თერმოდინამიკურ სკალსაც უწოდებენ). ამ სკალის მიხედვით ნულოვანი ტემპერატურა შეესაბამება აბსოლუტურ ნულს, ტემპერატურის თითოეული დანაყოფი კი ცელსიუსის სკალის ერთი გრადუსის შესაბამისია.

SI სისტემაში აბსოლუტური ტემპერატურის ერთეულს კელვინი ეწოდება (აღინიშნება K ასოთი).





ლუდვიგ ბოლცმანი (1844—1906)

დიდი ავსტრიელი ფიზიკოსი, მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ერთ-ერთი ფუძემდებელი. ბოლცმანის შრომებში მოლეკულურ-კინეტიკური თეორია პირველად წარმოდგა როგორც ლოგიკურად დალაგებული, თანმიმდევრული ფიზიკური თეორია.

ბოლცმანმა ბევრი გააკეთა მაქსველის ელექტრომაგნიტური ველის თეორიის განვითარებისა და პოპულარიზაციისათვის.

ის მგზნებარედ იცავდა სითბურ მოვლენათა მოლეკულური ახსნის აუცილებლობას. მან თავის თავზე აიღო მოლეკულების არსებობის უარყოფედ მეცნიერებთან ბრძოლის ძირითადი სიმძიმე.

**ბოლცმანის მუდმივა.** განვსაზღვროთ  $K$  კოეფიციენტი (2.6) ფორმულიდან, ისე, რომ ერთი კელვინი ტოლი იყოს ცელსიუსის სკალის გრადუსისა.

ვიცით  $\Theta$ -ს მნიშვნელობა  $0^{\circ}\text{C}$  და  $100^{\circ}\text{C}$ -ის დროს (2.2 და 2.4 ფორმულები). აღვნიშნოთ  $0^{\circ}\text{C}$ -ს შესაბამისი აბსოლუტური ტემპერატურა  $T_1$ -ით,  $100^{\circ}\text{C}$ -სა კი —  $T_2$ -ით. მაშინ

$$\begin{aligned} \Theta_{100} - \Theta_0 &= k(T_2 - T_1)K \text{ ანუ} \\ \Theta_{100} - \Theta_0 &= k \cdot 100 K = (5,14 - 3,76) \cdot 10^{-21} \text{ ჯ.} \end{aligned}$$

აქედან

$$k = \frac{5,14 - 3,76}{100} \cdot 10^{-21} \frac{\text{ჯ}}{K} = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{ჯ}}{K}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{ჯ}}{K} \quad (2.7)$$

ამ კოეფიციენტს ბოლცმანის მუდმივა ეწოდება, დიდი ავსტრიელი ფიზიკოსის, აირის მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ერთ-ერთი ფუძემდებლის ლ. ბოლცმანის პატივსაცემად.

ბოლცმანის მუდმივა ენერგეტიკული ერთეულებით გამოსახულ  $\Theta$  ტემპერატურას აკავშირებს კელვინებით გამოსახულ ტემპერატურასთან. უგი მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი მუდმივაა.

კავშირი აბსოლუტურ და ცელსიუსის სკალებს შორის. ბოლცმანის მუდმივას საშუალებით შეგვიძლია ვიპოვოთ აბსოლუტური ნულის



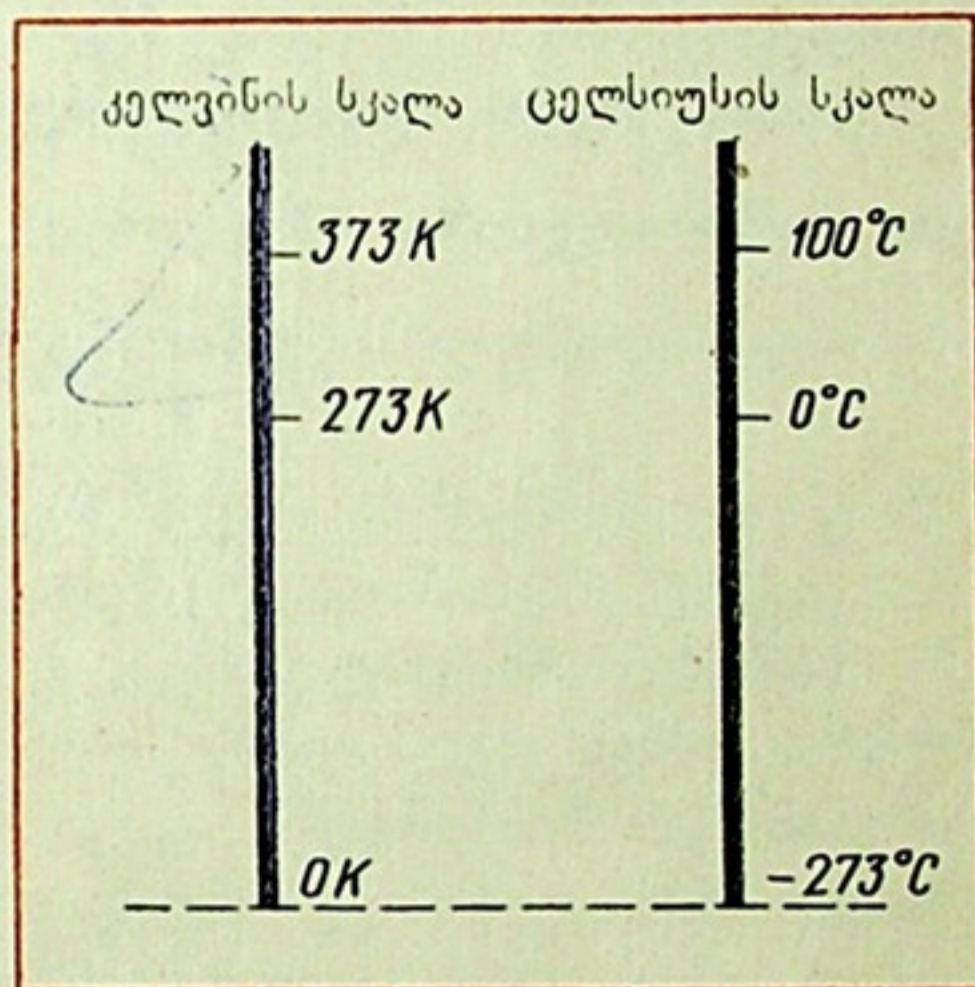
მნიშვნელობა ცელსიუსის სკალაზე. ამისათვის ჯერ ვიპოვოთ  $0^{\circ}\text{C}$ -ის შე-  
საბამისი აბსოლუტური ტემპერატურის მნიშვნელობა.  
რადგან  $0^{\circ}\text{C}$ -ის დროს  $kT_1 = 3,76 \cdot 10^{-21}$  ჯ, ამიტომ

$$T_1 = \frac{3,76 \cdot 10^{-21}}{1,38 \cdot 10^{-23}} \text{K} \approx 273 \text{K}.$$

ერთი კელვინი და ცელსიუსის სკალის ერთი გრადუსი ერთი და იგივეა. ამიტომ აბსოლუტური ტემპერატურის ნებისმიერი  $T$  მნიშვნელობა  $273$  გრადუსით მაღალია შესაბამის  $t$  ცელსიუსის ტემპერატურაზე.

$$T = t + 273. \quad (2.8)$$

მაგრამ ამ ორ სკალაზე ათვ-  
ლილ ტემპერატურათა ცვლილება  
ერთმანეთის ტოლია:  $\Delta T = \Delta t$ . შე-  
დარების მიზნით 23-ე სურათზე  
გამოსახულია აბსოლუტური და  
ცელსიუსის სკალები. აბსოლუ-  
ტურ ნულს შეესაბამება ტემპერა-  
ტურა  $t = -273^{\circ}\text{C}$ <sup>1</sup>.



სურ. 23.

ტემპერატურა—მოლეკულების  
საშუალო კინეტიკური ენერჯიის  
ზომა. მოლეკულურ-კინეტიკური  
თეორიის ძირითადი განტოლები-  
დან (2.1) და ტემპერატურის გან-  
საზღვრიდან (2.6) გამომდინარე-  
ობს მნიშვნელოვანი შედეგი: აბ-  
სოლუტური ტემპერატურა არის

მოლეკულების მოძრაობის საშუალო კინეტიკური ენერჯიის ზომა. და-  
ვამტკიცოთ ეს.  $\frac{pV}{N} = \frac{2}{3} \bar{E}$  და  $\frac{pV}{N} = kT$  განტოლებათა მარცხენა ნა-  
წილები ტოლია. ამიტომ ტოლი უნდა იყოს მათი მარჯვენა ნაწილე-  
ბიც. აქედან გამომდინარეობს, რომ მოლეკულების გადატანითი მოძ-  
რაობის საშუალო კინეტიკურ ენერჯიასა და ტემპერატურას შორის  
ასეთი კავშირია:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT. \quad (2.9)$$

აირის მოლეკულების ქაოსური მოძრაობის საშუალო კინეტიკური  
ენერჯია პროპორციულია აბსოლუტური ტემპერატურისა. რაც უფრო

<sup>1</sup> აბსოლუტური ნულის უფრო ზუსტი მნიშვნელობა:  $-273,15^{\circ}\text{C}$ .



მალალია ტემპერატურა, მით უფრო სწრაფად მოძრაობენ მოლეკულები. ამრიგად, განმტკიცდა ვარაუდი იმის შესახებ, რომ ტემპერატურა დაკავშირებულია მოლეკულების საშუალო სიჩქარესთან.

(2.9) თანაფარდობა ტემპერატურასა და მოლეკულების გადატანითი მოძრაობის საშუალო კინეტიკურ ენერგიას შორის დადგენილია გაუხშობილი აირებისათვის. მაგრამ ის მართებულია ნებისმიერი ნივთიერებისათვის, რომლის ატომების ან მოლეკულების მოძრაობა ნიუტონის მექანიკის კანონებს ემორჩილება. ის სწორია სითხისა და მყარი სხეულისათვის, რომელთა ატომები მხოლოდ ირხევიან წონასწორობის მდებარეობათა მახლობლად კრისტალური მესრის კვანძებში. როცა ტემპერატურა აბსოლუტურ ნულს უახლოვდება, მოლეკულების სითბური მოძრაობის ენერგიაც ნულს უახლოვდება.

აირის წნევის დამოკიდებულება მოლეკულების კონცენტრაციასა და ტემპერატურაზე. იმის გათვალისწინებით, რომ  $\frac{N}{V} = n$ , (2.6) ფორმულიდან ვღებულობთ გამოსახულებას:

$$p = nkT. \quad (2.10)$$

რომელიც გვიჩვენებს აირის წნევის დამოკიდებულებას მოლეკულების კონცენტრაციასა და ტემპერატურაზე.

(2.10) ფორმულიდან ჩანს, რომ ერთნაირი წნევისა და ტემპერატურის დროს ყველა აირის მოლეკულების კონცენტრაცია ერთნაირია. აქედან გამომდინარეობს ავოგადროს კანონი, რომელიც ცნობილია ქიმიის VIII კლასის კურსიდან: ერთნაირი ტემპერატურისა და წნევის დროს აირთა ტოლ მოცულობებში მოლეკულების ტოლი რაოდენობაა.

7. 1. როგორაა ერთმანეთთან დაკავშირებული სხვადასხვა აირის მოცულობა, წნევა და მოლეკულების რიცხვი სითბური წონასწორობის დროს? 2. რა ფიზიკური აზრი აქვს ბოლცმანის მუდმივას? 3. რა უპირატესობა აქვს ტემპერატურის აბსოლუტურ სკალას სხვა სკალებთან შედარებით? 4. რას უდრის ტემპერატურის აბსოლუტური ნული ცელსიუსის სკალის მიხედვით? 5. როგორაა დამოკიდებული ტემპერატურაზე მოლეკულების გადატანითი მოძრაობის საშუალო კინეტიკური ენერგია? 6. როგორ არის დაკავშირებული აირის წნევა მის ტემპერატურასა და მოლეკულების კონცენტრაციასთან? 7. რა ფიზიკური აზრი აქვს ტემპერატურის აბსოლუტურ ნულს?

## 11. აირის მოლეკულების სიჩქარის გაზომვა

მოლეკულების სითბური მოძრაობის საშუალო სიჩქარე. (2.9) განტოლება საშუალებას გვაძლევს ვიპოვოთ მოლეკულათა მოძრაობის სიჩქარის კვადრატის საშუალო. ჩავსვათ ამ განტოლებაში  $\bar{E} = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$

მაშინ მივიღებთ სიჩქარის კვადრატის საშუალო გამოსახულებას:

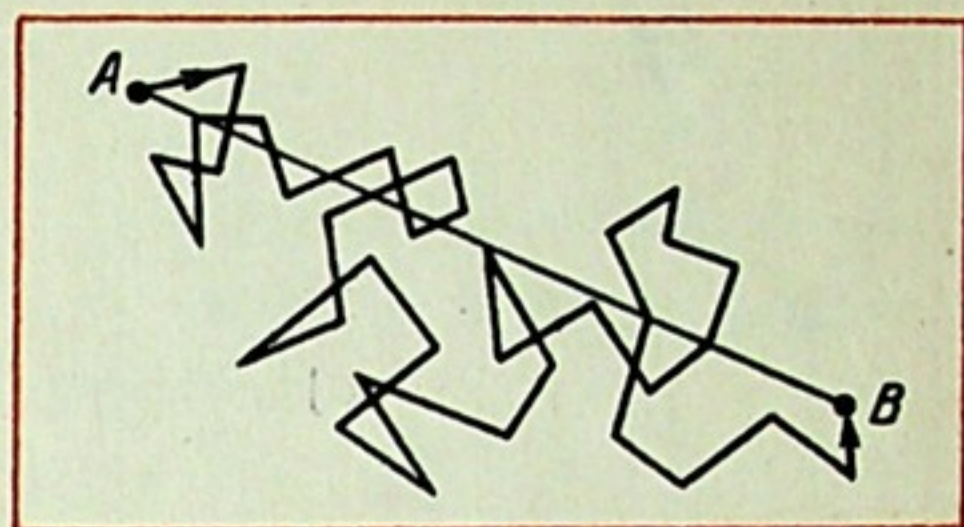
$$\sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{3 \frac{kT}{m_0}}. \quad (2.11)$$



კვადრატულ ფესვს ამ სიდიდან საშუალო კვადრატული სიჩქარე ეწოდება:

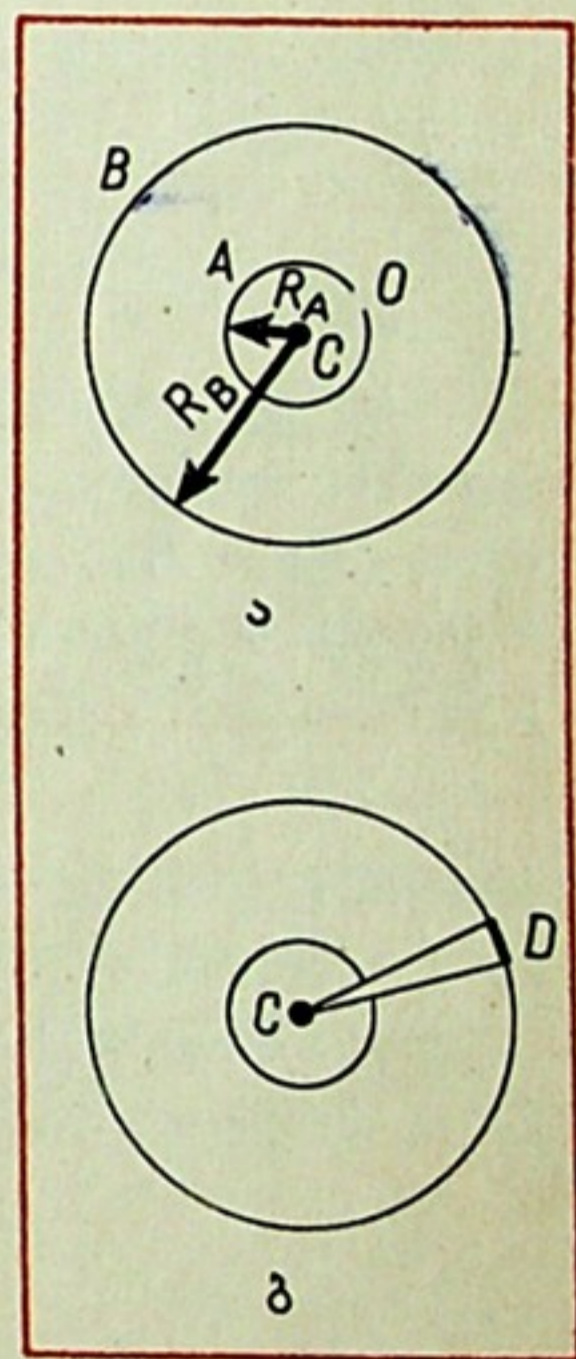
$$\left[ \bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} \right] \quad (2.12)$$

თუ (2.12) ფორმულის მიხედვით გამოვთვლით მოლეკულების სიჩქარეს, მაგალითად, აზოტისათვის  $t=0^\circ\text{C}$ -ის დროს, მივიღებთ  $\bar{v} \approx 500$  მ/წმ. იმავე ტემპერატურაზე წყალბადის მოლეკულების საშუალო სიჩქარე  $\bar{v} \approx 1800$  მ/წმ.



სურ. 24.

როცა ეს რიცხვები პირველად იქნა მიღებული (XIX საუკუნის მეორე ნახევარი), ბევრი ფიზიკოსი განცვიფრებული დარჩა. გამოთვლის მიხედვით აირის მოლეკულების სიჩქარე მეტი აღმოჩნდა, ვიდრე საარტილერიო ყუმბარის სიჩქარე. ამიტომ ზოგს ეჭვიც კი შეეპარა კინეტიკური თეორიის სისწორეში. ვინ არ იცის, რომ სუნი საკმაოდ ნელა ვრცელდება: საჭიროა რამდენიმე ათეული წამი, რომ ოთახის ერთ კუთხეში დაღვრილი სუნამოს სუნი მეორე კუთხემდე გავრცელდეს<sup>1</sup>. ამის ახსნა ძნელი არ არის. მოლეკულების დაჯახებათა გამო თითოეული მოლეკულის ტრაექტორია დახლართული ტეხილი წირია (სურ. 24). ტეხილის წრფივ მონაკვეთებზე მოლეკულას დიდი სიჩქარე აქვს. მაგრამ როგელიმე მიმართულებით მოლეკულის გადაადგილება საშუალოდ მცირეა, თუნდაც მისი მოძრაობა რამდენიმე წუთს გავრცელდეს. A წერტილიდან B წერტილში მოლეკულის გადაადგილებისას მას მიერ გავლილი გზა გაცილებით მეტია, ვიდრე (AB) მანძილი.

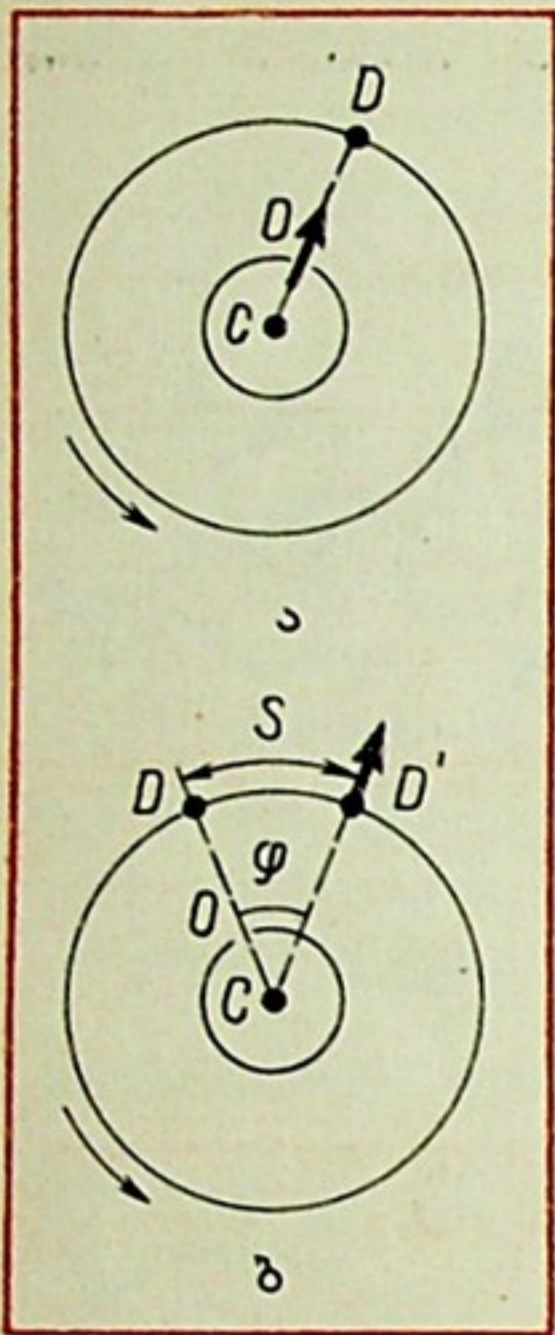


სურ. 25.

მოლეკულის სიჩქარის ექსპერიმენტული განსაზღვრა. მოლეკულის სიჩქარის განსაზღვრავად ჩატარებულმა ცდებმა დაადასტურა (2.12) ფორმულის სისწორე. ერთ-ერთი მათგანი ეკუთვნის შტერნს (1920 წ.).

<sup>1</sup> კონვექციის გამო ეს დრო შეიძლება შემცირდეს 1 წმ-მდე.





სურ. 26.

შტერნის ხელსაწყო შედგება ორი თანადრ-  
ძული  $A$  და  $B$  ცილინდრებისაგან, ერთმანეთთან ხისტადაა დაკავშირებული (სურ.  
25, ა). ცილინდრებს შეუძლია ბრუნვა მუდმივი  
კუთხური სიჩქარით. მცირე ცილინდრის ღერ-  
ძის გასწვრივ გაჭიმულია პლატინის  $C$  წვრილი  
მავთული, რომელიც ვერცხლის ფენით არის  
დაფარული. მავთულში ატარებენ ელექტრულ  
დენს. ამ ცილინდრის კედელში არის  $O$  ვიწრო  
ხვრელი. ცილინდრიდან ჰაერი ამოტუმბუ-  
ლია.  $B$  ცილინდრს ოთახის ტემპერატურა აქვს.

თავიდან ცილინდრები უძრავია. ძაფში დე-  
ნის გავლისას ვერცხლის ფენა ორთქლდება და  
შიდა ცილინდრი ივსება აირით, რომელიც ვერ-  
ცხლის ატომებისაგან შედგება. ზოგიერთი ატო-  
მი გავა  $O$  ხვრელში და როცა მიაღწევს  $B$  ცი-  
ლინდრის შიდა ზედაპირს, ილექება მასზე და  
ხვრელის პირდაპირ წარმოიქმნება ვერცხლის  $D$   
ვიწრო ზოლი (სურ. 25, ბ).

შემდეგ ცილინდრებს აბრუნებენ. ბრუნთა რიცხვი წამში არის  $n$ .  
დროში, რომელიც ატომს სჭირდება ცილინდრთა რადიუსების სხვა-  
ობის  $(R_B - R_A)$  ტოლი მანძილის გასავლელად, ცილინდრები შემობ-  
რუნდება  $\varphi$  კუთხით. ამის შედეგად მუდმივი სიჩქარით მოძრავი ატო-  
მები მოხვდება დიდი ცილინდრის შიდა ზედაპირზე არა  $O$  ხვრელის  
პირდაპირ (სურ. 26, ა)  $D$  წერტილში, არამედ ხვრელის ცენტრში  
გამავალი რადიუსის ბოლოდან რაღაც  $s$  მანძილზე (სურ. 26, ბ),  $D'$   
წერტილში (ატომები ხომ წრფივად მოძრაობენ).

აღვნიშნოთ  $v_B$ -თი გარე ცილინდრის ზედაპირის წერტილთა სიჩ-  
ქარის მოდული, მაშინ

$$s = v_B t = 2\pi n R_B t. \quad (2.13)$$

სინამდვილეში ვერცხლის ყველა ატომის სიჩქარე არ არის ერთნა-  
ირი და ამიტომ სხვადასხვა ატომისათვის  $s$  მანძილი განსხვავებული  
იქნება.  $s$  უნდა იყოს  $D$  და  $D'$  ზოლების იმ უბნებს შორის მანძილი,  
რომლებშიც ვერცხლის ატომთა კონცენტრაცია უდიდესია. ატომთა  
საშუალო სიჩქარე ამ მანძილის შესაბამისი იქნება.

ატომის საშუალო სიჩქარე.

$$\bar{v} = \frac{R_B - R_A}{t}.$$





ჩავსვათ ამ ფორმულაში  $t$ -ს მნიშვნელობა (2.13) გამოსახულებიდან, მივიღებთ:

$$\bar{v} = \frac{2\pi n R_B (R_B - R_A)}{s}$$

თუ გვეცოდინება,  $n$ ,  $R_A$  და  $R_B$  და გავზომავთ ხელსაწყოთ ბრუნვით გამოწვეულ ვერცხლის ზოლის  $s$  საშუალო წანაცვლებას, გავიგებთ ვერცხლის ატომთა საშუალო სიჩქარეს.

ცდით განსაზღვრული სიჩქარის მოდული ემთხვევა საშუალო კვადრატული სიჩქარის თეორიულ მნიშვნელობას. ეს (2.12) ფორმულის ექსპერიმენტული დადასტურებაა და, მაშასადამე, (2.9) ფორმულიდან, რომლის მიხედვით მოლეკულის საშუალო კინეტიკური ენერგია პროპორციულია აბსოლუტური ტემპერატურისა.

ბროუნის ნაწილაკის საშუალო სიჩქარე. (2.12) ფორმულა გვებმარება გავიგოთ, თუ რატომ იზრდება ბროუნის მოძრაობის ინტენსიურობა სითხის ტემპერატურის აწევით და კლებულობს ნაწილაკის მასის გადიდებით. როგორც ვიცით, ბროუნის ნაწილაკი მოლეკულების სითბურ მოძრაობაში მონაწილეობს. ამიტომ მისი საშუალო კინეტიკური ენერგიაც (2.9) ფორმულით განსაზღვრება, საშუალო კვადრატული სიჩქარე კი — შემდეგნაირად:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

სადაც  $m$  ბროუნის ნაწილაკის მასაა. თუ ნაწილაკის მასა დიდია, მაშინ მისი მოძრაობის საშუალო სიჩქარე იმდენად მცირეა, რომ ნაწილაკის მოძრაობის შემჩნევა პრაქტიკულად შეუძლებელია.

- ?
1. როგორ შეიცვლება მოლეკულების მოძრაობის საშუალო კვადრატული სიჩქარე ტემპერატურის 4-ჯერ გადიდებით?
  2. რომელი მოლეკულები მოძრაობენ ატმოსფეროში უფრო სწრაფად: აზოტისა თუ ეანგბადის?
  3. რატომაა შტერნის ცდაში გარე მბრუნავ ცილინდრის ზედაპირზე ვერცხლის ფენის სისქე არათანაბარი ზოლის მთელ სიგანეზე?

**ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები**

ამ თავის ამოცანების ამოხსნისათვის ვსარგებლობთ: (2.6) ფორმულით, რომელიც აბსოლუტურ ტემპერატურას განსაზღვრავს; (2.9) ფორმულით, რომელიც ქაოსური მოძრაობის საშუალო ენერგიას აკავშირებს ტემპერატურასთან; და (2.12) ფორმულით, რომელიც მოლეკულების საშუალო კვადრატულ სიჩქარეს განსაზღვრავს. ზოგიერთი ამოცანის ამოხსნისათვის მოხერხებულია (2.10) ფორმულა, რომელიც აირის წნევას აკავშირებს მოლეკულების კონცენტრაციასა და აბსო-



ლუტურ ტემპერატურასთან. გარდა ამისა უნდა ვიცოდეთ ბოლცმანის, მუდმივას მნიშვნელობა (2.7).



1. რას უდრის აირის წნევისა და მოცულობის ნამრავლის შეფარდება მოლეკულების რიცხვთან  $t = 300^\circ\text{C}$  ტემპერატურის დროს?

ამოხსნა. (2.6) ფორმულის თანახმად  $\frac{pV}{N} = kt$ , სადაც  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  ჯ/კ ბოლცმანის მუდმივაა. რადგან აბსოლუტური ტემპერატურა  $T = t + 273 = 573\text{K}$ , ამიტომ

$$\frac{pV}{N} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ ჯ/კ} \cdot 573 \text{ K} = 7,9 \cdot 10^{-21} \text{ ჯ.}$$

2. განვსაზღვროთ აირის მოლეკულების საშუალო კვადრატული სიჩქარე  $0^\circ\text{C}$ -ზე. აირის მოლური მასა  $M = 0,019$  კგ/მოლი.

ამოხსნა. მოლეკულების საშუალო კვადრატული სიჩქარე გამოითვლება (2.12) ფორმულით. სადაც უნდა გავითვალისწინოთ

$$m_0 = \frac{M}{N_A} \text{ და } T = 273\text{K.}$$

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3kN_A T}{M}} = \\ &= \sqrt{\frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 273}{0,019}} \text{ მ/წმ; } \bar{v} \approx 600 \text{ მ/წმ.} \end{aligned}$$

3. რაღაც რაოდენობის წყალბადის ტემპერატურა  $T_1 = 200 \text{ K}$  და წნევა  $p_1 = 400$  კა. აირს ათბობენ  $T_2 = 10000 \text{ K}$  ტემპერატურამდე, რომლის დროსაც წყალბადის მოლეკულები მთლიანად ატომებად იშლებიან. განვსაზღვროთ აირის წნევის ახალი მნიშვნელობა  $p_2$ , თუ მოცულობა და მასა უცვლელი დარჩა.

ამოხსნა. (2.10) ფორმულის თანახმად  $T_1$  ტემპერატურაზე აირის წნევა  $p_1 = n_1 k T_1$ , სადაც  $n_1$  წყალბადის მოლეკულების კონცენტრაციაა.

წყალბადის მოლეკულების ატომებად გახლეჩისას ნაწილაკთა რიცხვი ჭურჭელში 2-ჯერ გაიზრდება. ამიტომ წყალბადის ატომების კონცენტრაცია ტოლია:  $n_2 = 2n_1$ . ატომური წყალბადის წნევა  $p_2 = n_2 k T_2 = 2n_1 k T_2$ .

თუ მეორე განტოლებას გავყოფთ პირველზე, მივიღებთ:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2T_2}{T_1} \quad \text{აქედან } p_2 = p_1 \frac{2T_2}{T_1}; \quad p_2 = 40 \text{ კა.}$$



1. რა რიცხვითი მნიშვნელობა ექნებოდა ბოლცმანის მუდმივას, ტემპერატურის ერთეული SI სისტემაში — კელვინი  $2^{\circ}\text{C}$ -ის ტოლი რომ ყოფილიყო?

2. რას უდრის არგონის ატომის საშუალო კინეტიკური ენერგია, როცა აირის ტემპერატურა  $17^{\circ}\text{C}$ -ია?

3. თანამედროვე ვაკუუმტუმბოებით წნევის შემცირება შესაძლებელია  $1,3 \cdot 10^{-10}$  პა-მდე ( $10^{-12}$  მმ. ვწყ. სვ.) აირის რამდენი მოლეკულა იქნება  $1 \text{ სმ}^3$ -ში ამ წნევისა და  $27^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურისას?

4. სად მეტი მოლეკულაა:  $50 \text{ მ}^3$  მოცულობის ოთახში ნორმალური ატმოსფერული წნევისა და  $20^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურისას თუ ჰიქა წყალში ( $200 \text{ სმ}^3$ )?

5.  $100^{\circ}\text{C}$ -ზე აირის მოლეკულის საშუალო კვადრატული სიჩქარეა  $540 \text{ მ/წმ}$ . გავიგოთ მოლეკულის მასა.

\*6. რამდენი პროცენტით გაიზრდება წყლის მოლეკულების საშუალო კვადრატული სიჩქარე ჩვენს სისხლში, თუ ტემპერატურა  $37^{\circ}$ -დან  $40^{\circ}\text{C}$ -მდე აიწევს?

### მ ო კ ლ ე დ ა ს კ ვ ნ ა

მაკროსკოპული სხეულის შინაგანი მდგომარეობა განისაზღვრება სიდიდებით, რომლებსაც მაკროსკოპული პარამეტრები ეწოდება. ეს სიდიდეებია: წნევა, მოცულობა და ტემპერატურა. ტემპერატურა არის მოლეკულების სითბური მოძრაობის ინტენსიურობის ზომა და ახასიათებს თერმოდინამიკური სისტემის სითბური წონასწორობის მდგომარეობას. სითბური წონასწორობის დროს არ მიმდინარეობს არავითარი მაკროსკოპული პროცესები და ყველა მაკროსკოპული პარამეტრი უცვლელია, ტემპერატურა კი ერთნაირია სისტემის ყველა ნაწილში.

ტემპერატურას ზომავენ თერმომეტრით. ნებისმიერ თერმომეტრში გამოყენებულია ამა თუ იმ თერმოდინამიკური პარამეტრის ცვლილება ტემპერატურის მიხედვით.

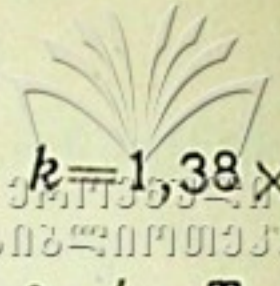
სითხისა და მყარი სხეულისაგან განსხვავებით ყველა გაუხშობელი აირი გათბობისას ერთნაირად იცვლის მოცულობას მუდმივი წნევისას, ან წნევას მუდმივი მოცულობისას. ამის გამო ტემპერატურული სკალის დასადგენად იყენებენ გაუხშობელ აირს (ტემპერატურის აირული სკალა).

ცდა გვიჩვენებს, რომ აირთა სითბური წონასწორობისას  $\frac{pV}{N}$  ფარ-

დობა ერთნაირია ყველა აირისათვის და დამოკიდებულია მხოლოდ ტემპერატურაზე. ამიტომ შეიძლება გამოვიყენოთ  $T$  ტემპერატურის

<sup>1</sup> ვარსკვლავით აღნიშნულია რთული ამოცანები.





განსაზღვრისათვის  $\frac{pV}{N} = kT$  ფორმულის მიხედვით, სადაც  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  ჯ/კ ბოლცმანის მუდმივაა. აბსოლუტური ტემპერატურა  $T = t + 273$ , სადაც  $t$  ტემპერატურაა ცელსიუსის სკალით. მინიმალურ ტემპერატურას შეესაბამება კელვინის სკალის ნული (ტემპერატურის აბსოლუტური ნული, რომელიც —  $273^{\circ}\text{C}$ -ის ტოლია). ტემპერატურას ზომავენ კელვინებით. ერთი კელვინი ტოლია გრადუსისა ცელსიუსის სკალის მიხედვით.

მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიიდან მიღებული წნევის ფორმულის შედარება ტემპერატურის განსაზღვრელ  $\frac{pV}{N} = kT$  ფორმულასთან მნიშვნელოვან შედეგს გვაძლევს: მოლეკულების ქაოსური მოძრაობის საშუალო კინეტიკური ენერგია პირდაპირპროპორციულია აბსოლუტური ტემპერატურისა:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT.$$

მოლეკულების საშუალო კვადრატული სიჩქარე  $\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$  ფორმულით გამოითვლება და  $0^{\circ}\text{C}$ -ზე რამდენიმე ასეული მეტრია წამში.

### III თავი

## იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება. აირის კანონები

### 12. იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება

**მდგომარეობის განტოლება.** ჩვენ დაწვრილებით განვიხილეთ იდეალური აირის ქცევა მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის თვალსაზრისით. გავარკვიეთ აირის წნევის დამოკიდებულება მისი მოლეკულების კონცენტრაციაზე და ტემპერატურაზე (2.10 ფორმულა). ამ დამოკიდებულებიდან მივიღებთ განტოლებას, რომელიც ერთმანეთთან აკავშირებს მოცემული მასის საკმაოდ გაუხშობელი აირის მდგომარეობის დამახასიათებელ სამივე მაკროსკოპულ პარამეტრს ( $p$ ,  $V$ , და  $T$ ). ამ განტოლებას იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება ეწოდება.



ჩავსვათ  $p = nkT$  განტოლებაში აირის კონცენტრაციის გამოსახულება. (1.3) და (1.7) ფორმულების გათვალისწინებით აირის კონცენტრაციას შემდეგნაირად გამოვსახავთ:

$$n = \frac{N}{V} = \frac{1}{V} \frac{m}{M} N_A, \quad (3.1)$$

სადაც  $N_A$  ავოგადროს მუდმივაა,  $m$  — აირის მასა,  $M$  — მისი მოლური მასა.

(3.1) ჩავსვათ (2.10)-ში, მივიღებთ:

$$pV = \frac{m}{M} k N_A T. \quad (3.2)$$

ბოლცმანის  $k$  მუდმივას ნამრავლს ავოგადროს  $N_A$  მუდმივაზე აირის უნივერსალური მუდმივას უწოდებენ და  $R$  ასოთი აღნიშნავენ:

$$R = k N_A = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ ჯ}/(\text{მოლ} \cdot \text{K}) = 8,31 \text{ ჯ}/(\text{მოლ} \cdot \text{K}). \quad (3.3)$$

(3.2) განტოლებაში  $k N_A$  ნამრავლის ნაცვლად ჩავსვათ აირის უნივერსალური მუდმივა  $R$ , მივიღებთ მდგომარეობის განტოლებას ნებისმიერი მასის იდეალური აირისათვის:

$$\boxed{pV = \frac{m}{M} RT.} \quad (3.4)$$

ერთადერთი სიდიდე ამ განტოლებაში, რომელიც აირის გვარობაზეა დამოკიდებული, მისი მოლური მასაა.

(3.4) მდგომარეობის განტოლებიდან გამომდინარეობს თუ რა კავშირია იდეალური აირის წნევასა, მოცულობასა და ტემპერატურას შორის მის ორ ნებისმიერ მდგომარეობაში.

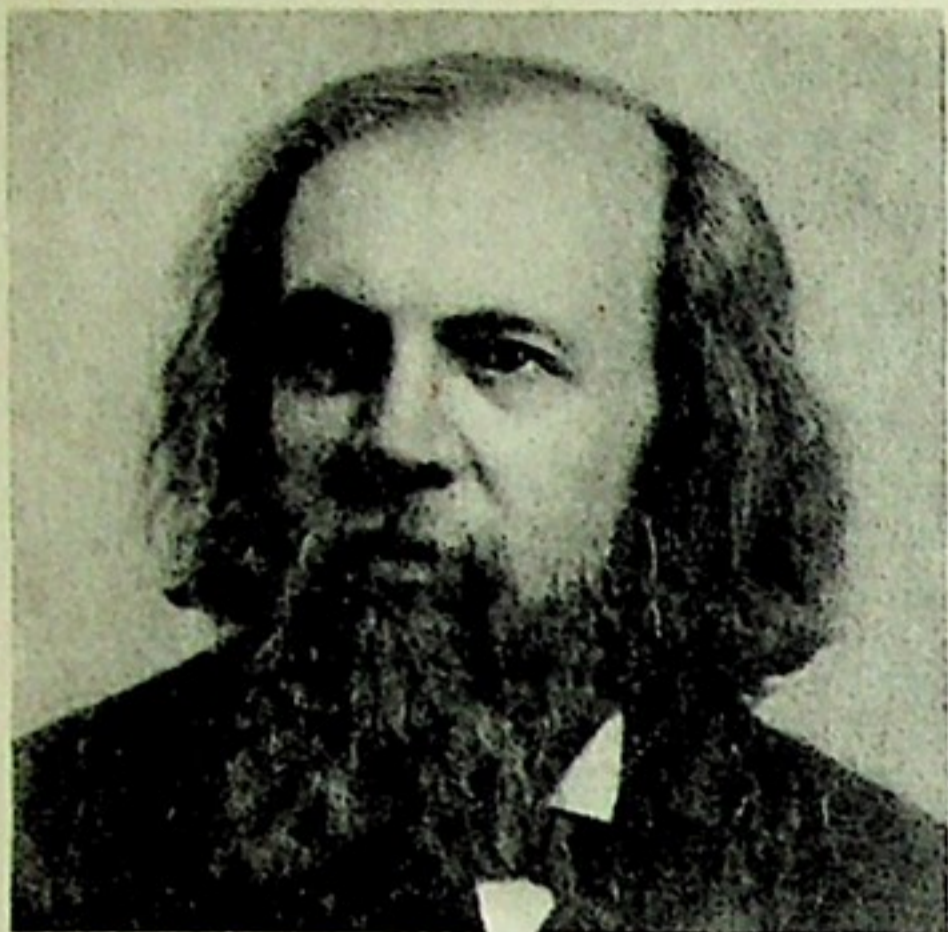
პირველი მდგომარეობის შესაბამისი პარამეტრები აღვნიშნოთ ინდექსით 1, მეორისა კი — ინდექსით 2, მაშინ (3.4) განტოლების თანახმად მოცემული მასის აირისათვის

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{m}{M} R \quad \text{და} \quad \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{m}{M} R.$$

ამ განტოლებათა მარჯვენა ნაწილები ერთნაირია. მაშასადამე, მათი მარცხენა ნაწილები ტოლი იქნება:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{const.} \quad (3.5)$$





**დimitრი ივანეს ძე მენდელეევი**  
(1834—1907) — დიდი რუსი მეცნიერი, ელემენტთა პერიოდული სისტემის — მეცნიერებაში ამ ერთ-ერთი ყველაზე ღრმა განზოგადების შემქმნელი. დ. მენდელეევს ეკუთვნის უმნიშვნელოვანესი ნაშრომები აირის თეორიასა და აირისა და სითხის ურთიერთგარდაქმნის საკითხებში (აღმოჩენა კრიტიკული ტემპერატურისა, რომლის მაღლა აირი სითხედ ვერ გადაიქცევა).

დ. მენდელეევმა, როგორც მოწინავე საზოგადო მოღვაწემ, ბევრი რამ გააკეთა სასარგებლო წიაღისეულთა გამოყენების, რუსეთის საწარმოო ძალებისა და ქიმიური წარმოების განვითარების საქმეში.

(3.5) სახის მდგომარეობის განტოლებას კლაპეირონის<sup>1</sup> განტოლება ეწოდება. ის მდგომარეობის განტოლების ჩაწერის ერთ-ერთი სახეა.

მდგომარეობის განტოლება (3.4) სახით პირველად მიიღო დიდმა რუსმა მეცნიერმა დ. მენდელეევმა. ამიტომ მას მენდელეევ—კლაპეირონის განტოლებას უწოდებენ.

**მდგომარეობის განტოლების ექსპერიმენტული შემოწმება.** (3.5) სახის მდგომარეობის განტოლების მართებულობაში დავრწმუნდებით 27-ე სურათზე გამოსახული ხელსაწყოთა საშუალებით.

ჭერმეტული გოფრირებული ჭურჭელი შეერთებულია მანომეტრთან, რომლითაც იზომება წნევა ჭურჭელში. ხრახნის ბრუნვისას ჭურჭლის მოცულობა იცვლება. მოცულობის სიდიდეზე შეიძლება ვიმსჯელოთ სახაზავის საშუალებით. ჭურჭელში მყოფი აირის ტემპერატურა ტოლია გარემომცველი ჰაერის ტემპერატურისა და იზომება თერმომეტრით.

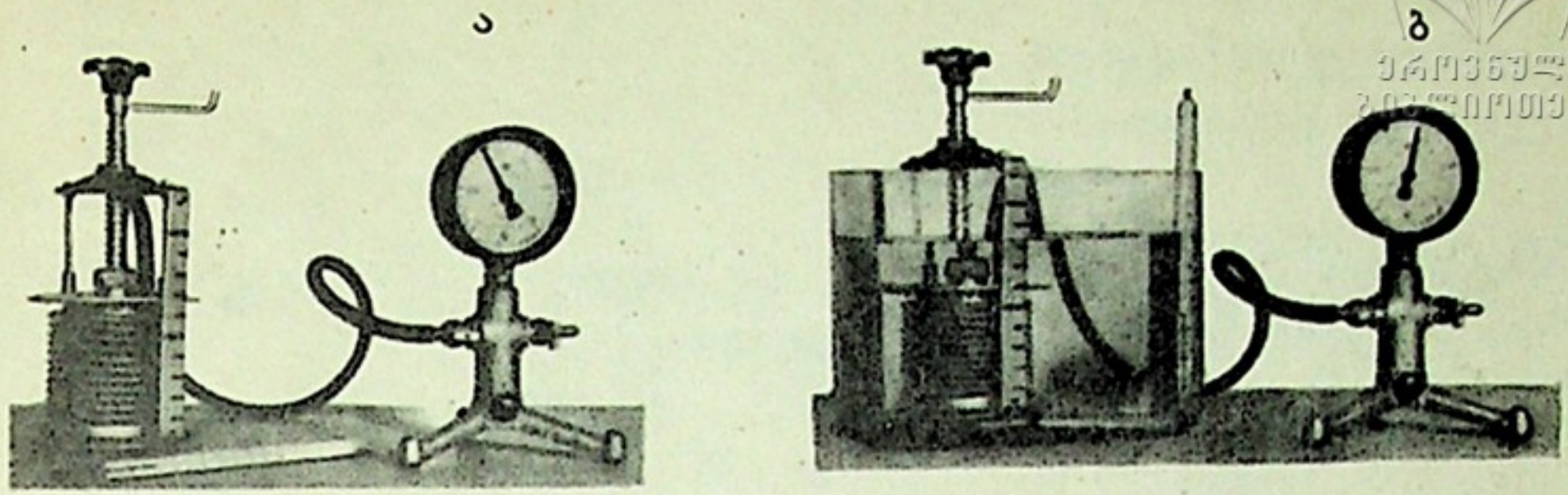
თუ გავზომავთ. საწყის მდგომარეობაში (სურ. 27, ა) აირის  $p$  წნევას,  $T$  ტემპერატურასა და  $V$  მოცულობას, შეიძლება გამოვთვალოთ  $\frac{p_1 V_1}{T_1}$  ფარდობა (გვახსოვდეს, რომ  $T$  აბსოლუტური ტემპერატურაა

და არა ტემპერატურა ცელსიუსის სკალით). ამის შემდეგ უნდა შევცვალოთ ჭურჭლის მოცულობა და გავათბოთ აირი, რისთვისაც ჭურჭელს ვათავსებთ ცხელ წყალში, (სურ. 27, ბ). ხელახლა გავზომავთ რა აირის  $p_2$  წნევას,  $V_2$  მოცულობას და  $T_2$  ტემპერატურას, გამოვთვლით  $\frac{p_2 V_2}{T_2}$  ფარდობას.

27

<sup>1</sup> კლაპეირონი ბ. პ. (1799—1864) ფრანგი ფიზიკოსია; იგი ათი წლის განმავლობაში მუშაობდა რუსეთში.





სურ. 27.

იმ სიზუსტის ფარგლებში, რომელსაც დანადგარი უზრუნველყოფს, მდგომარეობის განტოლება (3.5) სრულდება. ექსპერიმენტული შედეგების გადახრა თეორიულიდან არსებითია მხოლოდ მაშინ, როცა აირის წნევა ასობით ატმოსფეროს აღწევს. მკვრივი აირი მიახლოებითაც კი არ შეიძლება იდეალურად ჩავთვალოთ.

13. აირის კანონები

იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლებით შეიძლება გამოვიკვლიოთ პროცესები, რომლებშიც მასა და სამი პარამეტრიდან —  $p$ ,  $V$  ან  $T$  — ერთ-ერთი უცვლელია (რაოდენობრივ დამოკიდებულებას, რომელიც არსებობს აირის ორ პარამეტრს შორის მესამე პარამეტრის მუდმივობისას აირის კანონი ეწოდება.)

პროცესს, რომელიც ერთ-ერთი პარამეტრის მუდმივობის პირობებში მიმდინარეობს, იზოპროცესი<sup>1</sup> ეწოდება. იზოპროცესები ფართოდაა გავრცელებული ბუნებაში და ხშირად გამოიყენება ტექნიკაში.

იზოთერმული პროცესი.  $\chi$  თერმოდინამიკური სისტემის მდგომარეობის ცვლილებას მუდმივი ტემპერატურის დროს იზოთერმული პროცესი ეწოდება. აირის ტემპერატურის მუდმივობისათვის საჭიროა ის თბოცვლაში იყოს დიდ სისტემასთან — თერმოსტატთან. თერმოსტატად გამოდგება ატმოსფერული ჰაერიც, თუკი მისი ტემპერატურა საგრძნობლად არ იცვლება პროცესის დროს.

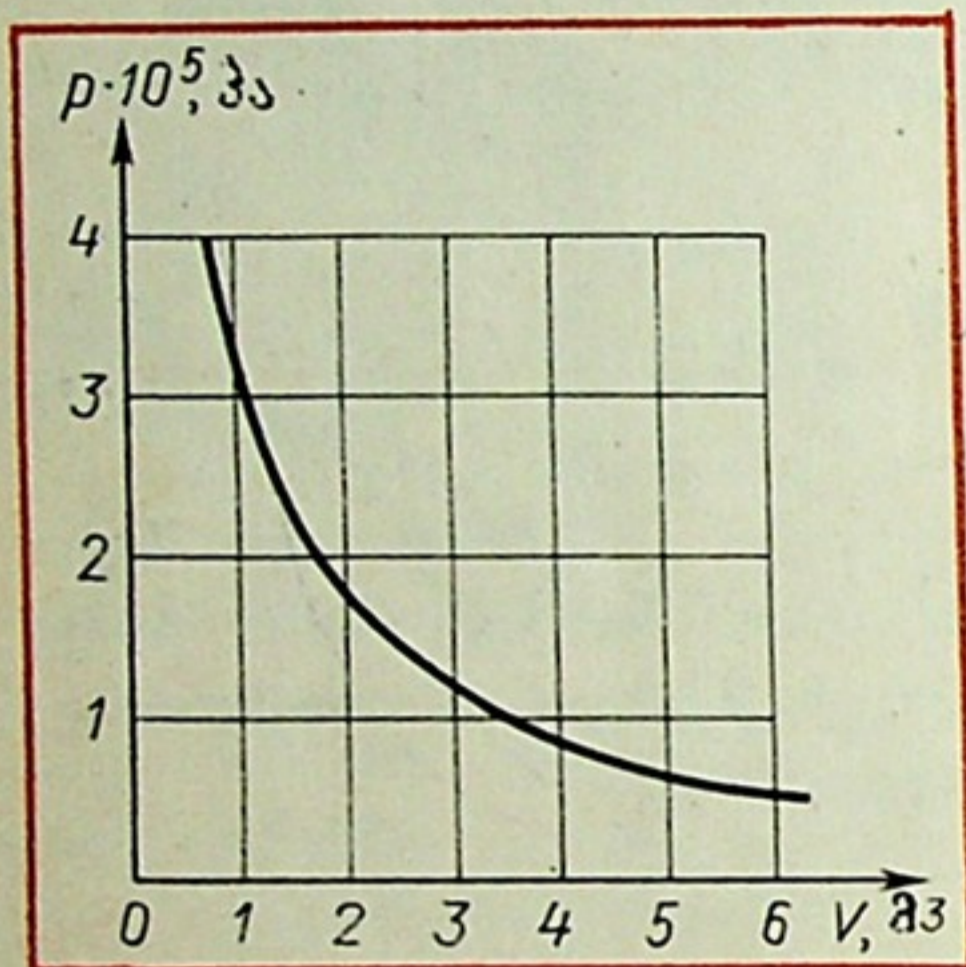
<sup>1</sup> ბერძნულ სიტყვიდან „იზოს“ — ტოლი.



იდეალური აირის მდგომარეობის (3.4) განტოლების თანახმად, მუდმივი ტემპერატურის დროს აირის წნევისა და მოცულობის ნამრავლი ერთი და იგივეა:

$$pV = \text{const}, \text{ როცა } T = \text{const}. \quad (3.6)$$

მოცემული მასის აირის წნევისა და მოცულობის ნამრავლი მუდმივია, თუ აირის ტემპერატურა უცვლელია.



სურ. 28.

ეს კანონი ექსპერიმენტულად აღმოაჩინა ჯერ ინგლისელმა მეცნიერმა ბოილმა, ხოლო რამდენადმე მოგვიანებით ფრანგმა მეცნიერმა მარიოტმა. ამიტომ მას ბოილ — მარიოტის კანონი ეწოდება.

ბოილ — მარიოტის კანონი მართებულია ყველა აირისათვის, აგრეთვე აირთა ნარევისათვის (მაგალითად, ჰაერისათვის). მხოლოდ დიდ წნევებზე, რომლებიც რამდენიმე ასეულჯერ მეტია ატმოსფერულზე, ამ კანონიდან გადახრა უკვე არსებითია.

ბოილ — მარიოტის კანონის

მართებულობაში დარწმუნება იმ წნევისას, რომელიც ახლოსაა ატმოსფერულთან, შეგვიძლია წინა პარაგრაფში აღწერილი დანადგარის საშუალებით.

მუდმივი ტემპერატურის პირობებში აირის წნევის მოცულობაზე დამოკიდებულება გრაფიკულად გამოისახება მრუდით, რომელსაც იზოთერმა ეწოდება. აირის იზოთერმა გამოისახავს უკუპროპორციულ დამოკიდებულებას წნევისა და მოცულობას შორის. ამ სახის მრუდს მათემატიკაში ჰიპერბოლა ეწოდება.

განვიხილოთ კონკრეტული მაგალითი. ვთქვათ,  $p_1 = 3,6 \cdot 10^5$  პა წნევის დროს აირის მოცულობა,  $V_1 = 1$  მ<sup>3</sup>. ამ დროს წნევის ნამრავლი მოცულობაზე ტოლია:  $p_1 V_1 = 3,6 \cdot 10^5$  ნ. მ. ბოილ — მარიოტის კანონის თანახმად, ის არ უნდა იცვლებოდეს მუდმივ ტემპერატურაზე. ამიტომ  $V_2 = 2$  მ<sup>3</sup> მოცულობისას წნევა  $p_2 = \frac{p_1 V_1}{V_2} = 1,8 \cdot 10^5$  პა. ანალოგიურად ვიპოვით წნევას, როცა მოცულობა არის 3 მ<sup>3</sup>, 4 მ<sup>3</sup> და ა. შ. მივიღებთ შემდეგ ცხრილს:

V, მ <sup>3</sup>	1	2	3	4	5	6
p, პა	$3,6 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$	$0,9 \cdot 10^5$	$0,72 \cdot 10^5$	$0,6 \cdot 10^5$



ამ მონაცემებით ავაგებთ იზოთერმას, თუ პორიზონტალურ დერძზე გადავზომავთ მოცულობის მნიშვნელობებს, ვერტიკალურზე კი — წნევის შესაბამის მნიშვნელობებს (სურ. 28).

განსხვავებულ მუდმივ ტემპერატურებს განსხვავებული იზოთერმები შეესაბამება. ტემპერატურის აწევისას (3.4) მდგომარეობის განტოლების მიხედვით წნევა იზრდება, თუ  $V = \text{const}$ . ამიტომ უფრო მაღალი  $T_2$  ტემპერატურის შესაბამისი იზოთერმა თავისი მდებარეობით უფრო დაბალი  $T_1$  ტემპერატურის შესაბამის იზოთერმაზე მაღლაა.

**იზობარული პროცესი.** თერმოდინამიკური სისტემის მდგომარეობის ცვლილების პროცესს მუდმივი წნევის პირობებში **იზობარული**<sup>1</sup> პროცესი ეწოდება.

(3.4) განტოლების თანახმად აირის ნებისმიერ მდგომარეობაში უცვლელი წნევის დროს მოცულობის ფარდობა ტემპერატურასთან მუდმივი რჩება:

$$\frac{V}{T} = \text{const}, \text{ როცა } p = \text{const}. \quad (3.7)$$

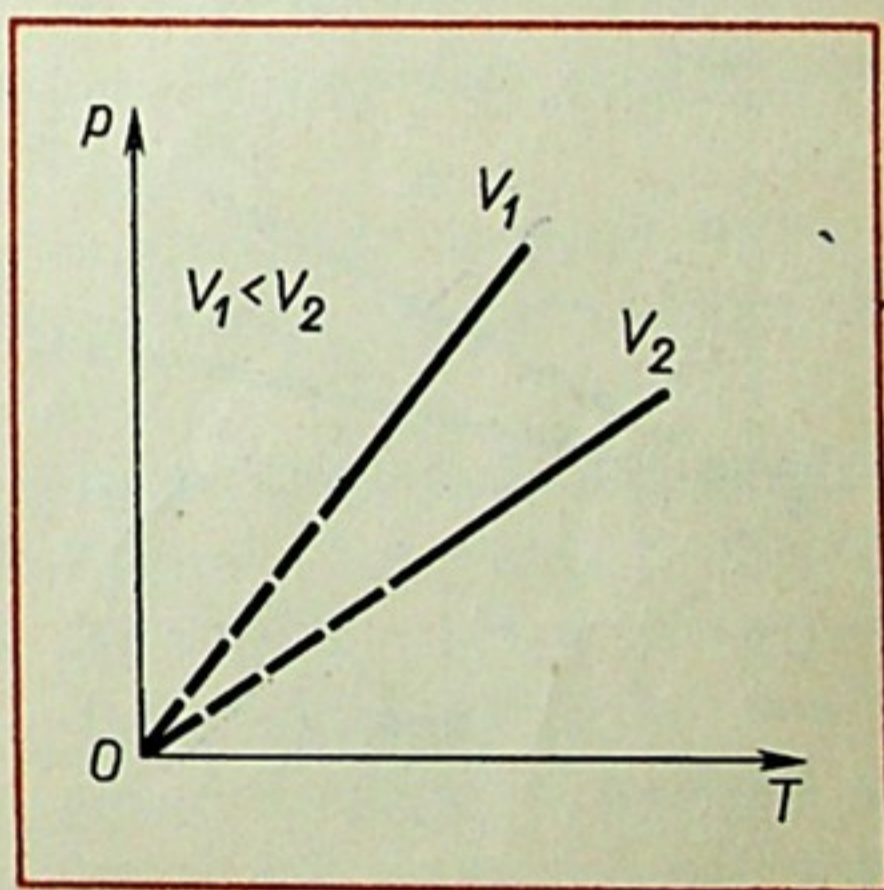
მოცემული მასის აირის მოცულობისა და ტემპერატურის შეფარდება მუდმივია, თუ წნევა არ იცვლება.

ეს კანონი ექსპერიმენტულად დაადგინა ფრანგმა მეცნიერმა გეილუსაკმა 1802 წელს და მისსავე სახელს ატარებს. (3.7) ფორმულის თანახმად მუდმივი წნევის დროს აირის მოცულობა წრფივად არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე:

$$V = \text{const} \cdot T. \quad (3.8)$$

ამ დამოკიდებულებას გრაფიკულად გამოსახავს წრფე, რომელსაც **იზობარა** ეწოდება (სურ. 29).

აირის ყოველ მოცემულ წნევას გარკვეული იზობარა შეესაბამება წნევის გაზრდისას, მუდმივი ტემპერატურის დროს, აირის მოცულობა კლებულობს (თანახმად ბოილ—მარიოტის კანონისა). ამიტომ უფრო მაღალი  $p_2$  წნევის შესაბამისი იზობარა უფრო მცირე  $p_1$  წნევის შესაბამის იზობარაზე დაბლაა.



სურ. 29.

<sup>1</sup> წარმოდგება ბერძნული სიტყვისაგან „ბაროს“, რაც სიმძიმეს, წონას ნიშნავს.





დაბალი ტემპერატურების არეში იდეალური აირის ყველა იზოქორული პროცესი იწყება  $T=0$  წერტილში. ოღონდ ეს იმას არ ნიშნავს, რომ იდეალური აირის მოცულობა მართლაც ნული ხდება. ყველა აირი ძლიერი გაცივებისას სითხედ იქცევა, სითხისათვის კი (3.4) მდგომარეობის განტოლება არ გამოდგება.

**იზოქორული პროცესი.** თერმოდინამიკური სისტემის მდგომარეობის ცვლილებას, როცა მოცულობა მუდმივი რჩება, იზოქორული<sup>1</sup> პროცესი ეწოდება.

(3.4) განტოლებიდან გამომდინარეობს, რომ აირის ნებისმიერ მდგომარეობაში, უცვლელი მოცულობისას, წნევისა და ტემპერატურის შეფარდება მუდმივი რჩება:

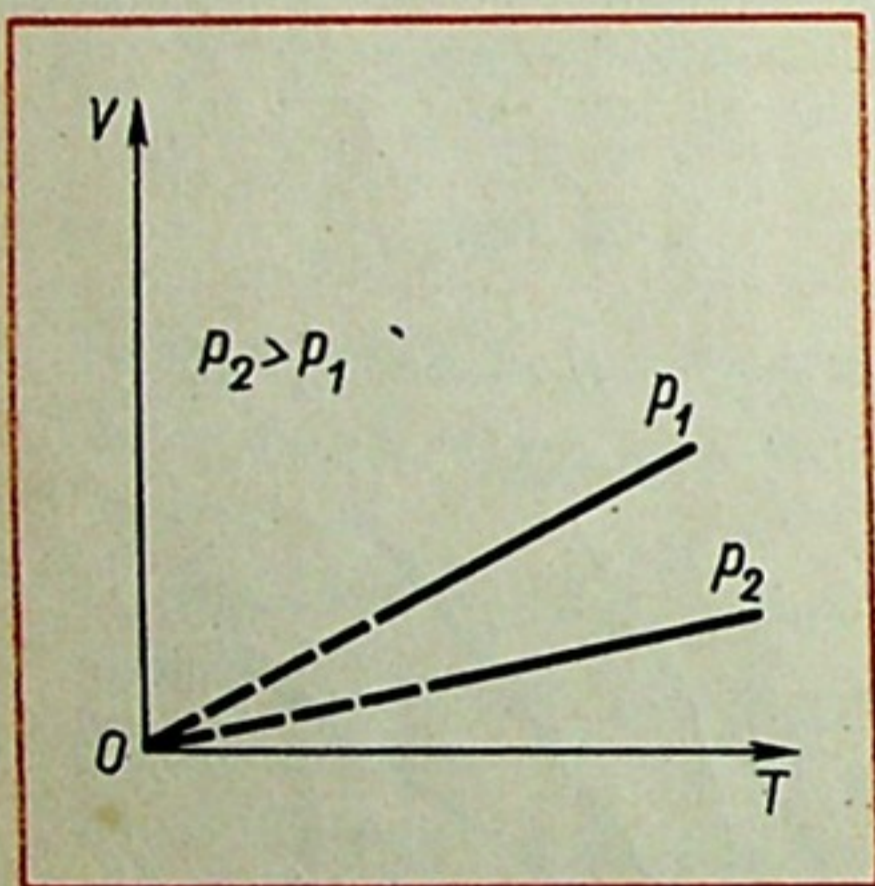
$$\frac{p}{T} = \text{const}, \text{ როცა } V = \text{const}. \quad (3.9)$$

[მოცემული მასის აირის წნევისა და ტემპერატურის შეფარდება მუდმივია, თუ აირის მოცულობა არ იცვლება.]

ეს კანონი 1787 წ. დაადგინა ფრანგმა ფიზიკოსმა ჟ. შარლმა და მისსავე სახელს ატარებს. (3.9) ფორმულის მიხედვით მუდმივი მოცულობის დროს აირის წნევა წრფივად არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე:

$$p = \text{const} \cdot T. \quad (3.10)$$

გრაფიკულად ეს დამოკიდებულება გამოისახება წრფით, რომელსაც იზოქორა ეწოდება (სურ.



სურ. 30.

30). აირის ყოველ მოცულობას თავისი იზოქორა შეესაბამება. აირის მოცულობის ზრდისას მუდმივი ტემპერატურის დროს წნევა ეცემა (ბოილ—მარიოტის კანონის თანახმად). ამიტომ უფრო დიდი  $V_2$  მოცულობის შესაბამისი იზოქორა უფრო მცირე  $V_1$  მოცულობის შესაბამის იზოქორაზე დაბლაა.

(3.10) განტოლების მიხედვით ყველა იზოქორა იწყება  $T=0$  წერტილში. ეს იმას ნიშნავს, რომ იდეალური აირის წნევა აბსოლუტურ ნულზე სრულიად ისპობა.

<sup>1</sup> წარმოდგება ბერძნული სიტყვისაგან „ქორემა“, რაც ტევადობას ნიშნავს.



## 14. აირის თვისებათა გამოყენება ტექნიკაში



ქართული  
ენების  
სამეცნიერო  
ცენტრი

აირს ბევრი ისეთი თვისება აქვს, რომელთა გამო იგი შეუცვლელია მრავალ ტექნიკურ მოწყობილობაში.

**აირი — შეკუმშული დრეკადი სხეული.** მდგომარეობის განტოლების თანახმად ჭურჭლის კედლებზე აირის წნევა ასე გამოისახება:

$$p = \frac{m}{M} \frac{RT}{V} \quad (3.11)$$

ეს წნევა ისპობა მხოლოდ მაშინ, როცა  $m \rightarrow 0$  (აირი თითქმის აღარაა) ან  $V \rightarrow \infty$  (აირი უსაზღვროდ გაფართოვდა), აგრეთვე, როცა  $T \rightarrow 0$  (აირის მოლეკულები აღარ მოძრაობენ). კედლებზე აირის წნევის ძალა დრეკადობის ძალის კერძო სახეა. აირი ჰგავს ზამბარას, რომელიც ყოველთვის შეკუმშულია. საგულისხმოა, რომ მცირე მასის აირს შეუძლია განავითაროს შედარებით დიდი წნევა.

**აირის წნევის მართვა.** აირის წნევა შეიძლება ვცვალოთ მისი მოცულობისა ან ტემპერატურის შეცვლით. გარდა ამისა, აირის წნევა დამოკიდებულია მასაზე (იხ. 3.11) ნებისმიერ დახშულ ჭურჭელში აირის მასის გაზრდით შეგვიძლია გავზარდოთ წნევა. ასეც იქცევიან ჰაერის ჩატუმბვისას ავტომობილის სალტეში ან ფეხბურთის ბურთში.

**აირის დიდი კუმშვადობა.** სითხესა და მყარ სხეულთან შედარებით აირი ადვილად იკუმშება. წნევის მცირე ცვლილებაც კი საგრძნობლად ცვლის მის მოცულობას. და პირიქით, მოცულობის მნიშვნელოვანი შეცვლა არ იწვევს წნევის დიდად შეცვლას.

აირის კარგი კუმშვადობა საშუალებას გვაძლევს ის დიდი რაოდენობით შევინახოთ ბალონებში. შეკუმშული ბუნებრივი აირი მილებით ათასობით კილომეტრ მანძილზე გადაეცემა.

**აირის წნევისა და მოცულობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე.** აირის წნევა და მოცულობა მნიშვნელოვნად იზრდება ტემპერატურის აწევისას. მუდმივი წნევის პირობებში, ერთი გრადუსით გათბობისას აირის მოცულობა ასეულჯერ მეტად იზრდება, ვიდრე თხევადი და მყარი სხეულისა. აირის ყველა ჩამოთვლილი თვისება გამოყენებულია ტექნიკაში.

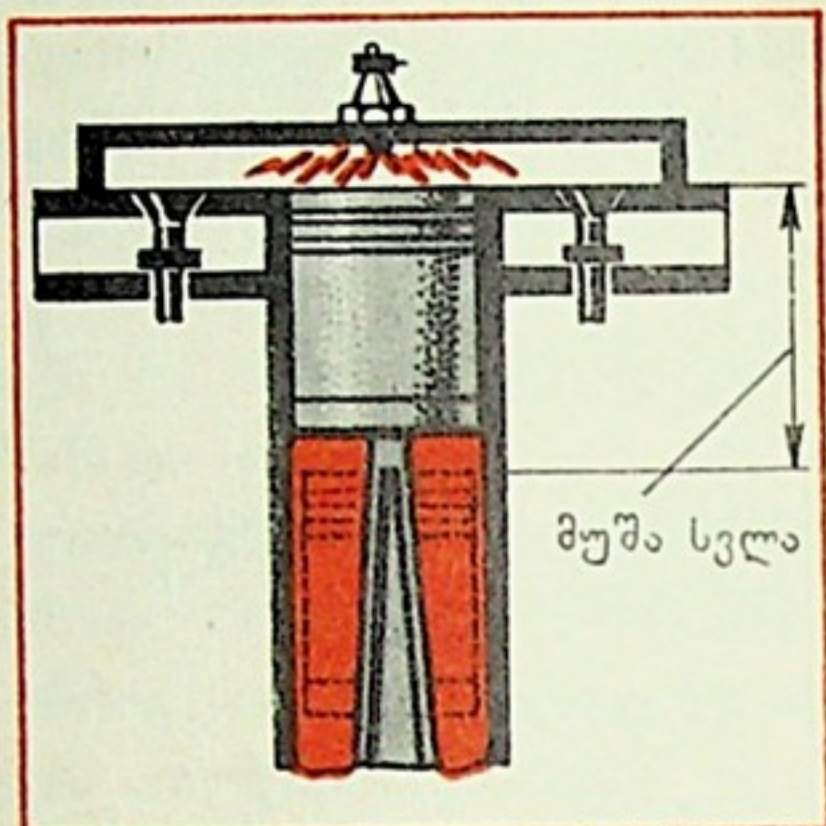
**აირი — ამორტიზატორი.** იმის გამო, რომ აირს ახასიათებს დიდი კუმშვადობა, სიმსუბუქე და წნევის რეგულირების შესაძლებლობა, ის ყველაზე სრულყოფილი ამორტიზატორია ბევრ მოწყობილობაში.

დავუკვირდეთ, როგორ მუშაობს ავტომობილის ან ველოსიპედის სალტე. როცა ბორბალი ბორცვაკს წააწყდება, სალტეში ჰაერი იკუმშება და ბიძგი, რომელსაც ბორბლის ღერძი ღებულობს, საგრძნობლად მცირდება (სურ. 31). სალტე რომ ხისტი ყოფილიყო, ღერძი ახტებოდა ბორცვაკის სიმაღლეზე.





სურ. 31.



სურ. 32.

აირი — ძრავას მუშა სხეული. ვინაიდან, აირი ძლიერ კუმშვადია, და თანაც მისი წნევა და მოცულობა მკვეთრად და მოკიდებული ტემპერატურაზე, იგი შეუცვლელი მუშა სხეულია შეკუმშული აირით მომუშავე და სითბურ, ძრავებში.

შეკუმშული აირი (მაგალითად ჰაერი) ძრავაში გაფართოებისას მუშაობას ასრულებს თითქმის მუდმივი წნევის პირობებში.

შეკუმშული ჰაერი აწვება დგუშს და აღებს ავტობუსის, ელექტრომატარებლის კარებს. შეკუმშული ჰაერით მოძრაობს საჰაერო მუხრუჭის დგუში რკინიგზის ვაგონებსა და სატვირთო მანქანებში, ასევე მოძრაობს პნევმატური ჩაქუჩი და სხვა პნევმატური ინსტრუმენტები.

კოსმოსურ ხომალდშიც კი არის მცირე რეაქტიული ძრავები, რომლებიც შეკუმშული აირით — ჰელიუმით მუშაობს. ისინი ხომალდის ორიენტირებას ახდენენ.

ავტომობილის, ტრაქტორის, თვითმფრინავის შიგაწვის ძრავებსა და რეაქტიულ ძრავებში დგუშის, ტურბინის ან რაკეტის ამოძრავებისათვის მუშა სხეულად გამოყენებულია მაღალი ტემპერატურის აირი. საწვავი ნარევის წვის დროს ცილინდრში ტემპერატურა მკვეთრად მატულობს ათას გრადუსამდე, წნევა დგუშზე იზრდება და აირი გაფართოებისას მუშაობას ასრულებს დგუშის მუშა სვლის მთელ სიგრძეზე (სურ. 32).

სითბურ ძრავაში მხოლოდ აირი შეიძლება გამოვიყენოთ მუშა სხეულად, თუ სითბეს ან მყარ სხეულს იმავე ტემპერატურამდე გავაცხელებთ, როგორც აირს აქვს, მაშინ ისინი დგუშს მხოლოდ უმნიშვნელოდ გადაადგილებენ.





ყველა ცეცხლმსროლელი იარაღი არსებითად სითბური მანქანაა. ტყვიას ან ყუმბარას იარაღის ლულიდან გამოტყორცნის იმ აირის წნევის ძალა, რომელიც ფეთქებად ნივთიერებათა წვის შედეგად მიიღება. არსებითია, რომ ეს ძალა მუშაობას ასრულებს ლულის მთელ სიგრძეზე. ამიტომაცაა ტყვიისა და ყუმბარის სიჩქარე ასე დიდი — რამდენიმე ასეული მეტრი წამში.

**გაუხშობელი აირი.** იმის გამო, რომ აირი უსაზღვრო გაფართოებისკენ ისწრაფვის, ტექნიკურად რთული ხდება აირის მიღება დაბალ წნევაზე—ვაკუუმის მდგომარეობაში (ვაკუუმის დროს აირის მოლეკულები ეჯახებიან არა ერთმანეთს — არამედ მხოლოდ ჭურჭლის კედლებს).

ჩვეულებრივი დგუშიანი ტუმბო არაეფექტურია იმის გამო, რომ აირი ჟონავს დგუშსა და ცილინდრის კედლებს შორის. ამათი საშუალებით არ ხერხდება მივიღოთ ვერცხლისწყლის სვეტის მილიმეტრის მეათედ ნაწილებზე ნაკლები წნევა. ამიტომ აირის ამოტუმბვისათვის რთული მოწყობილობები გამოიყენება. ამჟამად მიღწეულია  $10^{-10}$  პა ( $10^{-12}$  მმ ვწყ. სვ.) რიგის წნევა. ვაკუუმი უმთავრესად საჭიროა ელექტრონულ მილაკებსა და სხვა ელექტრონულ ხელსაწყოებში. დამუხტული ნაწილაკების (ელექტრონების) აირის მოლეკულებთან დაჯახება ხელს უშლის ამ ხელსაწყოების ნორმალურ მუშაობას. ზოგჯერ ვაკუუმის შექმნა გვიხდება ძალიან დიდ მოცულობაში, მაგალითად, ელემენტარულ ნაწილაკთა მაჩქარებლებში. ვაკუუმი აუცილებელია აგრეთვე მინარევებისაგან თავისუფალი ლითონების გამოდნობისათვის, თერმოიზოლაციის შექმნისათვის და ა. შ.

- ?
1. რას ეწოდება მდგომარეობის განტოლება?
  2. დაწერეთ მდგომარეობის განტოლება ნებისმიერი მასის იდეალური აირისათვის.
  3. რას უდრის აირის უნივერსალური მუდმივა?
  4. რა დამოკიდებულებაა წნევასა და მოცულობას შორის იზოთერმული პროცესის დროს?
  5. დაბაზე იდეალური აირის ორი იზოთერმა  $T_1$  და  $T_2 > T_1$  ტემპერატურებისათვის.
  6. რა დამოკიდებულებაა მოცულობასა და ტემპერატურას შორის იზობარული პროცესის დროს?
  7. რა დამოკიდებულებაა წნევასა და ტემპერატურას შორის იზოქორული პროცესის დროს?
  8. როგორ განვახორციელოთ იზოთერმული, იზობარული და იზოქორული პროცესები?
  9. როგორ ავხსნათ თვისებრივად აირის კანონები მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის მიხედვით?
  10. რატომაა, რომ სითბურ ძრავაში მხოლოდ აირს იყენებენ მუშა სხეულად?



ამოცანებში, რომელთა ამოხსნის დროსაც უნდა გამოვიყენოთ აირის კანონები, ვხვდებით შემდეგ შემთხვევებს:

ა) ცნობილია აირის საწყისი მდგომარეობის მაკროსკოპული პარამეტრები და საბოლოო მდგომარეობის ზოგიერთი პარამეტრი.

თუ საწყისი მდგომარეობიდან საბოლოოში გადასვლისას ერთ-ერთი პარამეტრი არ იცვლება, მაშინ იზოთერმული პროცესის დროს ვიყენებთ ბოილ—მარიოტის კანონს (3.6) სახით ან მისგან გამომდინარე

ექვივალენტური სახით:  $\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$ . იზობარული პროცესის დროს გა-

მოვიყენებთ გეი-ლუსაკის კანონს (3.7) ან მის ექვივალენტურს  $\frac{V_1}{V_2} =$

$= \frac{T_1}{T_2}$  იზოქორული პროცესის დროს — შარლის კანონს (3.9) ან  $\frac{p_1}{p_2} =$

$= \frac{T_1}{T_2}$  სახით.

თუ იცვლება სამივე პარამეტრი, მაშინ უნდა ვისარგებლოთ (3.4) ან (3.5) მდგომარეობის განტოლებით.

ბ) ცნობილია გარკვეულ მდგომარეობაში მყოფი აირის ზოგიერთი მაკროსკოპული პარამეტრი. უნდა ვიპოვოთ უცნობი სიდიდეები. ყველა ასეთ შემთხვევაში მოსახერხებელია მენდელეევ—კლაპეირონის განტოლებების (3.4) გამოყენება.  $pV = \frac{m}{M} RT$

გ) ხშირად საჭიროა სხვადასხვაგვარი პროცესის გამომსახველი გრაფიკების აგება. ამისათვის საჭიროა ვიცოდეთ პარამეტრების ურთიერთდამოკიდებულება. ზოგად შემთხვევაში ეს დამოკიდებულება მოცემულია მდგომარეობის განტოლებით. კერძო შემთხვევაში კი — აირის კანონებით.

ყველა ამოცანის ამოხსნისას ნათლად უნდა წარმოვიდგინოთ, თუ როგორია სისტემის საწყისი მდგომარეობა და პროცესი, რომელსაც იგი საბოლოო მდგომარეობაში გადაჰყავს.

1.  $V_1 = 0,02$  მ<sup>3</sup> ტევადობის ბალონს, რომელშიც ჰაერის წნევა  $p_1 = 4 \cdot 10^5$  პა, აერთებენ  $V_2 = 0,06$  მ<sup>3</sup> ტევადობის ბალონთან, საიდანაც ჰაერი ამოტუმბულია. ვიპოვოთ ბალონებში დამყარებული  $p$  წნევა, ტემპერატურა მუდმივია.

ამოხსნა. პირველ ბალონში მოთავსებული ჰაერი დაიკავებს  $V_1 + V_2$  მოცულობას. ბოილ—მარიოტის კანონის თანახმად,

$$\frac{p}{p_1} = \frac{V_1}{V_1 + V_2}$$



## აქედან საძიებელი წნევა

$$p = \frac{p_1 V_1}{V_1 + V_2}; \quad p = 10^5 \text{ პა.}$$

2. პირვანდელი მოცულობის რა ნაწილით გაიზრდება  $t = 27^\circ\text{C}$  ტემპერატურის აირის მოცულობა, თუ მას  $1^\circ\text{C}$ -ით გავათბობთ მუდმივი წნევის პირობებში?

ამოხსნა. ვთქვათ,  $V_1$  და  $T_1 = 273 \text{ K} + t = 300 \text{ K}$  აირის მდგომარეობის პარამეტრთა პირვანდელი მნიშვნელობებია,  $V_2$  და  $T_2 = T_1 + 1 \text{ K}$  კი — იმავე პარამეტრების საბოლოო მნიშვნელობები. გეილუსაკის კანონის თანახმად.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}.$$

ტოლობა არ შეიცვლება, თუ მარცხენა და მარჯვენა ნაწილებს გამოვაკლებთ 1-ს:

$$\frac{V_2}{V_1} - 1 = \frac{T_2}{T_1} - 1.$$

$$\text{აქედან } \frac{V_2 - V_1}{V_1} = \frac{T_2 - T_1}{T_1}; \quad V_2 - V_1 = \frac{1}{300} V_1.$$

აირის მოცულობა გაიზრდება პირვანდელის  $1/300$  ნაწილით.

8. ჰაერის სიმკვრივე ნორმალურ პირობებში ( $t_0 = 0^\circ\text{C}$  და  $p_0 = 101825$  პა ნორმალური ატმოსფერული წნევის დროს)  $\rho = 1,29$  კგ/მ<sup>3</sup>. ვიპოვოთ ჰაერის საშუალო  $M$  მოლური მასა.

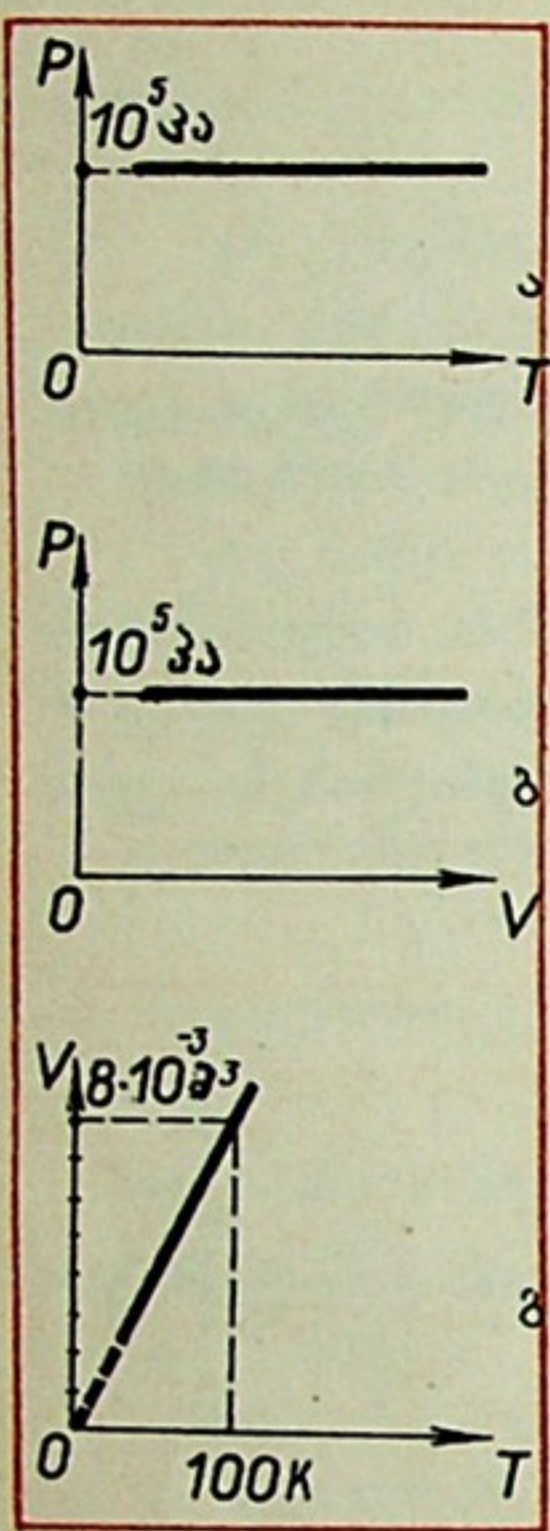
ამოხსნა. ნორმალური პირობების დროს იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლებას შემდეგი სახე აქვს:

$$p_0 V_0 = \frac{m}{M} R T_0; \quad \text{აქ } T_0 = 273 \text{ K} \text{ და } R = 8,31 \text{ ჯ/მოლი} \cdot \text{K.}$$

აქედან

$$M = \frac{m R T_0}{V_0 p_0} = \frac{\rho_0 T_0}{\rho_0} R, \quad M \approx 0,029 \text{ კგ/მოლი.}$$





სურ. 33.

4. ავადოთ 2 გ წყალბადის იზობარა  $p_0$  ნორმალური ატმოსფერული წნევისას  $p, T; p, V; V, T$  დიაგრამებზე.

ამოხსნა.  $p$ -ს  $T$ -ზე და  $p$ -ს  $V$ -ზე დამოკიდებულების გრაფიკებზე იზობარა იქნება  $T$  ღერძის ან  $V$  ღერძის პარალელური

წრფე (სურ. 33, ა და ბ), რადგან  $V = \frac{m}{M} \frac{R}{p_0} T$ ,

ამიტომ  $V$ -ს  $T$ -ზე დამოკიდებულების გრაფიკია ათვლის სიტემის სათავეზე გამავალი წრფე. გავითვალისწინოთ, რომ  $m = 0,002$  კგ,  $M = 0,002$  კგ/მოლი,  $R = 8,31$  ჯ/მოლი·K და  $p_0 \approx 10^5$  პა; მაშინ დავწერთ:  $V = BT$ , სადაც

$$B = \frac{m}{M} \frac{R}{p_0} \approx 8 \cdot 10^{-5} \frac{\text{მ}^3}{\text{K}}$$

კერძოდ, თუ  $T = 100\text{K}$ .  $V \approx 8 \cdot 10^{-3}$  მ<sup>3</sup>.  $V$ -ს  $T$ -ზე დამოკიდებულების გრაფიკი 33-ე, გ სურათზეა ნაჩვენები.

**ს ა ვ ა რ ჯ ი შ ო 8.**

1. აირი შეკუმშულია იზოთერმულად  $V_1 = 8$  ლ მოცულობიდან  $V_2 = 6$  ლ მოცულობამდე. ამ დროს წნევა გაიზარდა  $\Delta p = 4$  კპა-ით. გამოვთვალოთ საწყისი წნევა  $p_1$ .

2\*. სანგრევი ჩაქუჩების მომუშავე კომპრესორი ატმოსფეროდან  $V = 100$  ლ ჰაერს შეიწოვს წამში. რამდენი სანგრევი ჩაქუჩი იმუშავებს ამ კომპრესორით, თუ თითოეული ჩაქუჩისთვის საჭიროა წამში  $V = 100$  სმ<sup>3</sup> ჰაერი  $p = 5 \cdot 10^6$  პა წნევის პირობებში? ატმოსფერული წნევა  $p = 100$  კპა.  $\approx 10^5$  პა

3. ავადოთ იზოთერმები 2 გ წყალბადისათვის  $0^\circ\text{C}$ -ზე  $p, V; V, T$  და  $p, T$  კოორდინატებში.

4. განვსაზღვროთ დახშულ ჰურჭელში მოთავსებული აირის წნევა, თუ აირის წნევა  $1$  K-ით გათბობისას პირვანდელი წნევის  $0,4\%$ -ით იზრდება.

5. გარკვეული მასის აირის ერთი მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლისას მისი წნევა მცირდება, ტემპერატურა კი იზრდება. როგორ იცვლება მისი მოცულობა?

6. რას უდრის ერთი მოლი იდეალური აირის მოცულობა ნორმალურ პირობებში?

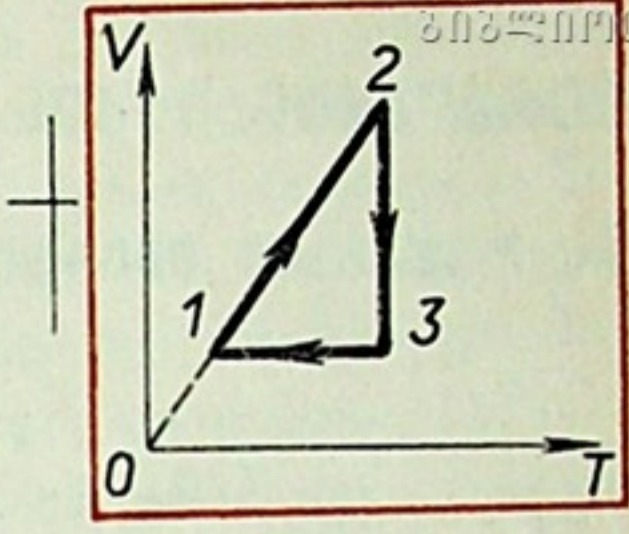
7. გამოვიანგარიშოთ ჩვენს საკლასო ოთახში მოთავსებული ჰაერის მასა  $20^\circ\text{C}$  ტემპერატურისა და ნორმალური ატმოსფერული წნევის პირობებში. ჩათვალოთ, რომ ჰაერის მოლური მასაა,  $0,029$  კგ/მოლი.



8. რაღაც აიროვანი ნივთიერების სიმკვრივეა  $2,5 \text{ კგ/მ}^3$   $10^\circ\text{C}$  ტემპერატურისა და ნორმალური ატმოსფერული წნევის დროს. განვსაზღვროთ ამ ნივთიერების მოლური მასა.

9. აირი მოთავსებულია  $0,03 \text{ მ}^3$  მოცულობის ჭურჭელში  $1,35 \cdot 10^6 \text{ პა}$  წნევისა და  $455^\circ\text{C}$  ტემპერატურის პირობებში. რა მოცულობას დაიკავებდა ეს აირი ნორმალურ პირობებში ( $t_0=0^\circ\text{C}$ ,  $p_0=101325 \text{ პა}$ )?

10. პამირზე ლენინის პიკის სიმაღლეა  $7134 \text{ მ}$ . ატმოსფერული წნევა ამ სიმაღლეზე —  $3,8 \cdot 10^4 \text{ პა}$ . განვსაზღვროთ ჰაერის წნევა პიკზე  $0^\circ\text{C}$ -ზე, თუ ჰაერის სიმკვრივე ნორმალურ პირობებში  $1,29 \text{ კგ/მ}^3$ -ია.



სურ. 34.

\*11. 34-ე სურათზე მოცემულია იდეალური აირის მდგომარეობის ცვლილების გრაფიკი  $p, V$  კოორდინატებში, წარმოვადგინოთ ეს პროცესი  $p, T$  და  $p, T$  კოორდინატებში.

12: გამოვსახოთ მოლეკულის საშუალო კვადრატული სიჩქარე აირის უნივერსალური მუდმივასა და მოლური მასის საშუალებით.

13. ჭურჭელში აირის ტემპერატურაა  $15^\circ\text{C}$  რამდენჯერ შემცირდება აირის წნევა, თუ მისი  $40\%$  გამოვა ჭურჭლიდან, ტემპერატურა კი ამ დროს  $8^\circ\text{C}$ -ით დაიწევს?

მოკლე დასკვნა

თერმოდინამიკურ პარამეტრებს შორის არსებობს კავშირი, რომელიც მდგომარეობის განტოლებით გამოისახება. ყველა საკმაოდ გაუხშობელი აირი (იდეალური აირი) ემორჩილება მენდელეევი-კლაპეირონის განტოლებას:

$$pV = \frac{m}{M}RT,$$

სადაც  $p$  წნევაა,  $V$  — მოცულობა,  $m$  — აირის მასა,  $M$  — მოლური მასა,  $T$  — აბსოლუტური ტემპერატურა,  $R=8,31 \text{ ჯ/მოლი}$ .  $K$  აირის უნივერსალური მუდმივა.

მდგომარეობის განტოლება კერძო შემთხვევის სახით შეიცავს აირის კანონებს, რომლებიც ორი თერმოდინამიკური პარამეტრის დამოკიდებულებას გამოსახავს მესამის მუდმივობისას მოცემული მასის აირისთვის, როცა  $T=\text{const}$ ,  $pV=\text{const}$  (ბოილ-მარიოტის კანონი),

როცა  $p=\text{const}$ ,  $\frac{V}{T}=\text{const}$  (გეი-ლუსაკის კანონი);

როცა  $V=\text{const}$ ,  $\frac{p}{T}=\text{const}$  (შარლის კანონი).



## 15. შინაგანი ენერგია

VIII კლასის ფიზიკის კურსიდან ვიცით, რომ ყველა მაკროსკოპულ სხეულს აქვს შინაგანი ენერგია.

მაკროსკოპულ სხეულთა შინაგანი ენერგიის ცნება უმნიშვნელოვანეს როლს ასრულებს სითბური მოვლენების გამოკვლევისას. ამას განაპირობებს ბუნების ფუნდამენტური კანონი—ენერგიის მუდმივობის კანონი.

ენერგიის მუდმივობის კანონის აღმოჩენა შესაძლო გახდა მას შემდეგ რაც დამტკიცდა, რომ მაკროსკოპულ სხეულს მექანიკური ენერგიის გარდა აქვს მის შიგნით არსებული შინაგანი ენერგიაც, ეს ენერგია შედის ბუნების ენერგეტიკულ გარდაქმნათა საერთო ბალანსში.

როცა ყინულზე მოსრიალე შაიბა ჩერდება ხახუნის ძალის მოქმედებით, მისი მექანიკური (კინეტიკური) ენერგია უბრალოდ კი არ ისპობა, არამედ გადაეცემა ყინულის და შაიბის ქაოსურად მოძრავ მოლეკულებს. მოძრაობის დროს მოხახუნე სხეულების ზედაპირთა უსწორმასწორობანი დეფორმირდება და მოლეკულების ქაოსური მოძრაობის ინტენსიურობა იზრდება. ორივე სხეული თბება, რაც სწორედ მათი შინაგანი ენერგიის გადიდებას ნიშნავს.

ძნელი არაა შევამჩნიოთ შინაგანი ენერგიის უკუგადასვლა მექანიკურში. თუ გავათბობთ წყალს თავდაცობილ სინჯარაში, წყლის შინაგანი ენერგია ზრდას იწყებს: წყალი ადუღდება და ორთქლის წნევა იმდენად გაიზრდება, რომ საცობი ამოვარდება. საცობის კინეტიკური ენერგია გაიზრდება ორთქლის შინაგანი ენერგიის ხარჯზე. გაფართოებისას წყლის ორთქლი ასრულებს მუშაობას და ცივდება. ამ დროს მისი შინაგანი ენერგია მცირდება.

მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის თვალსაზრისით მაკროსკოპული სხეულის შინაგანი ენერგია ტოლია ყველა მოლეკულის (ატომის) ქაოსური მოძრაობის კინეტიკური ენერგიისა (სხეულის მასათა ცენტრის მიმართ) და ყველა მოლეკულის ურთიერთქმედების (მაგრამ არა სხვა სხეულის მოლეკულებთან) პოტენციური ენერგიის ჯამისა<sup>1</sup> იმის

<sup>1</sup> შინაგან ენერგიაში შედის ატომებსა და მოლეკულებში ნაწილაკთა მოძრაობისა და ურთიერთქმედების ენერგია. თუ არ ხდება ტემპერატურის ძალიან დიდი ცვლილება, ეს ენერგია მუდმივია.



$$E = \frac{3}{2} RT \quad W = \frac{m}{M} N_A \quad N_A \cdot k = R \quad v = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT \quad \Delta v = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta t$$



გამო, რომ მაკროსკოპულ სხეულში უამრავი მოლეკულაა, პრაქტიკულად შეუძლებელია სხეულის შინაგანი ენერგია (ან მისი ცვლილება) გამოვთვალოთ თითოეული მოლეკულის მოძრაობისა და მათი ურთიერთმდებარეობის გათვალისწინებით. ამიტომ საჭიროა ვიცოდეთ შინაგანი ენერგიის, (ან მისი ცვლილების) საშუალო მნიშვნელობის განსაზღვრა უშუალოდ გაზომილი მაკროსკოპული პარამეტრების საშუალებით.

იდეალური ერთატომიანი აირის შინაგანი ენერგია. თავისი თვისებებით ყველაზე მარტივია ერთატომიანი აირი, რომელიც ცალკეული ატომებისაგან შედგება და არა მოლეკულებისაგან. ერთატომიანი ინერტული აირები: ჰელიუმი, ნეონი, არგონი და სხვ. გამოვთვალოთ იდეალური ერთატომიანი აირის შინაგანი ენერგია.

რადგან იდეალური აირის მოლეკულები არ ურთიერთქმედებენ (გარდა დროის იმ მცირე შუალედებისა, როცა ისინი ერთმანეთს ეჯახებიან) ამიტომ მათი პოტენციური ენერგია ნულის ტოლად ითვლება. იდეალური აირის მთელი შინაგანი ენერგია მისი მოლეკულების სითბური მოძრაობის კინეტიკური ენერგიაა.

იმისათვის, რომ გამოვთვალოთ  $m$  მასის იდეალური ერთატომიანი აირის შინაგანი ენერგია, საჭიროა ერთი ატომის საშუალო კინეტიკური ენერგია  $\bar{E} = \frac{3}{2} kT$ , გავამრავლოთ აირში ატომების რიცხვზე  $N =$

$\frac{m}{M} N_A$ . თუ გავითვალისწინებთ, რომ  $kN_A = R$ , მივიღებთ იდეალური აირის შინაგანი ენერგიის მნიშვნელობას:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT. \quad (4.1)$$

იდეალური ერთატომიანი აირის შინაგანი ენერგია მისი აბსოლუტური ტემპერატურის პირდაპირპროპორციულია.

იგი არაა დამოკიდებული მოცულობაზე ან სისტემის სხვა მაკროსკოპულ პარამეტრებზე. მოცემული მასის იდეალური აირის შინაგანი ენერგია მხოლოდ ტემპერატურის შეცვლის დროს იცვლება:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T.$$

თუ აირის მასას გავზრდით, გაიზრდება მისი შინაგანი ენერგიაც ( $U \sim m$ ). შინაგანი ენერგია დამოკიდებულია აირის გვარობაზე. ე. ი. მის მოლურ მასაზე:  $U \sim \frac{1}{M}$ , ვინაიდან, რაც მეტია  $M$ , მით ნაკლებია ატომების რიცხვი მოცემული მასის აირში.



ეს იდეალური აირი ერთატომიან აირზე უფრო რთული მოლეკულებისაგან შედგება, მაშინ მისი შინაგანი ენერგია აგრეთვე პროპორციულია აბსოლუტური ტემპერატურისა, მაგრამ პროპორციულობის კოეფიციენტი  $V$ -სა და  $T$ -ს შორის სხვაა. ეს იმით აიხსნება, რომ რთული მოლეკულები არა მარტო გადატანით მოძრაობას ასრულებენ, არამედ ბრუნვითსაც. ასეთი აირის შინაგანი ენერგია მოლეკულების გადატანითი და ბრუნვითი მოძრაობების ენერგიათა ჯამის ტოლია.

**შინაგანი ენერგიის დამოკიდებულება მაკროსკოპულ პარამეტრებზე.** დავადგინეთ, რომ იდეალური აირის შინაგანი ენერგია დამოკიდებულია ერთ პარამეტრზე — ტემპერატურაზე. იდეალური აირის შინაგანი ენერგია მოცულობაზე არ არის დამოკიდებული იმის გამო, რომ მისი მოლეკულების ურთიერთქმედების პოტენციური ენერგია ნულის ტოლად ითვლება.

რეალურ აირში, სითხესა და მყარ სხეულში მოლეკულების ურთიერთქმედების საშუალო პოტენციური ენერგია ნულის ტოლი არ არის: მართალია, აირისათვის ის ბევრად ნაკლებია საშუალო კინეტიკურ ენერგიაზე, მაგრამ თხევადი და მყარი სხეულისათვის კინეტიკურს უახლოვდება. მოლეკულების ურთიერთქმედების საშუალო პოტენციური ენერგია დამოკიდებულია ნივთიერების მოცულობაზე, რადგან მოცულობის შეცვლისას მოლეკულებს შორის საშუალო მანძილი იცვლება. მაშასადამე, ზოგად შემთხვევაში შინაგანი ენერგია დამოკიდებულია როგორც  $T$  ტემპერატურაზე, ასევე  $V$  მოცულობაზე.

რადგან  $T$ ,  $V$  და სხვა მაკროსკოპული პარამეტრების მნიშვნელობანი ცალსახად განსაზღვრავს სხეულთა მდგომარეობას, ამიტომ, ცხადია, ისინი განსაზღვრავენ მაკროსკოპული სხეულების შინაგან ენერგიასაც.

მაკროსკოპულ სხეულთა შინაგანი ენერგია  $U$  ცალსახად განისაზღვრება სხეულთა მდგომარეობის დამახასიათებელი პარამეტრებით, (ტემპერატურითა და მოცულობით).

ახლა ვნახოთ, თუ რა პროცესების შედეგად იცვლება სხეულის შინაგანი ენერგია. VIII კლასის ფიზიკის კურსიდან ცნობილია, რომ არსებობს შინაგანი ენერგიის ცვლილების ორგვარი ხერხი: მუშაობის შესრულება და სითბოს გადაცემა.

თავდაპირველად უფრო დაწვრილებით (ვიდრე VIII კლასში) განვიხილოთ მუშაობა თერმოდინამიკაში.



**მუშაობა მექანიკასა და თერმოდინამიკაში.** მუშაობა მექანიკაში განისაზღვრება როგორც ძალისა და გადაადგილების მოდულთა ნამრავლი გამრავლებული მათ შორის არსებული კუთხის კოსინუსზე. მუშაობა სრულდება მოძრავ სხეულზე ძალის მოქმედებისას და სხეულის კინეტიკური ენერჯიის ცვლილების ტოლია.

თერმოდინამიკაში სხეულის მოძრაობა არ განიხილება, როგორც ერთი მთლიანისა. აქ ლაპარაკია მაკროსკოპული სხეულის ნაწილების ურთიერთგადაადგილებაზე. ამის შედეგად იცვლება სხეულის მოცულობა, მისი სიჩქარე კი ნულის ტოლი რჩება. ამრიგად, მუშაობა თერმოდინამიკაში, განსაზღვრული ისევე როგორც მექანიკაში, ტოლია სხეულის არა კინეტიკური, არამედ შინაგანი ენერჯიის ცვლილებისა.

შინაგანი ენერჯიის ცვლილება მუშაობის შესრულების დროს. რატომაა, რომ სხეულის შეკუმშვის ან გაფართოებისას მისი შინაგანი ენერჯია იცვლება? რატომ თბება ჰაერი ველოსიპედის სალტის დატუმბვისას?

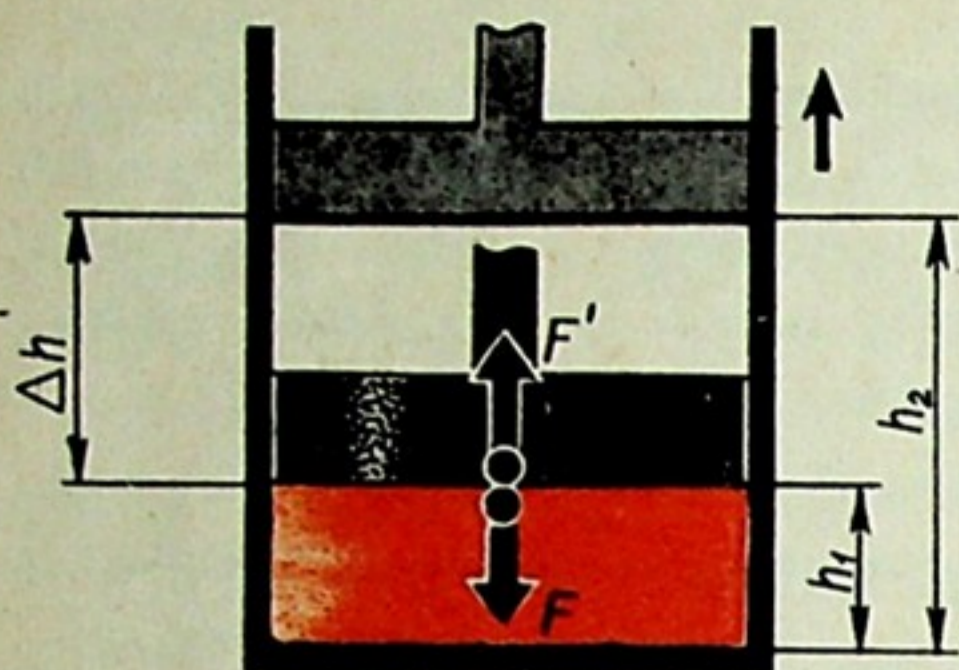
აირის შეკუმშვისას ტემპერატურის შეცვლის მიზეზი ისაა, რომ მოძრავ დგუშთან დრეკადი დაჯახებისას მოლეკულების კინეტიკური ენერჯია იცვლება. შემხვედრი მოძრაობის დროს დგუში დაჯახების პროცესში მოლეკულებს გადასცემს თავისი მექანიკური ენერჯიის ნაწილს, რის შედეგადაც აირი თბება, დგუში მოქმედებს ფეხბურთელის მსგავსად, რომელიც მოძრავ ბურთს ფეხს არტყამს და ანიჭებს საგრძნობლად მეტ სიჩქარეს, ვიდრე დარტყმამდე ჰქონდა.

თუ, პირიქით, აირი ფართოვდება, მაშინ უკანდახეულ დგუშთან დაჯახებისას მოლეკულების სიჩქარე კლებულობს და ამის გამო აირი ცივდება. ასევე იქცევა ფეხბურთელი, როცა ცდილობს ბურთი გააჩეროს ან შეანელოს მისი მოძრაობა; იგი ფეხს შეაგებებს ბურთს და მაშინვე უკან გასწევს, თითქოს გზას უთმობს.

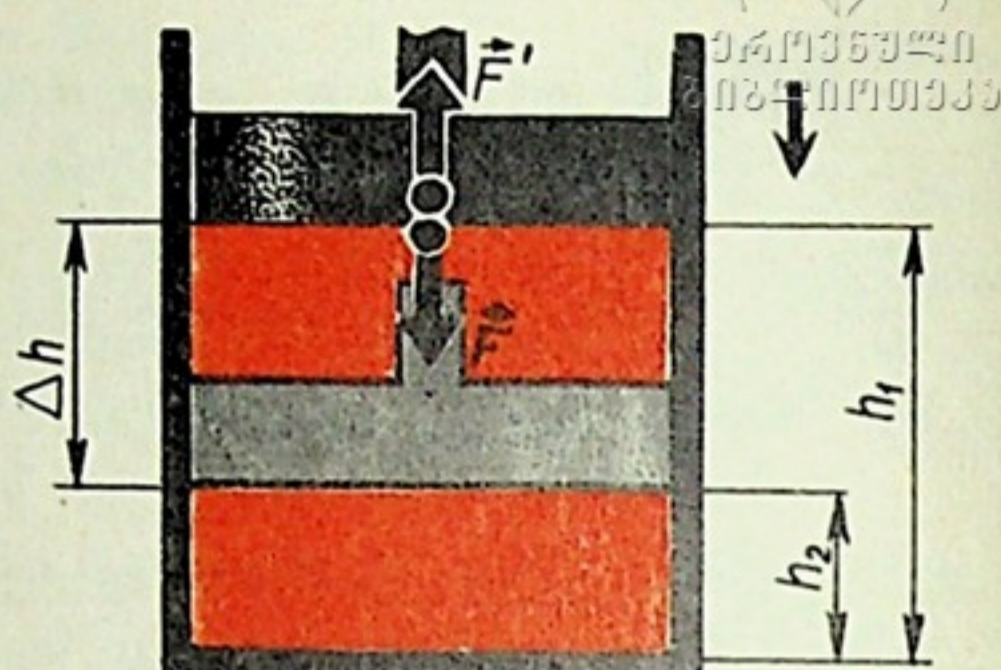
შეკუმშვის ან გაფართოებისას იცვლება მოლეკულების ურთიერთქმედების საშუალო პოტენციური ენერჯიაც, რადგან ამ დროს იცვლება საშუალო მანძილი მოლეკულებს შორის.

**მუშაობის გამოთვლა.** გავარკვიოთ, თუ როგორაა დამოკიდებული მუშაობა მოცულობის ცვლილებაზე. მაგალითად, განვიხილოთ ცილინდრში დგუშის ქვეშ მოთავსებული აირი (სურ. 35). უფრო მარტივია ჯერ გამოვთვალოთ მუშაობა არა  $F$  ძალისა, რომლითაც გარე სხეული (დგუში) მოქმედებს აირზე, არამედ თვით აირის მიერ შეს-





სურ. 35.



სურ. 36.

რულებული მუშაობა დგუშზე  $F'$  ძალით მოქმედებისას; ნიუტონის მესამე კანონის თანახმად,

$$\vec{F}' = -\vec{F}.$$

აირის მხრივ დგუშზე მოქმედი ძალის მოდული ტოლია  $F' = pS$ , სადაც  $p$  აირის წნევაა,  $S$  კი — დგუშის ფართობი. ვთქვათ, აირი ფართოვდება და დგუში გადაადგილდება  $\vec{F}'$  ძალის მიმართულებით  $\Delta h = h_2 - h_1$  მცირე მანძილზე. როცა გადაადგილება მცირეა, აირის წნევა მუდმივ სიდიდედ შეიძლება ჩავთვალოთ.

აირის მუშაობა

$$A' = F' \Delta h = pS(h_2 - h_1) = p(Sh_2 - Sh_1). \quad (4.2)$$

ეს მუშაობა შეიძლება გამოვსახოთ აირის მოცულობის ცვლილებით. საწყისი მოცულობა  $V_1 = Sh_1$ , საბოლოო  $V_2 = Sh_2$ . ამიტომ

$$A' = p(V_2 - V_1) = p\Delta V, \quad (4.3)$$

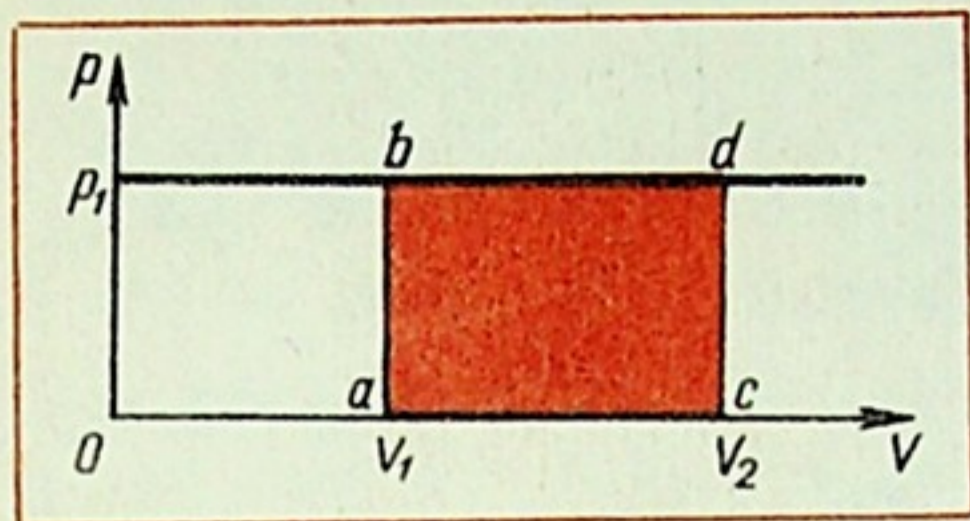
სადაც  $\Delta V = V_2 - V_1$  აირის მოცულობის ცვლილებაა.

გაფართოებისას აირი დადებით მუშაობას ასრულებს, რადგან ძალის მიმართულება და დგუშის გადაადგილების მიმართულება ერთმანეთს ემთხვევა. გაფართოების პროცესში აირი ენერჯიას გადასცემს გარემომცველ სხეულებს.

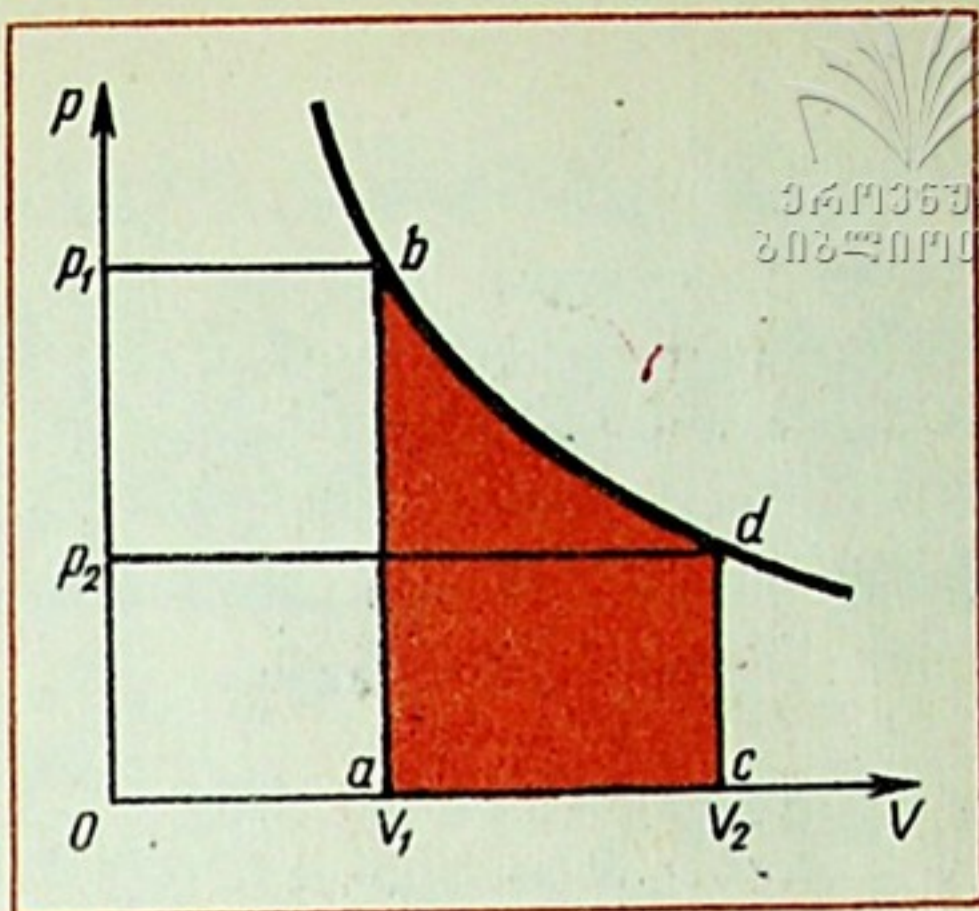
თუ აირი იკუმშება, მაშინ მუშაობის (4.3) ფორმულა მართებული რჩება, ოღონდ ახლა  $V_2 < V_1$ ; ამიტომ  $A' < 0$  (სურ. 36).

გარე სხეულების მიერ აირის მიმართ შესრულებული  $A$  მუშაობა აირის  $A'$  მუშაობისგან მხოლოდ ნიშნით განსხვავდება:  $A = -A'$ , რადგან აირზე მოქმედი  $\vec{F}$  ძალა მიმართულია  $F'$  ძალის საპირისპი-





სურ. 37.



სურ. 38.

როდ, გადაადგილება კი იგივე რჩება. ამიტომ აირზე მოქმედი გარე ძალების მიერ შესრულებული მუშაობა

$$A = -A' = -p\Delta V. \quad (4.4)$$

მინუს ნიშანი მიუთითებს, რომ აირის შეკუმშვისას, როცა  $\Delta V = V_2 - V_1 < 0$ , გარე ძალის მუშაობა დადებითია. გასაგებია ამ შემთხვევაში რატომაა  $A > 0$ : აირის კუმშვისას ძალისა და გადაადგილების მიმართულება ერთმანეთს ემთხვევა. აირის მიმართ დადებითი მუშაობის შესრულებისას გარე სხეულები მას გადასცემენ ენერგიას. აირის გაფართოების დროს, პირიქით, გარე ძალების მუშაობა უარყოფითია ( $A < 0$ ), რადგან  $\Delta V = V_2 - V_1 > 0$ . ამ შემთხვევაში ძალისა და გადაადგილების მიმართულება საპირისპიროა.

(4.3) და (4.4) გამოსახულებანი მართებულია არა მხოლოდ აირის კუმშვა-გაფართოებისას ცილინდრში, არამედ ნებისმიერი სისტემის მოცულობის მცირედ შეცვლის დროსაც. თუ პროცესი იზობარულია ( $p = \text{const}$ ), მაშინ ეს ფორმულები შეიძლება გამოვიყენოთ იმ შემთხვევებში, როცა მოცულობის ცვლილება დიდია.

**მუშაობის გეომეტრიული განმარტება.** მუდმივი წნევის დროს აირის  $A'$  მუშაობას შეიძლება მარტივი გეომეტრიული განმარტება მივცეთ.

ავაგოთ აირის წნევის მოცულობაზე დამოკიდებულების გრაფიკი (სურ. 37). აქ  $abdc$  მართკუთხედის ფართობი, რომელიც შემოსაზღვრულია  $p_1 = \text{const}$  გრაფიკით,  $V$  ღერძითა და აირის წნევის გამოსახველი  $ab$  და  $cd$  მონაკვეთებით, რიცხობრივად (4.3) მუშაობის ტოლია.

$$A' = p_1(V_2 - V_1) = |ab| \cdot |cd|.$$

ზოგად შემთხვევაში, როცა აირის მოცულობა ნებისმიერად იცვლება, წნევა არ რჩება უცვლელი. მაგალითად, იზოთერმული პროცესის დროს, ის იცვლება მოცულობის უკუპროპორციულად (სურ. 38).



ამ შემთხვევაში მუშაობის გამოთვლისათვის საჭიროა მოცულობის მთელი ცვლილება დავყოთ მცირე ნაწილებად, გამოვთვალოთ მენტარული (მცირე) მუშაობები, შემდეგ კი ყველა შევკრიბოთ. აირის მუშაობა რიცხობრივად კვლავ იმ ფართობის ტოლი იქნება, რომელიც შემოსაზღვრულია ( $pV$ ) დამოკიდებულების გრაფიკით,  $V$  ღერძით და  $ab$  და  $cd$  მონაკვეთებით, რომლებიც  $p_1$  და  $p_2$  საწყის და საბოლოო წნევებს გამოსახავს.

- 9
1. რა ფიზიკურ სიდიდეებზეა დამოკიდებული სხეულის შინაგანი ენერგია?
  2. ნოიყვანეთ მაგალითები ტექნიკიდან და ყოფა-ცხოვრებიდან, როცა მექანიკური ენერგია გარდაიქმნება შინაგანად და პირიქით.
  3. რას უდრის იდეალური ერთატომიანი აირის შინაგანი ენერგია?
  4. ერთნაირი ტემპერატურის დროს რომელი აირის მოლს აქვს მეტი შინაგანი ენერგია: წყალბადისას თუ ჰელიუმისას?
  5. რატომ თბება აირი შეკუმშვისას?
  6. რას უდრის მუშაობა, რომელსაც გარე ძალები ასრულებს სხეულთა კუმშვისა და გაფართოებისას?

## 17. სითბოს რაოდენობა<sup>1</sup>

ცილინდრში აირის შინაგანი ენერგია შეიძლება შევცვალოთ არა მარტო მუშაობის შესრულებით, არამედ აირის გათბობითაც (სურ. 39). თუ დგუშს დავამაგრებთ, მაშინ აირის მოცულობა არ შეიცვლება, მაგრამ ტემპერატურა და, მაშასადამე, შინაგანი ენერგია გაიზრდება. მუშაობის შესრულების გარეშე ერთი სხეულიდან მეორეზე ენერგიის გადაცემის პროცესს თბოცვლა ან თბოგადაცემა ეწოდება.

(**ენერგიას, რომელიც სხეულს გადაეცემა თბოცვლის შედეგად, სითბოს რაოდენობა ეწოდება.**) სითბოს რაოდენობას უწოდებენ აგრეთვე ენერგიას, რომელსაც სხეული გასცემს სითბოს ცვლის პროცესში.)

**თბოცვლის მოლეკულური სურათი.** თბოცვლისას სხეულთა შორის საზღვარზე ცივი სხეულის ნელა მოძრავი მოლეკულები ურთიერთქმედებენ ცხელი სხეულის უფრო სწრაფად მოძრავ მოლეკულებთან. ამის შედეგად მოლეკულათა კინეტიკური ენერგია თანაბრდება, ცივი სხეულის მოლეკულათა სიჩქარე იზრდება, ცხელისა კი მცირდება.

თბოცვლის დროს ერთი სახის ენერგია არ გარდაიქმნება მეორე სახის ენერგიად: ცხელი

<sup>1</sup> ამ პარაგრაფში მოკლედ ვიმეორებთ სითბოს რაოდენობის ცნებას, რომელიც ფიზიკის VIII კლასის კურსიდანაა ცნობილი.



სხეულის შინაგანი ენერჯიის ნაწილი გადაეცემა ცივ სხეულს.

სითბოს რაოდენობა და სითბოტევადობა. VIII კლასის ფიზიკის კურსიდან ცნობილია, რომ  $t_1$  ტემპერატურიდან  $t_2$  ტემპერატურამდე გასათბობად საჭიროა  $m$  მასის სხეულს გადაეცეთ სითბოს რაოდენობა:

$$Q = cm(t_2 - t_1) = cm\Delta t. \quad (4.5)$$

გაცივების დროს სხეულის საბოლოო  $t_2$  ტემპერატურა ნაკლებია საწყის  $t_1$  ტემპერატურაზე და სხეულის მიერ გაცემული სითბოს რაოდენობა უარყოფითია.

(4.5) ფორმულაში  $c$  სიდიდეს კუთრი სითბოტევადობა ეწოდება. კუთრი სითბოტევადობა არის სითბოს რაოდენობა, რომელსაც დებულობს ან გასცემს 1 კგ ნივთიერება ტემპერატურის 1 K-ით ცვლილებისას.

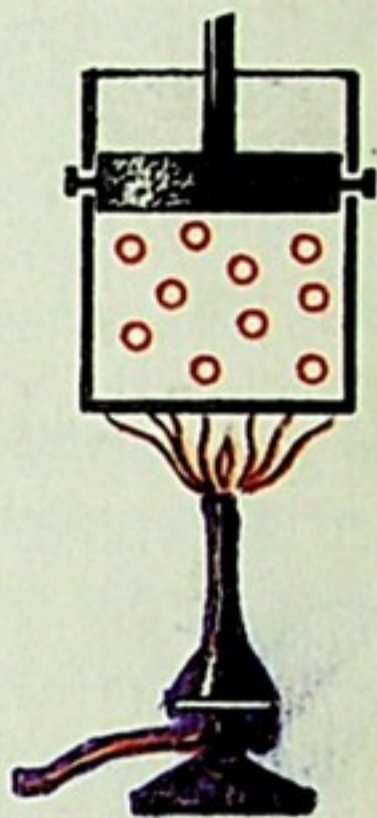
კუთრი სითბოტევადობას გამოსახვენ ჯოულის შეფარდებით კილოგრამისა და კელვინის ნამრავლთან. სხვადასხვა სხეულისათვის სხვადასხვა რაოდენობის ენერჯიაა საჭირო ტემპერატურის 1 K-ით ასაწევად. მაგალითად, წყლის კუთრი სითბოტევადობაა  $4190 \text{ ჯ}/(\text{კგ} \cdot \text{K})$ , სპილენძისა კი  $380 \text{ ჯ}/(\text{კგ} \cdot \text{K})$ .

კუთრი სითბოტევადობა დამოკიდებულია არა მარტო ნივთიერების თვისებებზე, არამედ იმაზეც, თუ რა პროცესის დროს ხორციელდება თბოგადაცემა. თუ აირს გავათბობთ მუდმივი წნევის დროს, ის გაფართოვდება და შეასრულებს მუშაობას.  $1^\circ\text{C}$ -ით გათბობისათვის აირს მუდმივი წნევის პირობებში უფრო მეტი სითბოს რაოდენობა უნდა გადაეცეს, ვიდრე მუდმივი მოცულობის პირობებში.

გათბობის დროს თხევადი და მყარი სხეულები უმნიშვნელოდ ფართოვდება, ამიტომ მათი კუთრი სითბოტევადობა მუდმივი მოცულობისა და წნევის პირობებში მცირედ განსხვავდება ერთმანეთისაგან.

ორთქლადქცევის კუთრი სითბო. ორთქლად გადაქცევისათვის საჭიროა სითხეს გადაეცეთ განსაზღვრული სითბოს რაოდენობა. ამ დროს სითხის ტემპერატურა არ იცვლება. მუდმივ ტემპერატურაზე სითხის ორთქლად გადაქცევისას მოლეკულების კინეტიკური ენერჯია არ იზრდება, მაგრამ მატულობს მათი პოტენციური ენერჯია. ეს გასაგებია, რადგან მოლეკულებს შორის საშუალო მანძილი აირში გაცილებით მეტია, ვიდრე სითხეში.

სითბოს რაოდენობას, რომელიც საჭიროა მუდმივი ტემპერატურის დროს 1 კგ სითხის ორთქლად გადაქცევისათვის, ორთქლადქცე-



სურ. 39.



ვის კუთრი სითბო ეწოდება. ამ სიდიდეს  $r$  ასოთი აღნიშნავენ და  $\zeta/\text{კგ}$ -ით გამოსახავენ.

ეროვნული  
ბიბლიოთეკა

წყლის ორთქლადქცევის კუთრი სითბო ძალიან დიდია.  $r = 2,256 \cdot 10^6 \text{ } \zeta/\text{კგ}$   $100^\circ\text{C}$  ტემპერატურაზე. სხვა სითბეების (სპირტი, ეთერი, ვერცხლისწყალი, ნავთი და სხვ.) ორთქლადქცევის კუთრი სითბო 3—10-ჯერ ნაკლებია.  $m$  მასის სითხის ორთქლადქცევისათვის საჭირო სითბოს რაოდენობა:

$$Q_m = rm. \quad (4.6)$$

ორთქლის კონდენსაციის დროს იგივე სითბოს რაოდენობა გამოიყოფა:

$$Q_s = -rm. \quad (4.7)$$

დნობის კუთრი სითბო. კრისტალური სხეულის დნობის დროს მთელი გადაცემული სითბო მოლეკულების პოტენციური ენერჯიის გაზრდას ხმარდება. მოლეკულების კინეტიკური ენერჯია არ იცვლება, რადგან დნობა ხდება მუდმივ ტემპერატურაზე.

$\lambda^1$  სითბოს რაოდენობას, რომელიც საჭიროა დნობის ტემპერატურაზე 1 კგ კრისტალური ნივთიერების იმავე ტემპერატურის სითხედ გადაქცევისათვის, დნობის კუთრი სითბო ეწოდება.

1 კგ ნივთიერების კრისტალიზაციის დროს ზუსტად იმავე რაოდენობის სითბო გამოიყოფა. ყინულის დნობის კუთრი სითბო საკმაოდ დიდია:  $\lambda = 3,34 \cdot 10^5 \text{ } \zeta/\text{კგ}$ .

$m$  მასის კრისტალური სხეულის გასადნობად საჭირო სითბოს რაოდენობა

$$Q_{დნ} = \lambda m. \quad (4.8)$$

სხეულის კრისტალიზაციის დროს გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა

$$Q_{კრ} = -\lambda m. \quad (4.9)$$

- 9 1. რას ეწოდება სითბოს რაოდენობა? 2. რაზეა დამოკიდებული ნივთიერების კუთრი სითბოტევადობა? 3. რას ეწოდება ორთქლადქცევის კუთრი სითბო? 4. რას ეწოდება დნობის კუთრი სითბო? 5. რა შემთხვევებშია უარყოფითი გადაცემული სითბოს რაოდენობა?

## 18. თერმოდინამიკის პირველი კანონი

ენერჯიის მუდმივობის კანონი. XIX საუკუნის შუა წლებში უამრავი ცდით დამტკიცდა, (რომ მექანიკური ენერჯია არასოდეს არ იკარგება უკვალოდ.) მაგალითად, ურო ეცემა ტყვიის ნაჭერს და ტყვია თბება სრულიად განსაზღვრული ზომით.

უამრავი დაკვირვებისა და ცდისეული ფაქტების განზოგადების საფუძველზე (ჩამოყალიბდა (ენერჯიის მუდმივობის კანონი.)

<sup>1</sup>  $\lambda$  — ბერძნული ასო, იკითხება: „ლამბდა“.



ენერგია ბუნებაში არც წარმოიქმნება არაფრისგან, და არც ქრება. ენერგიის რაოდენობა უცვლელია, იგი მხოლოდ ერთი ფორმიდან მეორედ გარდაიქმნება.)

ენერგიის მუდმივობის კანონი მართავს ბუნების ყველა მოვლენას და აკავშირებს მათ, იგი სრულდება ყოველთვის და აბსოლუტურად ზუსტად. არაა ცნობილი მისი შეუსრულებლობის არც ერთი შემთხვევა.

(XIX საუკუნის შუა წლებში ეს კანონი აღმოაჩინეს გერმანელმა მეცნიერმა, განათლებით ექიმმა რ. მაიერმა (1814—1878) და ინგლისელმა მეცნიერმა ჯ. ჯოულმა (1818—1889), ხოლო ყველაზე სრულად ჩამოყალიბდა გერმანელი მეცნიერის გ. ჰელმჰოლცის (1821—1894) შრომებში.

თერმოდინამიკის პირველი კანონი. (ენერგიის მუდმივობისა და გარდაქმნის კანონს) რომელიც ვრცელდება სითბურ მოვლენებზე, თერმოდინამიკის პირველი კანონი ეწოდება.)

თერმოდინამიკაში განიხილება სხეულები, რომელთა სიმძიმის ცენტრის მდებარეობა პრაქტიკულად უცვლელია. სხეულების მექანიკური ენერგია მუდმივი რჩება, შეიძლება შეიცვალოს მხოლოდ შინაგანი ენერგია.

აქამდე განხილულ პროცესებში სისტემის შინაგანი ენერგია იცვლებოდა მუშაობის შესრულების ან გარემო სხეულებთან თბოცვლის ხარჯზე. ზოგად შემთხვევაში ერთი მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლის დროს სისტემის შინაგანი ენერგია ერთდროულად იცვლება როგორც მუშაობის, ისე სითბოს გადაცემის შედეგად. თერმოდინამიკის პირველი კანონი სწორედ ასეთი ზოგადი შემთხვევებისთვის არის ჩამოყალიბებული:

(ერთი მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლის დროს სისტემის შინაგანი ენერგიის ცვლილება ტოლია გარე ძალთა მუშაობისა და სისტემაზე გადაცემული სითბოს რაოდენობის ჯამისა:)

$$\Delta U = A + Q \quad (4.10)$$

კერძო შემთხვევაში, როცა სისტემა იზოლირებულია, მასზე არ სრულდება მუშაობა ( $A=0$ ) და არ ხდება თბოცვლა სისტემასა და გარე სხეულებს შორის ( $Q=0$ ). თერმოდინამიკის პირველი კანონის თანახმად, ამ დროს  $\Delta U = U_2 - U_1 = 0$  ანუ  $U_1 = U_2$ . იზოლირებული სისტემის შინაგანი ენერგია უცვლელი რჩება (მუდმივია).

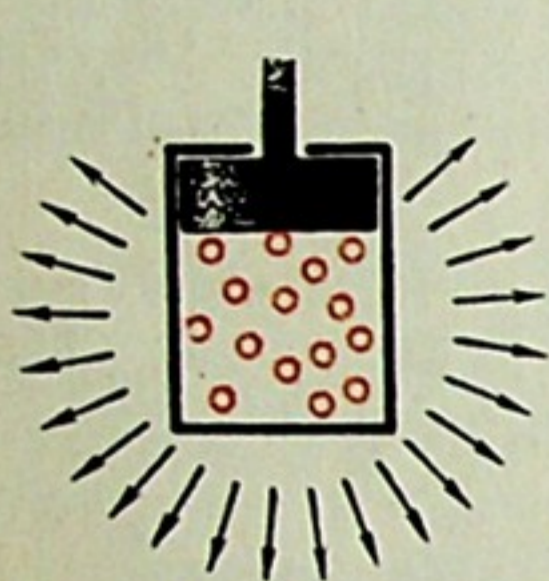
ხშირად სისტემის მიმართ გარე ძალების  $A$  მუშაობის ნაცვლად განიხილავენ სისტემის  $A'$  მუშაობას გარე სხეულების მიმართ. თუ



გავითვალისწინებთ, (რომ  $A' = -A$  (იხ. § 16), თერმოდინამიკის პირველი კანონი (4.10) ასე გამოისახება:)

$$(Q = \Delta U + A') \quad (4.11)$$

სისტემაზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა ხმარდება შინაგანი ენერჯიის ცვლილებას და სისტემის მიერ გარე სხეულების მიმართ მუშაობის შესრულებას.



გადაცემული სითბო  
სურ. 40.



თბოსაიზოლაციო  
გარსი  
სურ. 41.

მუდმივი ძრავას შექმნის შეუძლებლობა. თერმოდინამიკის პირველი კანონიდან გამომდინარეობს, რომ შეუძლებელია შეიქმნას მუდმივი ძრავა—მოწყობილობა, რომელსაც შეუძლია განუსაზღვრელი რაოდენობის მუშაობა შეასრულოს საწვავის ან სხვა რაიმე მასალების დაუხარჯავად. თუ სისტემას არ გადაეცემა სითბო ( $Q=0$ ), მაშინ (4.11) ფორმუ-

ლის თანახმად,  $A'$  მუშაობა შეიძლება შესრულდეს მხოლოდ შინაგანი ენერჯიის შემცირების ხარჯზე:  $A' = -\Delta U$ . როგორც კი ენერჯიის მარაგი ამოიწურება, ძრავა შეწყვეტს მუშაობას.

**მუშაობა და სითბოს რაოდენობა ენერჯიის ცვლილების პროცესის მახასიათებელი.** მოცემულ მდგომარეობაში სისტემას ყოველთვის აქვს გარკვეული შინაგანი ენერჯია, მაგრამ არ შეიძლება ითქვას, რომ ის შეიცავს განსაზღვრულ სითბოს რაოდენობას ან მუშაობას. როგორც მუშაობა, ისე სითბოს რაოდენობა ახასიათებს ამა თუ იმ პროცესის შედეგად სისტემის ენერჯიის ცვლილებას.

სისტემის შინაგანი ენერჯია ერთნაირად შეიძლება იცვლებოდეს როგორც სისტემის მიერ მუშაობის შესრულების, ისე გარემო სხეულებისათვის სითბოს რაღაც რაოდენობის გადაცემის ხარჯზე. გახურებულ აირს ცილინდრში შეუძლია ენერჯია დაკარგოს გაცივებისას, მუშაობის შესრულების გარეშე (სურ. 40). მაგრამ მას შეუძლია ზუსტად ასეთივე ზომის ენერჯია დაკარგოს დგუშის გადაადგილებისას, გარემო სხეულისათვის სითბოს გადაცემის გარეშე. ამისათვის აუცილებელია ცილინდრის კედლები და დგუში სითბოშეუღწევი იყოს (სურ. 41).

შემდეგში ფიზიკის მთელი კურსის მანძილზე გავეცნობით ენერჯიის სხვადასხვა ფორმას, მათი გარდაქმნისა და გადაცემის ხერხებს.



## 19. თერმოდინამიკის პირველი კანონის გამოყენება სხვადასხვა პროცესისათვის



თერმოდინამიკის პირველი კანონის საშუალებით შეგვიძლია მნიშვნელოვანი დასკვნები გავაკეთოთ პროცესების ხასიათის შესახებ. განვიხილოთ სხვადასხვა პროცესი, რომლის დროსაც ერთ-ერთი ფიზიკური სიდიდე უცვლელი რჩება (იზოპროცესები). ვთქვათ, სისტემა იდეალური აირია. ეს ყველაზე მარტივი შემთხვევაა.

**იზოქორული პროცესი.** იზოქორული პროცესის დროს მოცულობა არ იცვლება და ამიტომ აირის მუშაობა ნულის ტოლია. (4.11) განტოლების თანახმად, სისტემის ენერჯიის ცვლილება ტოლია გადაცემული სითბოს რაოდენობისა:

$$\Delta U = Q. \quad (4.12)$$

თუ აირი თბება,  $Q > 0$  და  $\Delta U > 0$ , მისი შინაგანი ენერჯია იზრდება. აირის გაცივების დროს  $Q < 0$  და  $\Delta U = U_2 - U_1 < 0$ , შინაგანი ენერჯიის ცვლილება უარყოფითია და აირის შინაგანი ენერჯია მცირდება.

**იზოთერმული პროცესი.** იზოთერმული პროცესის ( $T = \text{const}$ ) დროს იდეალური აირის შინაგანი ენერჯია (4.1) არ იცვლება. (4.11) ფორმულის თანახმად, სისტემისათვის გადაცემული მთელი სითბოს რაოდენობა ხმარდება მუშაობის შესრულებას

$$Q = A'. \quad (4.13)$$

თუ აირი სითბოს ღებულობს ( $Q > 0$ ), მაშინ ის ასრულებს დადებით მუშაობას  $A' > 0$ . თუ, პირიქით, აირი სითბოს გადასცემს გარემოს (თერმოსტატს), მაშინ  $Q < 0$  და  $A' < 0$ . ამ შემთხვევაში გარე ძალების მიერ აირის მიმართ შესრულებული მუშაობა დადებითია.

**იზობარული პროცესი.** იზობარული პროცესის დროს სისტემაზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა (4.11) ფორმულის თანახმად, შინაგანი ენერჯიის ცვლილებასა და მუშაობის შესრულებას ხმარდება მუდმივი წნევის პირობებში.

თუ აირი თბება ( $Q > 0$ ), ის ფართოვდება და დადებით მუშაობას ასრულებს ( $A' > 0$ ). ერთდროულად იზრდება მისი შინაგანი ენერჯია ( $\Delta U > 0$ ).

გაცივების დროს ( $Q < 0$ ) აირი იკუმშება და მის მიმართ გარე ძალების მიერ შესრულებული მუშაობა დადებითია ( $A > 0$ ), მისი შინაგანი ენერჯია კლებულობს ( $\Delta U < 0$ ).

**ადიაბატური პროცესი.** ზემოთ განხილულ იზოპროცესებს გავეცანით მესამე თავში, თერმოდინამიკის პირველი კანონის შესწავლაში. ახლა ვილაპარაკოთ პროცესზე ისეთ სისტემაში, რომელიც



გარემო სხეულებთან თბოცვლაში არ მონაწილეობს, თბოიზო-  
ლირებულ სისტემაში მიმდინარე პროცესს ადი-  
აბატური ეწოდება.

ადიაბატური პროცესის დროს  $Q=0$  და (4.10) ფორმულის თა-  
ნახმად, შინაგანი ენერჯია იცვლება მხოლოდ მუშაობის შესრულების  
ხარჯზე

$$\Delta U = A. \quad (4.14)$$

რა თქმა უნდა, შეუძლებელია სისტემას შემოვავლოთ ისეთი გარ-  
სი, რომელიც აბსოლუტურად გამორიცხავს თბოგადაცემას. მაგ-  
რამ რიგ შემთხვევებში რეალური პროცესები შეიძლება ადიაბატურ-  
თან ძალიან მიახლოებულად ჩავთვალოთ. ამისათვის ის უნდა მიმდი-  
ნარეობდეს საკმაოდ სწრაფად, რათა პროცესის განმავლობაში არ  
მოხდეს შესამჩნევი თბოცვლა სისტემასა და გარემოს შორის.

(4.14) განტოლების თანახმად, სისტემის მიმართ დადებითი მუშა-  
ობის შესრულების დროს, მაგალითად, აირის შეკუმშვის დროს, მისი  
შინაგანი ენერჯია იზრდება. ეს ნიშნავს აირის ტემპერატურის მომა-  
ტებას. პირიქით, გაფართოებისას თვით აირი ასრულებს დადებით  
მუშაობას ( $A' > 0$ ) და მისი შინაგანი ენერჯია კლებულობს — აირი  
ცივდება.

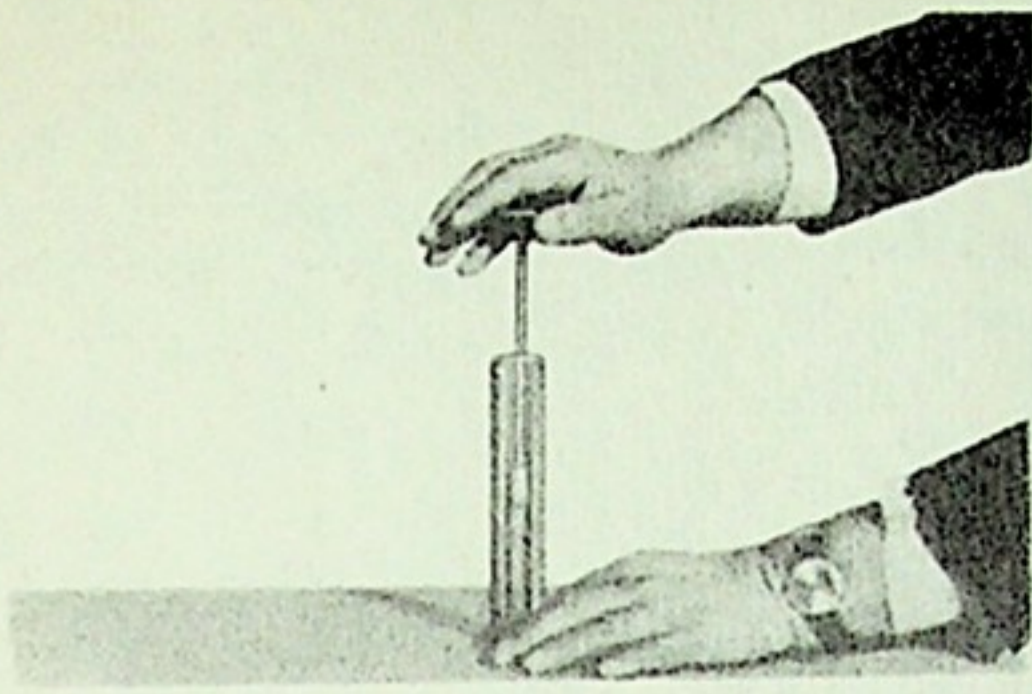
სწრაფი კუმშვისას აირის გათბობის დემონსტრირება შეიძლება  
გამჭვირვალე ცილინდრის საშუალებით, რომელსაც მჭიდროდ მორგე-  
ბული დგუში აქვს (სურ. 42). თუ ცილინდრის ფსკერზე მოვათავსებთ  
ეთერში დასველებულ ბამბას და დგუშს სწრაფად დავწევთ ქვევით,  
ეთერის ორთქლი ააღდება. სწრაფი შეკუმშვის დროს ჰაერის გახუ-  
რებას იყენებენ დიზელის ძრავაში. ამ ძრავაში არ არის საწვავი  
ნარევის ანთების სისტემა, რაც აუცილებელია ჩვეულებრივი შიგა-  
წვის ბენზინიანი ძრავებისათვის. ცილინდრში შეიწოვება არა საწვავი  
ნარევი, არამედ ატმოსფერული ჰაერი. კუმშვის ტაქტის ბოლოს სპე-  
ციალური მფრქვევანას საშუალებით ცილინდრში შეშხაპუნდება თხე-  
ვადი საწვავი (სურ. 43). ამ მომენტში ჰაერის ტემპერატურა ისე დი-  
დია, რომ საწვავი ააღდება.

ჰაერის მკუმშავი მძლავრი კომპრესორების მუშაობის დროს ჰა-  
ერის ტემპერატურა იმდენად იზრდება, რომ საჭიროა ცილინდრების  
გამაგრილებელი სპეციალური სისტემის გამოყენება.

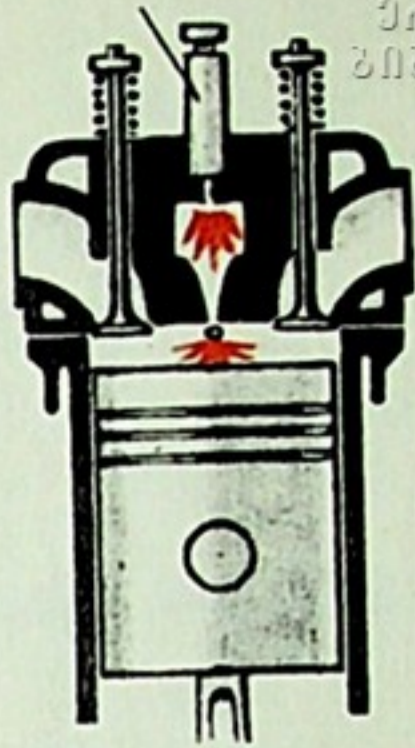
გაფართოებისას აირის ადიაბატური გაცივება გამოყენებულია  
აირთა გამათხევადებელ მანქანებში.

ადიაბატური გაფართოებისას აირის გაცივება გრანდიოზული  
მასშტაბით ხდება დედამიწის ატმოსფეროში. გამთბარი ჰაერი ადის  
მაღლა და ფართოვდება, რადგან ატმოსფერული წნევა მცირდება სი-





სურ. 42.



სურ. 43.

მალის ზრდასთან ერთად. ჰაერის გაფართოებას თან ახლავს საგრძნობი გაცივება, რის შედეგადაც წყლის ორთქლი კონდენსირდება და წარმოიქმნება ღრუბელი.

**თბოცვლა ჩაკეტილ სისტემაში.** განვიხილოთ თბოცვლა ისეთი სისტემის შიგნით, რომელიც თავიდან სხვადასხვა ტემპერატურის სხეულებისაგან შედგება (მაგალითად, თბოცვლა ჭურჭელში მოთავსებულ წყალსა და წყალში ჩაშვებულ რკინის ცხელ ბირთვის შორის). ჩავთვალოთ, რომ სისტემა საკმაოდ იზოლირებულია გარემოდან და მისი შინაგანი ენერჯია არ იცვლება (ჩაკეტილი სისტემა). სისტემის შიგნით არავითარი მუშაობა არ სრულდება. მაშინ თერმოდინამიკის პირველი კანონის (4.10) თანახმად, სისტემის რომელიმე სხეულის ენერჯიის ცვლილება ტოლია სითბოს რაოდენობისა, რომელიც ამ სხეულმა გასცა ან მიიღო სისტემის შიგნით სითბური წონასწორობის დამყარებამდე:  $\Delta U_i = Q$ , თუ შევკრებთ მსგავს სიდიდეებს სისტემის ყველა სხეულისათვის და გავითვალისწინებთ, რომ შინაგანი ენერჯია არ იცვლება ( $\Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \dots = 0$ ), მივიღებთ შემდეგ განტოლებას:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = 0. \quad (4.15)$$

ამ განტოლებას სითბური ბალანსის განტოლება ეწოდება. აქ  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots$  სხეულების მიერ მიღებული ან გაცემული სითბოს რაოდენობებია. ეს სიდიდეები გამოისახება (4.5) ფორმულით ან (4.6), (4.7), (4.8), (4.9) ფორმულებით თუ ნივთიერება თბოცვლისას თხევადი მდგომარეობიდან გადავა აირადსა ან მყარ მდგომარეობაში (ან, პირიქით, მიიღება სითხე).

სითბური ბალანსის განტოლება პირველად აღმოაჩინეს ექსპერიმენტულად, როცა სხეულთა შორის თბოცვლას აკვირდებოდნენ კალორიმეტრში (ე. ი. ხელსაწყოში, რომელიც მაქსიმალურად იზოლირებულია გარემომცველი სხეულების გავლენისაგან). კალორიმეტრის მოწყობილობას VIII კლასში გავეცანით.





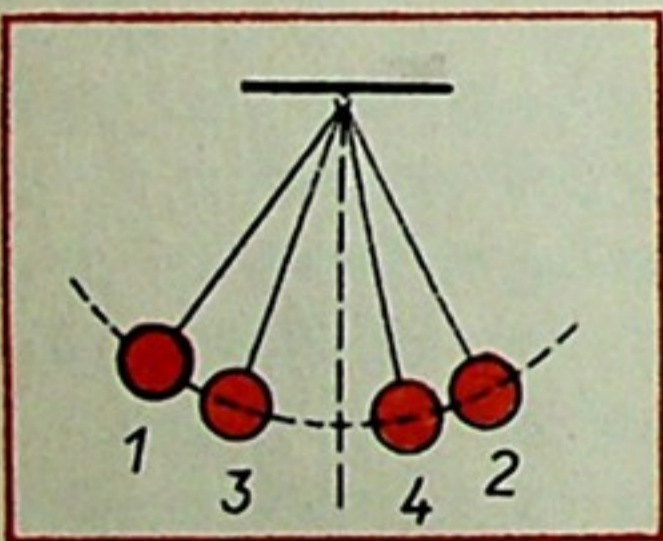
- 7
1. როგორ გამოითქმის თერმოდინამიკის პირველი კანონი?
  2. რა შემთხვევაშია შინაგანი ენერჯიის ცვლილება უარყოფითი?
  3. რა შემთხვევაში იქნება აირის მუშაობა მეტი:  $V_1$  მოცულობიდან  $V_2$ -მდე იზოთერმული გაფართოებისას, თუ იზობარული გაფართოებისას?
  4. რატომ არ შეიძლება ეთქვათ, რომ სისტემას აქვს სითბოს რაოდენობის ან მუშაობის განსაზღვრული მარაგი?
  5. როგორ პროცესს ეწოდება ადიაბატური?
  6. დაწერეთ სითბური ბალანსის განტოლება.

## 20. პროცესების შეუქცევადობა ბუნებაში

ენერჯიის მუდმივობის კანონი ამტკიცებს, რომ ენერჯიის რაოდენობა ნებისმიერი გარდაქმნისას მუდმივი რჩება. მაგრამ ის არაფერს ამბობს იმის შესახებ, თუ რა ენერგეტიკული გარდაქმნებია შესაძლებელი. ბევრი პროცესი, რომლებიც სავსებით დასაშვებია ენერჯიის მუდმივობის კანონის მიხედვით, სინამდვილეში არ მიმდინარეობს.

**შეუქცევადი პროცესის მაგალითები.** ცხელი სხეული თანდათან ცივდება, რადგან ენერჯიას გადასცემს უფრო ცივ გარემომცველ სხეულებს. უკუპროცესი—სითბოს გადაცემა ცივი სხეულიდან ცხელზე არ ხდება, თუმცა იგი არ ეწინააღმდეგება ენერჯიის მუდმივობის კანონს.

სურ. 11



მეორე მაგალითი. წონასწორობიდან გამოყვანილი ქანქარას რხევა მიიღწევა. (სურ. 44; 1, 2, 3, 4 — ქანქარას თანმიმდევარი მდებარეობანია წონასწორობიდან მაქსიმალური გადახრისას). ხახუნის ძალთა მუშაობის ხარჯზე მექანიკური ენერჯია კლებულობს, ქანქარასა და გარემომცველი ჰაერის ტემპერატურა (და, მაშასადამე, მათი შინაგანი ენერჯიაც) რამდენადმე მატულობს. ენერგეტიკულად

დასაშვებია შებრუნებული პროცესიც, როცა ქანქარას რხევის ამპლიტუდა იზრდება თვით ქანქარასა და გარემოს გაცივების ხარჯზე. მაგრამ ასეთი პროცესი არასოდეს არ ხდება. მექანიკური ენერჯია თავისთავად გადადის შინაგანში, მაგრამ არასოდეს პირუკუ. ამ დროს სხეულის მოწესრიგებული მოძრაობა, როგორც მთლიანისა, გარდაიქმნება შემადგენელი მოლეკულების უწესრიგო, სითბურ მოძრაობად.

**ზოგადი დასკვნა ბუნებაში პროცესთა შეუქცევადობის შესახებ.** სითბოს გადასვლა ცხელი სხეულიდან ცივში და მექანიკური ენერჯიის გარდაქმნა შინაგან ენერჯიად შეუქცევად პროცესთა ყველაზე ტიპური მაგალითებია, მსგავსი მაგალითები უამრავია. ყველა მათგან-





ნიდან ჩანს, რომ ბუნებაში პროცესებს გარკვეული მიმართულება აქვს, რასაც თერმოდინამიკის პირველი კანონი არ ასახავს. ბუნებაში ყველა მაკროსკოპული პროცესი მხოლოდ ერთი გარკვეული მიმართულებით მიმდინარეობს. შებრუნებულ მიმართულებით ეს პროცესები თავისთავად არ შესრულდება. ბუნებაში ყველა პროცესი შეუქცევადია, მათ შორის თვით ყველაზე ტრაგიკულიც — ორგანიზმთა სიბერე და სიკვდილი.

**შეუქცევადი პროცესის ზუსტი განმარტება.** შეუქცევად პროცესთა არსის სწორად გაგებისათვის საჭიროა დავაზუსტოთ, რომ შეუქცევადი ეწოდება ისეთ პროცესს, რომლის შებრუნებული შეიძლება მოხდეს მხოლოდ როგორც ერთ-ერთი რგოლი უფრო რთული პროცესისა. ავიღოთ თუნდაც ქანქარას მაგალითი. მისი რხევის გაქანება შეიძლება გავადიდოთ ხელის კვრით. მაგრამ ეს გადიდება ხდება არა თავისთავად, არამედ უფრო რთული პროცესის საშუალებით, რომელიც ხელის მოძრაობას შეიცავს.

პრინციპულად შესაძლებელია სითბოს გადატანა ცივი სხეულიდან ცხელში. მაგრამ ამისათვის საჭიროა მაცივარი დანადგარი, რომელიც ენერგიას მოიხმარს.

**კინო „უკულმა“.** მოვლენათა შეუქცევადობის ნათელი მაგალითია კინოფილმის შებრუნებული გაშვება. მაგალითად, წყალში ხტომას ამ დროს შემდეგი სახე ექნება: მშვიდი წყალი აუზში აჩქეფდება. გამოჩნდება ზევითკენ მოძრავი ფეხები, შემდეგ კი მყვინთავის მთელი სხეული. წყლის ზედაპირი სწრაფად მშვიდდება. მყვინთავის სიჩქარე თანდათან კლებულობს და აი, ის უკვე მშვიდად დგას კოშკზე. რაც ვნახეთ ეკრანზე, შეიძლება სინამდვილეში გვენახა, თუკი პროცესების შებრუნებას შევძლებდით. მომხდარის „უაზრობა“ იქიდან მომდინარეობს, რომ ჩვენ მივეჩვიეთ პროცესთა გარკვეულ მიმართულებას და ეჭვი არ გვეპარება შებრუნებული მსვლელობის შეუძლებლობაში. მაგრამ ისეთი პროცესი, როგორცაა წყლიდან მყვინთავის კოშკზე ახტომა არ ეწინააღმდეგება არც ენერგიის მუდმივობის კანონს, არც მექანიკის კანონებს და არც რაიმე სხვა კანონს, გარდა თერმოდინამიკის მეორე კანონისა.

**თერმოდინამიკის მეორე კანონი.** თერმოდინამიკის მეორე კანონი მიუთითებს შესაძლო ენერგეტიკულ გარდაქმნათა მიმართულებაზე და ამით გამოხატავს პროცესების შეუქცევადობას ბუნებაში. იგი დადგენილ იქნა ცდისეული ფაქტების უშუალო განზოგადებით.

არსებობს თერმოდინამიკის მეორე კანონის სხვადასხვაგვარი ფორმულირება, რომლებიც არსებითად ერთსა და იმავეს გამოხატავს და ერთმანეთის ტოლფასია.



გერმანელმა მეცნიერმა რ. კლაუზიუსმა ეს კანონი შემდეგნაირად ჩამოაყალიბა: **„შეუძლებელია უფრო ცივი სისტემიდან სითბო გადავიდეს უფრო ცხელში ისე, რომ არ ხდებოდეს სხვა ერთდროული ცვლილებები ორივე სისტემაში ან გარემომცველ სხეულებში.“**

აქ დასტურდება თბოგადაცემის განსაზღვრული მიმართულების ცდისეული ფაქტი: სითბო თავისთავად ყოველთვის გადადის ცხელი სხეულიდან ცივში. მართალია, მაცივარ დანადგარში თბოგადაცემა ხორციელდება ცივი სხეულიდან უფრო თბილისაკენ, მაგრამ ეს გადაცემა დაკავშირებულია „სხვა ცვლილებებთან გარემომცველ სხეულებში“: გაცივება ხდება მუშაობის ხარჯზე.

ამ კანონის მნიშვნელობა ისაა, რომ აქედან გამომდინარეობს შეუქცევადობა არა მხოლოდ თბოგადაცემის, არამედ სხვა პროცესებისაც. რაიმე შემთხვევაში რომ სითბო თავისთავად გადადიოდეს ცივი სხეულიდან ცხელში, მაშინ ეს საშუალებას მოგვცემდა შექცევადი გავგეხადა სხვა პროცესებიც.

## **21. სითბური ძრავების მოქმედების პრინციპები. სითბური ძრავების მარბი ქმედების კოეფიციენტი (მე კოეფიციენტი)**

დედამიწის ქერქსა და ოკეანეებში შინაგანი ენერჯიის მარაგი პრაქტიკულად განუსაზღვრელია. მაგრამ მარავის ქონა საკმარისი როდია, უნდა შეგვეძლოს მისი გამოყენება. შეგვეძლოს ამ ენერჯიით ვამუშაოთ ხარხები. ფაბრიკა-ქარხნებში, ტრანსპორტი, ტრაქტორები და სხვა სასოფლო-სამეურნეო მანქანები, ვაბრუნოთ ელექტროდენის გენერატორთა როტორები და ა. შ. კაცობრიობას სჭირდება ძრავა — მოწყობილობა, რომელსაც შეუძლია მუშაობის შესრულება.

არსებული ძრავების უმრავლესობა სითბური ძრავებია, მოწყობილობები, რომლებიც საწვავის შინაგანი ენერჯიას მექანიკურ ენერჯიად გარდაქმნიან.

**სითბური ძრავის მოქმედების პრინციპი.** იმისათვის, რომ ძრავამ მუშაობა შეასრულოს, აუცილებელია მისი დგუშისა და ტურბინის ფრთების სხვადასხვა მხარეს არსებობდეს წნევათა სხვაობა. ყველა სითბურ ძრავაში წნევათა ამ სხვაობას განაპირობებს წვის შედეგად მუშა სხეულის ტემპერატურის ასეული და ათასეული გრადუსით მომატება, გარემოს ტემპერატურასთან შედარებით.

ყველა სითბური ძრავის მუშა სხეული არის აირი (იხ. § 14). იგი მუშაობას ასრულებს გაფართოებისას. აღვნიშნოთ მუშა სხეულის





(აირის) საწყისი ტემპერატურა  $T_1$ -ით. ამ ტემპერატურას იღებს ორთქლის ქვაბში.

შიგაწვის ძრავასა და აირტურბინაში ტემპერატურა მატულობს ძრავაში საწვავის წვის შედეგად.  $T$  ტემპერატურას სახურებლის ტემპერატურას უწოდებენ (იხ. I ფერადი დანართი).

**მაცივრის როლი.** მუშაობის შესრულების გამო აირი კარგავს ენერგიას და უსათუოდ გაცივდება გარკვეულ  $T_2$  ტემპერატურამდე. მაგრამ ეს ტემპერატურა არ შეიძლება ნაკლები იყოს გარემოს ტემპერატურაზე, რადგან წინააღმდეგ შემთხვევაში აირის წნევა ატმოსფერულზე ნაკლები გახდება და ძრავა ვეღარ შეძლებს მუშაობის შესრულებას. მართლაც,  $T_2$  ტემპერატურა რამდენადმე მაღალია გარემოს ტემპერატურაზე, მას მაცივრის ტემპერატურას უწოდებენ. მაცივარს წარმოადგენს ატმოსფერო ან კონდენსატორი — სპეციალური მოწყობილობა ნამუშევარი აირის გაცივებისა და კონდენსაციისათვის.)

ამრიგად, მუშა სხეულს ძრავაში გაფართოებისას არ შეუძლია მთელი თავისი შინაგანი ენერგია მუშაობის შესრულებას მოახმაროს. სითბოს ნაწილი უსათუოდ გადაეცემა მაცივარს (ატმოსფეროს) ნამუშევარ ორთქლთან ან შიგაწვის ძრავადან და აირტურბინიდან გამოტყორცნილ აირთან ერთად. შინაგანი ენერგიის ეს ნაწილი იკარგება.

სითბური ძრავა მუშაობას ასრულებს მუშა სხეულის შინაგანი ენერგიის ხარჯზე. ამ პროცესის დროს სითბო უფრო ცხელი სხეულიდან (სახურებლიდან) უფრო ცივს (მაცივარს) გადაეცემა.

(სითბური ძრავას პრინციპული სქემა გამოსახულია I ფერად დანართზე. საწვავის წვის დროს ძრავას მუშა სხეული მიიღებს  $Q_1$  სითბოს რაოდენობას, შეასრულებს  $A'$  მუშაობას და მაცივარს გადასცემს  $Q_2 < Q_1$  სითბოს რაოდენობას.)

სითბური ძრავას მარგი ქმედების კოეფიციენტი (მქ კოეფიციენტი) ის გარემოება, რომ სითბურ ძრავაში შინაგანი ენერგია მთლიანად არ გარდაიქმნება მექანიკურ ენერგიად, ბუნების პროცესების შეუქცევადობითაა გამოწვეული. რომ შეიძლებოდეს სითბოს თავისთავადი დაბრუნება მაცივრიდან სახურებელში, მაშინ ნებისმიერ სითბურ ძრავაში შესაძლებელი გახდებოდა შინაგანი ენერგიის სრული გარდაქმნა მექანიკურ ენერგიად.

ენერგიის მუდმივობის კანონის თანახმად, ძრავას მიერ შესრულებული მუშაობა ტოლია:

$$A' = |Q_1| - |Q_2|, \quad (4.16)$$

სადაც  $Q_1$  სახურებლიდან მიღებული სითბოს რაოდენობაა,  $Q_2$  კი — მაცივარზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა.



სითბური ძრავას მარგი ქმედების კოეფიციენტი ეწოდება ძრავას მიერ შესრულებული მუშაობისა და სახურებლიდან მიღებულ სითბოს რაოდენობის ფარდობას.

$$\eta = \frac{A'}{|Q_1|} = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}. \quad (4.17)$$

რადგან ყველა ძრავას მუშაობისას რაღაც  $Q_2$  სითბოს რაოდენობა მაცივარს გადაეცემა, ამიტომ ყოველთვის  $\eta < 1$ .

სითბური ძრავას მქ კოეფიციენტი დამოკიდებულია სახურებლისა და მაცივრის ტემპერატურათა შეფარდებაზე. იგი სახურებლისა და მაცივრის ტემპერატურათა სხვაობის პროპორციული უნდა იყოს, რადგან, როცა  $T_1 - T_2 = 0$  ძრავას მუშაობა არ შეუძლია.

სითბური ძრავას მქ კოეფიციენტის მაქსიმალური მნიშვნელობა. თერმოდინამიკის კანონების საშუალებით შეიძლება გამოვთვალოთ სითბური ძრავას მაქსიმალური შესაძლო მქ კოეფიციენტი, თუ ვიცით სახურებლისა და მაცივრის  $T_1$  და  $T_2$  ტემპერატურები. პირველად ეს შეასრულა ფრანგმა ინჟინერმა და მეცნიერმა სადი კარნომ (1796—1832) თავის შრომაში „ფიქრები ცეცხლის მამოძრავებელ ძალასა და მანქანებზე, რომლებიც ამ ძალას ავითარებს“ (1824 წ.).

კარნომ მოიფიქრა იდეალური სითბური მანქანა, რომლის მუშაობა სხეულად იდეალურ აირს გულისხმობდა. მან გამოთვალა ამ მანქანის მქ კოეფიციენტი:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

4.18

როგორც მოსალოდნელი იყო, კარნოს მანქანის მქ კოეფიციენტი პირდაპირპროპორციულია სახურებლისა და მაცივრის აბსოლუტურ ტემპერატურათა სხვაობისა და უკუპროპორციულია სახურებლის აბსოლუტური ტემპერატურისა. ამ დებულების ბოლო ნაწილი დაკავშირებულია იმასთან, რომ  $Q_1$  სითბოს რაოდენობა ისევე, როგორც შინაგანი ენერჯია, პროპორციულია სახურებლის აბსოლუტური ტემპერატურისა.

ამ ფორმულის მთავარი მნიშვნელობა, როგორც ეს კარნომ დაამტკიცა თერმოდინამიკის მეორე კანონზე დაყრდნობით, ასეთია: არც ერთ რეალურ სითბურ მანქანას, რომელიც მუშაობს  $T_1$  ტემპერატურის სახურებლით და  $T_2$  ტემპერატურის მაცივრით, არ შეიძლება ჰქონდეს იდეალურ სითბურ მანქანაზე მეტი მარგი ქმედების კოეფიციენტი.





(4.18) ფორმულა გვაძლევს სითბური ძრავას მქ კოეფიციენტის მაქსიმალური მნიშვნელობის თეორიულ ზღვარს. იგი გვიჩვენებს, რომ სითბური ძრავა მით უფრო ეფექტურია, რაც მეტია სახურებლის ტემპერატურა და რაც ნაკლებია მაცივრის ტემპერატურა. ი მაშინაა ერთის ტოლი, როცა მაცივრის ტემპერატურა აბსოლუტური ტემპერატურის ტოლია.

მაგრამ მაცივრის ტემპერატურა არ შეიძლება ბევრად ნაკლები იყოს გარემომცველი ჰაერის ტემპერატურაზე. სახურებლის ტემპერატურის მომატება შეიძლება, მაგრამ ნებისმიერ მასალას (მყარ სხეულს) აქვს შემოსაზღვრული თბომცდევლობა ან მხურვალმედევლობა. გათბობისას იგი თანდათან კარგავს თავის დრეკად თვისებებს, საკმაოდ მაღალი ტემპერატურისას კი დნება.

ამჟამად ინჟინრების მიზანია გაზარდონ ძრავას მქ კოეფიციენტი მათი ნაწილების ხახუნისა და არასრული წვისას დაკარგული სათბობის შემცირების ხარჯზე და ა. შ. მქ კოეფიციენტის გაზრდის რეალური შესაძლებლობა ჯერ კიდევ დიდია. ასე მაგალითად, ორთქლის ტურბინაში საწყისი და საბოლოო ტემპერატურა დაახლოებით ასეთია:  $T_1 = 800 \text{ K}$  და  $T_2 = 300 \text{ K}$ . ამ დროს მქ კოეფიციენტის მაქსიმალური მნიშვნელობა ტოლია:

$$\eta_{\text{მაქს}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \approx 0,62; \quad \eta \approx 62\%.$$

სინამდვილეში კი ენერჯის სხვადასხვა დანაკარგის გამო მქ კოეფიციენტი  $\eta \approx 40\%$ . შიგაწვის ძრავას მაქსიმალური მქ კოეფიციენტი დაახლოებით 44%-ია.

სითბური ძრავას მქ კოეფიციენტის გაზრდა, მაქსიმალურ შესაძლოსთან მისი მიახლოება, უმნიშვნელოვანესი ტექნიკური ამოცანაა.

## 22. სითბური ძრავას მნიშვნელობა. სითბური ძრავა და გარემოს ღაცვა

სითბური ძრავას მნიშვნელობა. სითბურ ძრავას (ძირითადად მძლავრ ორთქლის ტურბინას) ყველაზე დიდი გამოყენება აქვს თბოელექტროსადგურებში, სადაც მას მოძრაობაში მოჰყავს ელექტროდენის გენერატორის როტორი. ჩვენს ქვეყანაში ელექტროენერჯის 80%-ზე მეტი თბოელექტროსადგურებში გამოიყენება.

სათბური ძრავა — ორთქლის ტურბინა — დაყენებულია აგრეთვე ყველა ატომურ ელექტროსადგურში, სადაც მაღალი ტემპერატურის ორთქლის მისაღებად იყენებენ ატომბირთვის ენერჯიას.



და კიდევ, ყველა ძირითადი სახის თანამედროვე ტრანსპორტში უპირატესად სითბურ ძრავებს იყენებენ. საავტომობილო ტრანსპორტში იყენებენ დგუშიან შიგაწვის ძრავებს, რომელთა ერთ ნაწილში საწვავი ნარევი გარეწარმოქმნისაა (კარბიურატორიანი ძრავები), მეორეში კი საწვავი ნარევი უშუალოდ ცილინდრში წარმოიქმნება (დიზელები). იმავე ძრავას აყენებენ ტრაქტორში, რომელიც შეუცვლელი მანქანაა სოფლის მეურნეობაში.

XX საუკუნის პირველ ნახევარში რკინიგზის ტრანსპორტის ძირითადი ძრავა ორთქლის მანქანა იყო. ამჟამად კი უმთავრესად დიზელის დანადგარებიანი თბომავლებითა და ელმავლებით სარგებლობენ. მაგრამ ელმავლებიც ხომ ენერჯიას უპირატესად ელექტროსადგურების სითბური ძრავებიდანღებულაობენ.

წყლის ტრანსპორტზე იყენებენ როგორც შიგაწვის ძრავას, ისე მძლავრ ორთქლის ტურბინებსაც დიდი გემებისათვის.

ავიაციაში მსუბუქ თვითმფრინავებზე დგამენ დგუშიან ძრავებს, უზარმაზარ ლაინერებზე კი — ტურბორეაქტიულ და რეაქტიულ ძრავებს, რომლებიც აგრეთვე სითბურ ძრავებს მიეკუთვნება. რეაქტიულ ძრავას კოსმოსურ რაკეტებში იყენებენ.

სითბური ძრავების გარეშე წარმოუდგენელია თანამედროვე ცივილიზაცია. ასე უხვად არ გვექნებოდა იაფი ელექტროენერჯია და მოკლებული ვიქნებოდით ყველა სახის სწრაფ ტრანსპორტს.

**სითბური ძრავა და ბუნების დაცვა.** სითბური ძრავის უაღრესად ფართო გამოყენება (რათა მიიღონ სარგებლობისათვის მოხერხებული ენერჯია), სხვა საწარმოო პროცესთან შედარებით უფრო დიდ გავლენას ახდენს გარემოზე.

თერმოდინამიკის კანონების თანახმად, პრინციპულად შეუძლებელია ელექტრული და მექანიკური ენერჯიის ისე წარმოება, რომ გარემოს არ გადაეცეს სითბოს მნიშვნელოვანი რაოდენობა. ამან არ შეიძლება თანდათან არ გაზარდოს დედამიწაზე საშუალო ტემპერატურა. ამჟამად გამოყენებული სიმძლავრე დაახლოებით  $10^{10}$  კვტ-ს შეადგენს. როცა ეს სიმძლავრე  $3 \cdot 10^{12}$  კვტ-ს მიაღწევს, მაშინ საშუალო ტემპერატურა შესამჩნევად მოიმატებს (დაახლოებით 1 გრადუსით). ტემპერატურის შემდგომ აწევას შეიძლება მოჰყვეს მყინვართა დნობა და მსოფლიო ოკეანის დონის კატასტროფული აწევა.

მაგრამ ამით სრულიადაც არ ამოიწურება სითბური ძრავას გამოყენების ნეგატიური შედეგები. თბოელექტროსადგურთა საცეცხლეები, ავტომობილთა შიგაწვის ძრავები და ა. შ. განუწყვეტლად ტყორცნიან ატმოსფეროში მცენარეების, ცხოველებისა და ადამიანისათვის მავნე ნივთიერებებს. გოგირდოვან ნაერთებს (ქვანახშირის წვისას),





აზოტის ოქსიდებს, ნახშირწყალბადებს, ნახშირბადის ოქსიდს (II) და სხვ. ამ მხრივ განსაკუთრებულ საფრთხეს გვიქადის ავტომობილები, რომელთა რიცხვი ძალიან იზრდება, ნამუშევარი აირების გაწმენდა კი გაძნელებულია. ატომურ ელექტროსადგურებში დგება საშიში რადიოაქტიური ნარჩენების დამარხვის პრობლემა.

გარდა ამისა, ელექტროსადგურებში ორთქლის ტურბინების გამოყენება დიდ შესატბორ ფართობებს მოითხოვს ნამუშევარი ორთქლის გაცივებისათვის. ელექტროსადგურთა სიმძლავრეების ზრდასთან ერთად მკვეთრად იზრდება მოთხოვნილება წყალზე. 1980 წ. ჩვენს ქვეყანაში ამ მიზნით საჭირო იყო დაახლოებით 200 კმ<sup>3</sup> წყალი, ე. ი. მეურნეობის ყველა დარგის წყალმომარაგების თითქმის 35%.

ყოველივე ეს სერიოზულ პრობლემებს აყენებს საზოგადოების წინაშე. სითბური ძრავის მქკ-ის გაზრდის მნიშვნელოვან ამოცანასთან ერთად საჭიროა ჩატარდეს რიგი ღონისძიებანი გარემოს დაცვის მიზნით. აუცილებელია ამაღლდეს იმ ნაგებობათა ეფექტურობა, რომლებიც წინააღმდეგობას უწევს ატმოსფეროში მავნე ნივთიერებათა გამოტყორცნას; უნდა მივალწიოთ საწვავის უფრო სრულ წვას ავტომობილთა ძრავებში. ამჟამად საექსპლოატაციოდ არ დაიშვება ავტომობილები, რომელთა ნამუშევარ აირებში მომატებულია CO-ს შემცველობა. სწავლობენ ელექტრომობილების შექმნის შესაძლებლობას, რომლებიც მეტოქეობას გაუწევს ჩვეულებრივ ავტომობილებს, არკვევენ აგრეთვე, თუ რამდენად შესაძლოა ისეთი საწვავის გამოყენება, რომლის ნამუშევარ აირში არ იქნება მავნე ნივთიერებანი (მაგალითად, წყალბადისა და ჟანგბადის ნარევზე მომუშავე ძრავები).

ფართობებისა და წყლის რესურსების ეკონომიისათვის მიზანშეწონილია აგებულ იქნეს ელექტროსადგურთა (პირველ რიგში ატომურ) მთელი კომპლექსები წყალმომარაგების ჩაკეტილი ციკლით.

ღონისძიებათა მიღების სხვა მიმართულებაა ენერჯის გამოყენების ეფექტურობის ამაღლება, ბრძოლა ეკონომიისათვის.

ჩამოთვლილი პრობლემების გადაწყვეტა სასიცოცხლო მნიშვნელობისაა კაცობრიობისათვის. ეს პრობლემები მაქსიმალური წარმატებით შეიძლება გადაწყდეს სოციალისტურ საზოგადოებაში, რომელიც ეკონომიკის გეგმიანი განვითარებით ხასიათდება ჩვენს ქვეყანაში. მაგრამ გარემოს დაცვის ორგანიზაცია ღონისძიებებს მოითხოვს მთელი დედამიწის მასშტაბით.

1. როგორ პროცესებს ეწოდება შეუქცევადი? 2. დაასახელეთ ყველაზე ტიპური შეუქცევადი პროცესები. 3. მოიყვანეთ მაგალითები ისეთი შეუქცევადი პროცესებისა, რომლებიც ტექსტში არ არის მოხსენებული. 4. ჩამოაყალიბეთ თერმოდინამიკის მეორე კანონი. 5. მდინარეების უკუშეტრიალება იქნებოდა თუ არა ენერჯის მუდმივობის კანონის დარღვევა? 6. არის თუ არა



შექცევადი მთვარის მოძრაობა დედამიწის გარშემო? 7. რა როლს ასრულებს სითბური ძრავაში სახურებელი, მაცივარი და მუშა სხეული? 8. რატომ არ შეიძლება, რომ სითბური ძრავაში ენერგიის წყაროდ გამოვიყენოთ ოკეანის შინაგანი ენერგია? 9. რას ეწოდება სითბური ძრავას მარგი ქმედებას კოეფიციენტი? 10. რას უდრის სითბური ძრავას მარგი ქმედების კოეფიციენტის მაქსიმალური შესაძლო მნიშვნელობა?

### ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები

ამ თავის მასალასთან დაკავშირებულ ამოცანებში ვიყენებთ თერმოდინამიკის პირველ კანონს (4.10) ან (4.11) სახით.

ამოცანების ამოხსნისათვის უნდა ვიციოდეთ გამოთვლა მუშაობისა (4.4) და სითბოს რაოდენობისა (4.5), (4.6), (4.7), (4.8), (4.9) ფორმულების გამოყენებით. მხედველობაში უნდა ვიქონიოთ, რომ  $A$ ,  $Q$ ,  $\Delta U$  სიდიდეები შეიძლება იყოს როგორც დადებითი, ისე უარყოფითი.

ამოცანების უმეტეს ნაწილში ვიყენებთ თერმოდინამიკის პირველი კანონის არა ზოგად ფორმას, არამედ მის სხვადასხვა კერძო სახეს, რომლებიც სათანადო პროცესებისთვისაა გამოსადეგი. თბოცვლის ამოცანები (იზოლირებულ სისტემაში) ამოიხსნება სითბური ბალანსის განტოლების საშუალებით (4.15).

გრაფიკების გამოყენებით ამოხსნისას უნდა გვახსოვდეს მუშაობის გეომეტრიული განმარტება (§ 16).

როგორც აირის კანონების შესახებ ამოცანათა ამოხსნისას, ამ თავის მასალის ამოცანებშიც მკაფიოდ უნდა გამოვყოთ სისტემის საწყისი მდგომარეობა და მისი მახასიათებელი პარამეტრები, ასევე საბოლოო მდგომარეობა.

1.  $V=500$  მ<sup>3</sup> მოცულობის აეროსტატი ავსებულია ჰელიუმით, რომლის წნევა  $p=10^5$  პა. მზით გათბობის შედეგად აირის ტემპერატურამ აეროსტატში აიწია  $t_1=10^\circ\text{C}$ -დან  $t_2=25^\circ\text{C}$ -მდე. რამდენით გაიზარდა აირის შინაგანი ენერგია?

ამოხსნა. ჰელიუმი ერთატომიანი აირია, ამიტომ მისი შინაგანი ენერგია განისაზღვრება (4.1) ფორმულით.  $T_1$  ტემპერატურის დროს ეს ენერგია ტოლია  $U_1 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT_1$  ხოლო  $T_2$  ტემპერატურის დროს

$$U_2 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT_2.$$

ენერგიის ცვლილება

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R (T_2 - T_1).$$



ჰელიუმის მასა უცნობია მაგრამ იგი შეიძლება გამოვსახოთ მენდელეევი — კლაპეირონის განტოლებით აირის საწყისი ტემპერატურის, წნევისა და მოცულობის მეშვეობით  $\frac{mR}{M} = \frac{pV}{T_1}$ ; თუ ჩავსვამთ  $\frac{mR}{M}$  მნიშვნელობას, მივიღებთ:

$$\Delta U = \frac{3}{2} pV \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \approx 4 \cdot 10^6 \text{ ჯ.}$$

2. ცილინდრში მძიმე ღვუშის ქვეშ იმყოფება ნახშირორჟანგი ( $M=0,044$  კგ/მოლი), რომლის მასა  $m=0,20$  კგ. აირი თბება  $\Delta T=88$  K-ით. რა მუშაობას შეასრულებს ის ამ დროს?

ამოხსნა. აირი ფართოვდება რაღაც  $p$  მუდმივი წნევისას, რომელსაც ქმნის ატმოსფერო და ღვუში. ამ შემთხვევაში აირის მუშაობა

$$A' = p(V_2 - V_1),$$

სადაც  $V_1$  და  $V_2$  აირის საწყისი და საბოლოო მოცულობებია. გამოვიყენოთ იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება  $pV = \frac{m}{M} RT$  და წნევისა და მოცულობის ნამრავლი ტემპერატურით გამოვსახოთ, რის შემდეგ მივიღებთ:

$$A' = pV_2 - pV_1 = \frac{m}{M} RT_2 - \frac{m}{M} RT_1 = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$$

$$A' \approx 3,324 \text{ ჯ.}$$

8.  $S=200$  სმ<sup>2</sup> განივკვეთის ცილინდრში, გათბობით გამოწვეული გაფართოების დროს, აირს გადაეცა  $Q=1,5 \cdot 10^5$  ჯ სითბოს რაოდენობა. ამ დროს წნევა რჩებოდა უცვლელი და ტოლი იყო  $p=2 \cdot 10^7$  პა-ის, რამდენით შეიცვალა აირის შინაგანი ენერჯია, თუ ღვუში  $\Delta h=80$  სმ-ით გადაადგილდა?

ამოხსნა. (4.11) ფორმით გამოსახული თერმოდინამიკის პირველი კანონის თანახმად

$$Q = \Delta U + A',$$

სადაც  $A' = p\Delta V = pS \cdot \Delta h$  აირის მიერ შესრულებული მუშაობაა. აქედან  $\Delta U = Q - pS \cdot \Delta h$ ,  $\Delta U = 30$  კჯ.

4. კალორიმეტრში მოთავსებულია  $m_1=0,2$  კგ წყალი, რომლის ტემპერატურა  $t=20^\circ\text{C}$ . მასში ჩაასხეს  $m_2=0,8$  კგ წყალი, რომლის ტემპერატურაა  $t_2=80^\circ\text{C}$ . კალორიმეტრში დამყარდა  $t=50^\circ\text{C}$  ტემპერატურა. იპოვეთ კალორიმეტრის სითბოტევადობა. (სხეულის სითბოტევადობა ეწოდება მისი მასისა და კუთრი სითბოტევადობის ნამრავს:  $C=cm$ ).



ამოხსნა. სითბური ბალანსის განტოლების თანახმად, მიღებულ და გაცემულ სითბოს რაოდენობათა ჯამი კალორიმეტრში წყლის ტოლია.  $t_2$  ტემპერატურის წყალი გასცემს  $cm_2(t-t_2)$ , ხოლო  $t_1$  ტემპერატურის წყალი მიიღებს  $cm_1(t-t_1)$  სითბოს რაოდენობას; კალორიმეტრი ღებულობს  $C(t-t_1)$  სითბოს რაოდენობას, რადგან მისი საწყისი ტემპერატურა ემთხვევა წყლის  $t_1$  ტემპერატურას. ამრიგად,

$$cm_2(t-t_2) + cm_1(t-t_1) + C(t-t_1) = 0.$$

$$\text{აქედან } C = \frac{cm_1(t_1-t) + cm_2(t_2-t)}{t-t_1}; \quad C \approx 420 \text{ ჯ/კ.}$$

5. ნამუშევარ ორთქლში, რომლის ტემპერატურა  $t_1 = 100^\circ\text{C}$ , წყლის წვეთები შეადგენს მისი მასის 90%-ს. ამ ორთქლის გასაცივებლად მას იმავე მასის ცივი წყალს ურევინებენ ( $t_2 = 10^\circ\text{C}$ ). რა ტემპერატურა ექნება მიღებულ წყალს?

ამოხსნა. ცივი წყლის მასა აღვნიშნოთ  $m$ -ით. მაშინ ორთქლის მასა იქნება  $0,1m$ , წყლის წვეთების მასა კი  $0,9m$ .

ორთქლის კონდენსაციისა და წარმოქმნილი წყლის გაცივებისას გაცემული სითბოს რაოდენობა უარყოფითია:

$$Q_1 = -0,1rm + 0,1cm(t-t_1).$$

სითბოს რაოდენობა, რომელიც წვეთებმა გასცა გაცივებისას, ასევე უარყოფითია:

$$Q_2 = 0,9cm(t-t_1), \quad t < t_1.$$

ცივი წყალი ღებულობს  $Q_3 = cm(t-t_2)$  სითბოს რაოდენობას. შევადგინოთ სითბური ბალანსის განტოლება:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0.$$

$$-0,1rm + 0,1cm(t-t_1) + 0,9cm(t-t_1) + cm(t-t_2) = 0.$$

$$\text{აქედან } t = \frac{0,1r + c(t_1 + t_2)}{2c}; \quad t = 82^\circ\text{C}.$$

#### სავარჯიშო 4.

+ 1. როგორ შეიცვლება ერთატომიანი იდეალური აირის შინაგანი ენერგია, თუ მისი წნევა გაიზარდება 3-ჯერ, მოცულობა კი შემცირდება 2-ჯერ?

+ 2. აირმა, რომლის წნევა  $p = 10^5$  პა-ს, იზობარული გაფართოებისას შეასრულა  $A = 25$  ჯ მუშაობა. რამდენით გაიზარდა აირის მოცულობა?

+ 3. თერმოდინამიკურ სისტემას გადაეცა 200 ჯ სითბოს რაოდენობა. როგორ შეიცვალა სისტემის შინაგანი ენერგია, თუ ამ დროს მან შეასრულა 400 ჯ მუშაობა?

+ 4. სანგრევი ჩაქუჩის ღერო მოძრაობს შეკუმშული ჰაერით. ღერის სვლის დროს ცილინდრში ჰაერის მასა იცვლება 0,1-დან 0,5 გ-მდე. ცი-

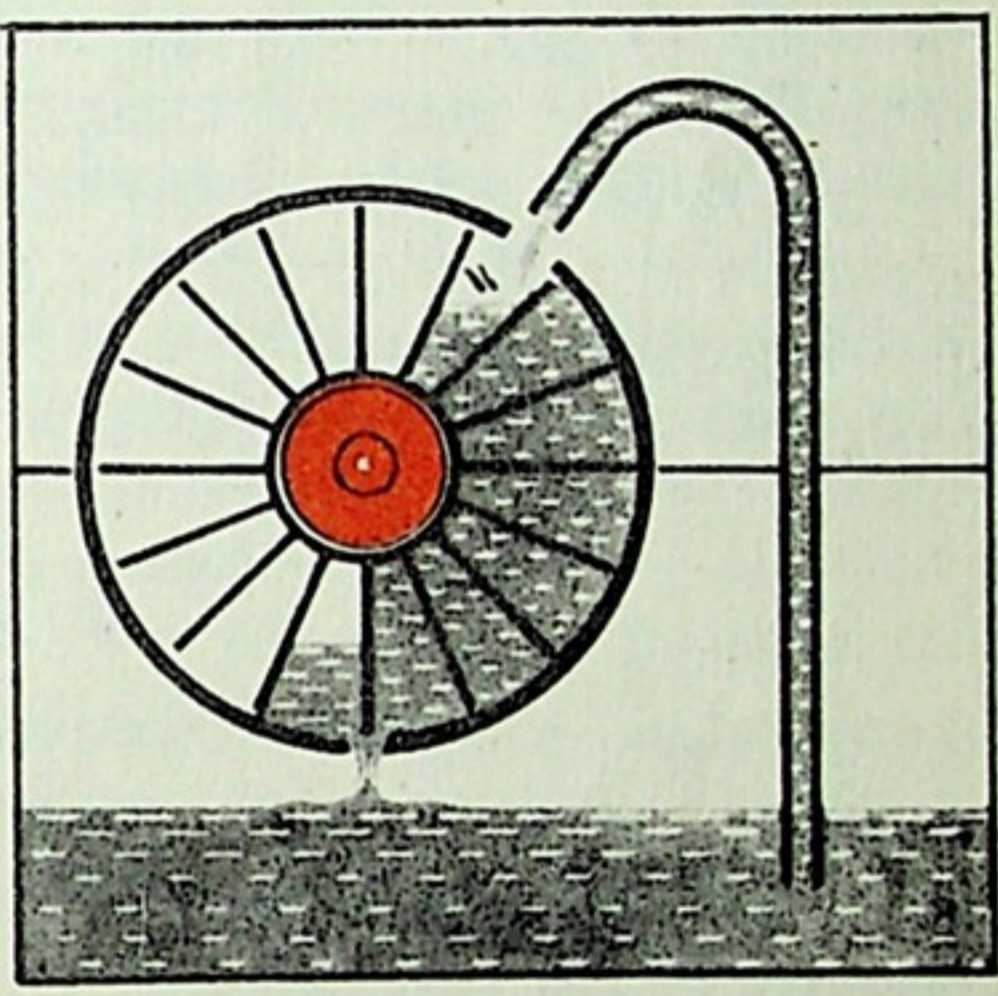




ლინდრში ჰაერის წნევა და ტემპერატურა ( $27^{\circ}\text{C}$ ) მუდმივად ჩათვალეთ. განსაზღვრეთ აირის მუშაობა დგუშის ერთი სვლისას. ჰაერის მოლური მასა  $M=0,029$  კგ/მოლი.

7. აირის ერთნაირ სანთურებზე დადგეს ორი ერთნაირი მკიდროდ თავდაცობილი თითო ლიტრი მოცულობის ჭურჭელი. ერთ ჭურჭელში მოთავსებულია წყალი, მეორეში კი — ჰაერი. რომელი ჭურჭელი უფრო სწრაფად გათბება  $50^{\circ}\text{C}$ -მდე? რატომ?

8. მოფიქრებულია მუდმივი ძრავის შემდეგი პროექტი (სურ. 45). დახურული ჭურჭელი ორ ნაწილად არის გაყოფილი ჰერმეტიკული ტიხრით, რომელშიც გატარებულია მილი და წყლის ტურბინა. ტურბინის გარსაცმს აქვს ორი ნახვრეტი. ჰაერის წნევა ქვედა ნაწილში მეტია, ვიდრე ზედაში. წყალი ადის მილში და ავსებს ღია კამერას, ქვედა ნაწილში წყლის მორიგი პორცია ისხმება ტურბინის იმ კამერიდან, რომელიც გარსაცმის ნახვრეტთან მივა. რატომ არ იმუშავებს ეს მანქანა მუდმივად?



სურ. 45.

7. დადებოდა თუ უარყოფითი აირის მუშაობა 1—2, 2—3 და 3—1 პროცესებში 34-ე სურათზე? მიიღებს თუ გასცემს აირი სითბოს თითოეულ ამ პროცესში?

8.  $m$  მასისა და  $M$  მოლური მასის აირის ტემპერატურა იზრდება  $\Delta T$ -ით, ჯერ მუდმივი  $p$  წნევის, შემდეგ კი მუდმივი  $V$  მოცულობის პირობებში. რამდენად გასხვავდება პირველი და მეორე შემთხვევებში აირისათვის გადაცემული სითბოს რაოდენობები?

9. რა სითბოს რაოდენობაა საჭირო 4 კგ ჰელიუმის  $100\text{ K}$ -ით იზოქორული გათბობისათვის?

10. აირის იზოთერმული გაფართოების დროს შესრულდა 20 ჯ მუშაობა. რა რაოდენობის სითბო გადაეცა აირს?

11. გამოთვალეთ 2 კგ მასის წყალბადის შინაგანი ენერჯიის ნაზრდი  $10\text{ K}$ -ით იზობარული გათბობისას.

წყალბადის კუთრი სითბოტევადობა მუდმივ წნევაზე არის  $14$  კჯ/(კგ.  $K$ ).

12. კომპრესორის ცილინდრში კუმშავენ 4 მოლ იდეალურ ერთატომიან აირს. განსაზღვრეთ, რამდენით აიწევს აირის ტემპერატურა დგუშის ერთი სვლის შედეგად, თუ ამ დროს 500 ჯ მუშაობა შესრულდა? პროცესი ადი-აბატურად ჩათვალეთ.

13. კალორიმეტრში წყლის მასა  $0,25$  კგ-ია, ტემპერატურა  $25^{\circ}\text{C}$ -ია, მასში შეუშვეს  $100^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურის  $0,01$  კგ წყლის ორთქლი. რა ტემპერატურა დამყარდება კალორიმეტრში, თუ სითბოტევადობაა  $1000$  ჯ/ $K$ ?

\*14. კალორიმეტრში ჩასხმულია  $10^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურის  $0,4$  კგ წყალი. მასში ჩააგდეს  $-40^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურის  $0,6$  კგ ყინული. რა ტემპერატურა დამყარდება კალორიმეტრში, თუ მისი სითბოტევადობა ძალიან მცირეა?

15. რა ტემპერატურა უნდა ჰქონდეს სახურებელს იმისათვის, რომ პრინციპში შესაძლო იყოს სითბური მანქანის  $80\%$  მქკ, თუ მაცივრის ტემპერატურა  $27^{\circ}\text{C}$  იქნება?



16. სითბური მანქანის მუშაობისას, დროის რაღაც შუალედში მუშა სხეულმა სახურებლიდან მიიღო  $Q_1 = 1,5 \cdot 10^6$  ჯ სითბო, ხოლო მაცივარს გადასცა  $Q_2 = -1,2 \cdot 10^6$  ჯ სითბო, გამოთვალეთ მანქანის მქ კოეფიციენტი და შეადარეთ იგი მაქსიმალურ შესაძლო მქ კოეფიციენტს. სახურებლის ტემპერატურაა  $250^\circ\text{C}$ , მაცივრისა კი  $30^\circ\text{C}$ .

## მოკლემ დასკვნა

მაკროსკოპულ სხეულებს აქვს შინაგანი ენერგია, რომელიც ტოლია სხეულის ყველა მოლეკულის ქაოსური მოძრაობის კინეტიკური ენერგიებისა და ყველა მოლეკულის ურთიერთქმედების პოტენციური ენერგიების ჯამისა. შინაგანი ენერგია არის თერმოდინამიკური პარამეტრების — ტემპერატურისა და მოცულობის — ცალსახა ფუნქცია. იდეალური ერთატომიანი აირის შემთხვევაში შინაგანი ენერგია დამოკიდებულია მხოლოდ ტემპერატურაზე:

$$U = \frac{2}{3} \frac{m}{M} RT.$$

თერმოდინამიკის პირველი კანონის თანახმად, სისტემის შინაგანი ენერგიის ცვლილება მისი გადასვლისას ერთი მდგომარეობიდან მეორეში ტოლია გარე ძალთა მუშაობისა და სისტემაზე გადაცემული სითბოს რაოდენობის ჯამისა:

$$\Delta U = A + Q.$$

სისტემაზე შესრულებული მუშაობა თერმოდინამიკაში ტოლია:  $A = -p\Delta V$ , სადაც  $p$  წნევაა,  $\Delta V$  კი — მოცულობის ცვლილება. თვით სისტემა ამ დროს ასრულებს  $A' = -A = p\Delta V$  მუშაობას. გათბობისა და გაცივებისას სითბოს რაოდენობა ტოლია:  $Q = cm\Delta T$ , სადაც  $c$  კუთრი სითბოტევადობაა,  $\Delta T$  კი — ტემპერატურის ცვლილება. გარდა ამისა, სითბო შთაინთქმება ორთქლადქცევისა და დნობისას, გამოიყოფა — კონდენსაციისა და კრისტალიზაციისას (4.6, 4.7, 4.8 და 4.9 ფორმულები).

მუშაობა და სითბოს რაოდენობა პროცესის მახასიათებელია, რომლის დროსაც იცვლება ენერგია.

იზოქორული პროცესის ( $V = \text{const}$ ) დროს მუშაობა ტოლია ნულის და  $\Delta U = Q$ .

იზოთერმული პროცესის ( $T = \text{const}$ ) დროს იდეალური აირის შინაგანი ენერგია არ იცვლება და  $Q = A'$ , იზობარული პროცესის დროს ( $p = \text{const}$ ) სისტემაზე გადაცემული სითბო იხარჯება სისტემის შინაგანი ენერგიის ცვლილებასა და მუშაობის შესრულებაზე  $Q = \Delta U + A'$ .



ადიაბატური პროცესის დროს (თბოიზოლირებულ სისტემაში)  
 $Q=0, \Delta U=A.$

იზოლირებულ სისტემაში სითბოცვლისას, როცა არ სრულდება მუშაობა, გვაქვს სითბური ბალანსის განტოლება:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = 0,$$

სადაც  $Q_1, Q_2, Q_3$  სითბოს რაოდენობებია, რომლებიც მიიღო ან გასცა სხეულებმა.

მაკროსკოპული სხეულის მონაწილეობით მიმდინარე პროცესები ბუნებაში შეუქცევადია. ტიპური შეუქცევადი პროცესები შემდეგია: სითბო თავისთავად გადადის ცხელი სხეულიდან ცივში, მაგრამ არა პირუკუ; მექანიკური ენერგია თავისთავად გარდაიქმნება შინაგან ენერგიად.

შეუქცევად პროცესებთან დაკავშირებული ცდისეული ფაქტების განზოგადებით ჩამოყალიბდა თერმოდინამიკის მეორე კანონი. თერმოდინამიკის მეორე კანონიდან გამომდინარეობს, რომ სითბურ ძრავას მუშაობის შესრულება შეუძლია მხოლოდ სახურებლიდან მაცივარზე სითბოს გადაცემის პროცესში. სითბური ძრავას მარგი ქმედების კოეფიციენტის მაქსიმალური შესაძლო მნიშვნელობაა

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

სადაც  $T_1$  სახურებლის ტემპერატურაა,  $T_2$  კი — მაცივრის.

სითბური ძრავას მქკ-ის ამაღლება და მაქსიმალურ შესაძლოსადმი მიახლოება უმნიშვნელოვანესი ტექნიკური ამოცანაა.

## V თ ა ვ ი

### სითხისა და აირის ურთიერთგარდაქმნა

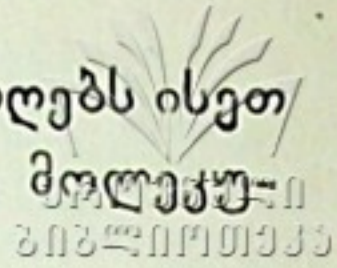
#### 23. ნაჯერი ორთქლი

მოლეკულურ-კინეტიკური თეორია გვიხსნის არა მარტო იმას, თუ რატომ შეუძლია ნივთიერებას იყოს აირად, თხევად და მყარ მდგომარეობაში, არამედ გვიხსნის აგრეთვე ერთი მდგომარეობიდან მეორეში ნივთიერების გადასვლის პროცესს.

**აორთქლება და კონდენსაცია.** წყლის ან ნებისმიერი სხვა სითხის რაოდენობა ღია ჭურჭელში თანდათან კლებულობს. სითხე ო რ თ ქ ლ დ ე ბ ა. აორთქლების მექანიზმი აღწერილი იყო VIII კლასის ფიზიკის



კურსში. ქაოსური მოძრაობის დროს ზოგიერთი მოლეკულა იღებს ისეთ დიდ კინეტიკურ ენერგიას, რომ გადალახავს სითხის სხვა მოლეკულების მიერ მიზიდვის ძალებს და ამოდის სითხიდან.



აორთქლებასთან ერთად მიმდინარეობს შებრუნებული პროცესიც — ორთქლის ქაოსურად მოძრავი მოლეკულების ნაწილი გადადის სითხეში. ამ პროცესს კონდენსაცია ეწოდება. თუ ჭურჭელი ღიაა, მაშინ სითხიდან ამოსული მოლეკულები შეიძლება აღარც დაბრუნდნენ სითხეში. ამ შემთხვევაში აორთქლება არ კომპენსირდება კონდენსაციით და სითხის რაოდენობა იკლებს. როცა ჰაერის ნაკადი წარიტაცებს წარმოქმნილ ორთქლს, სითხე აორთქლდება უფრო სწრაფად, რადგან მცირდება შესაძლებლობა იმისა, რომ ორთქლის მოლეკულები ისევ დაბრუნდეს სითხეში.

**ნაჭერი ორთქლი.** თუ სითხიან ჭურჭელს მჭიდროდ დავხურავთ, მაშინ სითხის კლება მალე შეწყდება. უცვლელ ტემპერატურაზე სისტემაში — „სითხე-ორთქლი“ — დამყარდება სითხური წონასწორობა, რომელშიც სისტემა ნებისმიერი დროის განმავლობაში დარჩება. აორთქლებასთან ერთად ხდება კონდენსაცია და ორივე პროცესი საშუალოდ აკომპენსირებს ერთმანეთს.

დასაწყისში, როდესაც სითხეს ჩაასხამენ ჭურჭელში და მჭიდროდ დახურავენ, სითხე იწყებს აორთქლებას და ორთქლის სიმკვრივე სითხის ზემოთ იზრდება. მაგრამ ამასთანავე გაიზრდება სითხეში დაბრუნებული მოლეკულების რიცხვიც, რაც უფრო მეტი იქნება ორთქლის სიმკვრივე, მით უფრო ბევრი მოლეკულა დაბრუნდება სითხეში. ამის შედეგად დახშულ ჭურჭელში უცვლელ ტემპერატურაზე ბოლოს და ბოლოს დამყარდება დინამიკური (მოძრავი) წონასწორობა. იმ მოლეკულების რაოდენობა, რომლებიც სითხიდან ამოდიან, ტოლი იქნება ორთქლის იმ მოლეკულების რაოდენობისა, რომლებიც იმავე დროში ბრუნდება სითხეში.

[**ორთქლს, რომელიც დინამიკურ წონასწორობაშია თავის სითხესთან, ნაჭერი ორთქლი ეწოდება.**] ეს სახელწოდება მიუთითებს, რომ აღებულ მოცულობაში განსაზღვრულ ტემპერატურაზე არ შეიძლება ორთქლის მეტი რაოდენობა იყოს.

თუკი სითხიანი ჭურჭლიდან ჰაერი წინასწარ ამოტუმბულია, მაშინ სითხის ზემოთ იქნება მხოლოდ ნაჭერი ორთქლი.

**ნაჭერი ორთქლის წნევა.** რა მოუვა ნაჭერ ორთქლს, თუ მის მიერ დაკავებულ მოცულობას შევამცირებთ? მაგალითად, რა მოხდება თუ მუდმივ ტემპერატურას შევინარჩუნებთ და შევკუმშავთ ცილინდრში დგუშის ქვემოთ არსებულ ორთქლს, რომელიც წონასწორობაშია სითხესთან?



ორთქლის შეკუმშვისას წონასწორობა ირღვევა. დასაწყისში ორთქლის სიმკვრივე რამდენადმე იმატებს, ამის გამო აირიდან სითხეში მეტი მოლეკულა გადავა, ვიდრე სითხიდან აირში. ვინაიდან დროის ერთეულში სითხიდან ამოსული მოლეკულების რიცხვი დამოკიდებულია მხოლოდ ტემპერატურაზე და ორთქლის შეკუმშვა არ ცვლის ამ რიცხვს. ეს გაგრძელდება მანამ, სანამ კვლავ არ დამყარდება წონასწორობა და სიმკვრივე, მაშასადამე, მოლეკულების კონცენტრაცია არ მიიღებს ადრინდელ მნიშვნელობას. ამრიგად, მუდმივ ტემპერატურაზე ნაჯერი ორთქლის მოლეკულების კონცენტრაცია არ არის დამოკიდებული მოცულობაზე.

$p = nkT$  ფორმულის თანახმად, წნევა პროპორციულია კონცენტრაციისა; და რადგან ნაჯერი ორთქლის მოლეკულების კონცენტრაცია (ან სიმკვრივე) დამოკიდებული არ არის მოცულობაზე, გამოდის, რომ ნაჯერი ორთქლის წნევა დამოკიდებული არ არის მის მიერ დაკავებულ მოცულობაზე.

მოცულობისაგან დამოუკიდებელ ორთქლის  $p_0$  წნევას, რომლის დროსაც სითხე წონასწორობაშია თავის ორთქლთან, ნაჯერი ორთქლის წნევა ეწოდება.

ნაჯერი ორთქლის კუმშვისას მისი სულ უფრო მეტი ნაწილი გადადის თხევად მდგომარეობაში. მოცემული მასის სითხეს ნაკლები მოცულობა უკავია, ვიდრე იმავე მასის ორთქლს. ამიტომ ორთქლის მოცულობა იკლებს ისე, რომ სიმკვრივე უცვლელი რჩება.

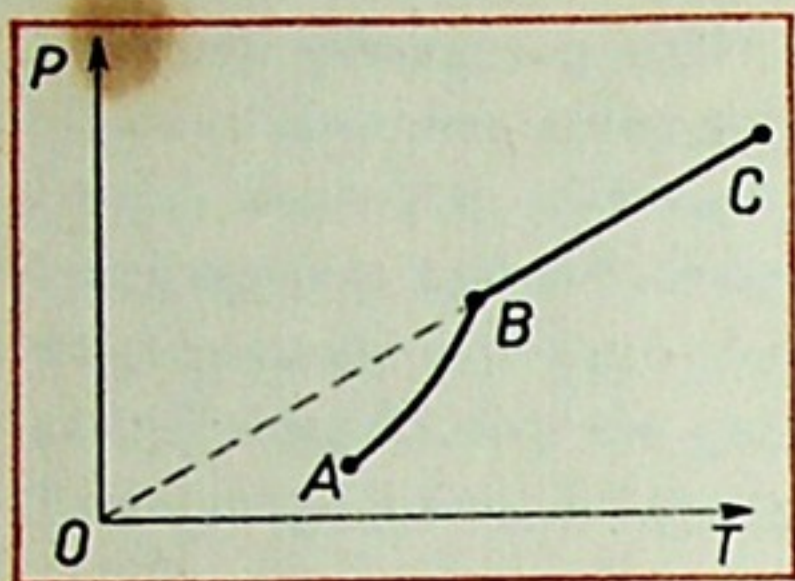
ხშირად ვხმარობთ სიტყვებს „აირი“ და „ორთქლი“, არავითარი პრინციპული განსხვავება აირსა და ორთქლს შორის არ არის. ეს სიტყვები საერთოდ ტოლუფლებიანია. სიტყვა „აირს“ ჩვეულებრივ იყენებენ იმ ნივთიერებათა მიმართ, რომელთა ნაჯერი ორთქლის წნევა ჩვეულებრივი ტემპერატურის დროს ატმოსფერულ წნევაზე მეტია (მაგალითად, ნახშირორჟანგი). პირიქით, ორთქლის შესახებ ლაპარაკობენ მაშინ, როცა ოთახის ტემპერატურაზე ნაჯერი ორთქლის წნევა ნაკლებია ატმოსფერულზე და ნივთიერება უფრო მდგრადია თხევად მდგომარეობაში (მაგალითად, წყლის ორთქლი).

## 24. ნაჯერი ორთქლის წნევის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე. ტემპერატურაზე. დუღილი. კრიტიკული ტემპერატურა

ნაჯერი ორთქლის წნევის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე. ნაჯერი ორთქლის მდგომარეობის აღწერა მიახლოებით შეიძლება იდეალური აირის მდგომარეობის (3.4) განტოლებით, მისი წნევა კი მიახლოებით განისაზღვრება ფორმულით:

$$p_0 = nkT. \quad (5.1)$$





სურ. 46.

ტემპერატურის აწევისას წნევა იზრდება. რადგან ნაჯერი ორთქლის წნევა დამოკიდებული არ არის მოცულობაზე, მაშასადამე, იგი დამოკიდებულია მხოლოდ ტემპერატურაზე.

მაგრამ  $p_0(T)$  დამოკიდებულება, რომელიც ექსპერიმენტულად არის ნაპოვნი, არ არის პირდაპირპროპორციული,

როგორც იყო იდეალური აირის შემთხვევაში მუდმივი მოცულობის დროს (ტემპერატურის ზრდისას ნაჯერი ორთქლის წნევა უფრო სწრაფად იზრდება, ვიდრე იდეალური აირის წნევა (სურ. 46, მრუდის AB უბანი).

ამის მიზეზი ის არის, რომ, როცა სისტემა — სითხე — ნაჯერი ორთქლი ხურდება თავდახურულ ჭურჭელში, სითხის ნაწილი გადაიქცევა ორთქლად. ამის შედეგად (5.1) ფორმულის თანახმად, ორთქლის წნევა იზრდება არა მარტო ტემპერატურის აწევისას, არამედ ორთქლის მოლ ეკულატა კონცენტრაციის (სიმკვრივის) გაზრდის გამოც, იდეალურ აირსა და ნაჯერ ორთქლს შორის ძირითადად ის განსხვავებაა, რომ დახურულ ჭურჭელში ორთქლის ტემპერატურის შეცვლისას (ან მოცულობის შეცვლისას მუდმივი ტემპერატურის დროს) ორთქლის მასა იცვლება. სითხის ნაწილი გადაიქცევა ორთქლად, ან პირიქით, ორთქლი ნაწილობრივ კონდენსირდება. იდეალური აირის შემთხვევაში კი ასეთი რამ არ ხდება.

როცა მთელი სითხე აორთქლდება, შემდგომი გახურებისას ორთქლი აღარ იქნება ნაჯერი და მისი წნევა მუდმივი მოცულობის პირობებში  $T$  ტემპერატურის პროპორციულად იზრდება (BC უბანი 46-ე სურათზე).

**დუღილი.** ტემპერატურის მომატებასთან ერთად სითხის აორთქლების ინტენსივობა იზრდება. ბოლოს, სითხე იწყებს დუღილს. დუღილის დროს სითხის მთელ მოცულობაში წარმოიქმნება ორთქლის სწრაფად მზარდი ბუშტულები, რომლებიც ზედაპირზე ამოდის. სითხის დუღილის ტემპერატურა მუდმივი რჩება.

გავარკვიოთ დუღილის დაწყების პირობები. სითხეში ყოველთვის არის გახსნილი აირი, რომელიც გამოიყოფა ჭურჭლის ფსკერზე, კედლებსა და სითხეში შეტივტივებულ მტვრის ნაწილაკებზე. ბუშტულებში აირთან ერთად არის სითხის ნაჯერი ორთქლი, ტემპერატურის მომატებით ნაჯერი ორთქლის წნევა იზრდება და ბუშტულების ზო-





მეტი მატულობს. ამომგდები ძალის მოქმედებით ისინი მალლა ამოდის, თუ სითხის ზედა ფენებს უფრო დაბალი ტემპერატურა აქვს, ორთქლი ბუშტულებში კონდენსირდება. წნევა სწრაფად ეცემა და ბუშტულა მცირდება. ეს ისე სწრაფად ხდება, რომ ბუშტულის კედლების შეხლისას ისმის ხმა. ასეთ მიკროაფეთქებათა სიმრავლე დამახასიათებელ ხმაურს (შიშინს) ქმნის. როცა სითხე საკმაოდ გათბება, ბუშტულის მიღევა-შეხლა წყდება და იგი ზედაპირზე ამოდის. სითხე აღუდდება. თუ დავუკვირდებით, ჩაიდანში წყლის აღუდების წინ შიშინი წყდება.

ნაჯერი ორთქლის წნევის ტემპერატურაზე დამოკიდებულებით აიხსნება, თუ რატომაა დამოკიდებული სითხის დუღილის ტემპერატურა მის ზედაპირზე არსებულ წნევაზე. ორთქლის ბუშტულა იზრდება მაშინ, როცა მის შიგნით ნაჯერი ორთქლის წნევა რამდენადმე აღემატება წნევას სითხეში, რომელიც ტოლია სითხის ზედაპირზე ჰაერის წნევისა (გარეგანი წნევა) და სითხის სვეტის ჰიდროსტატიკური წნევის ჯამისა:

$p_{\text{დუღილი}} = p_{\text{წნევა}} + p_{\text{ჰიდროსტატიკური}}$  იმ ტემპერატურაზე, რომლის დროსაც ნაჯერი ორთქლის წნევა ბუშტულებში უტოლდება წნევას სითხეში.

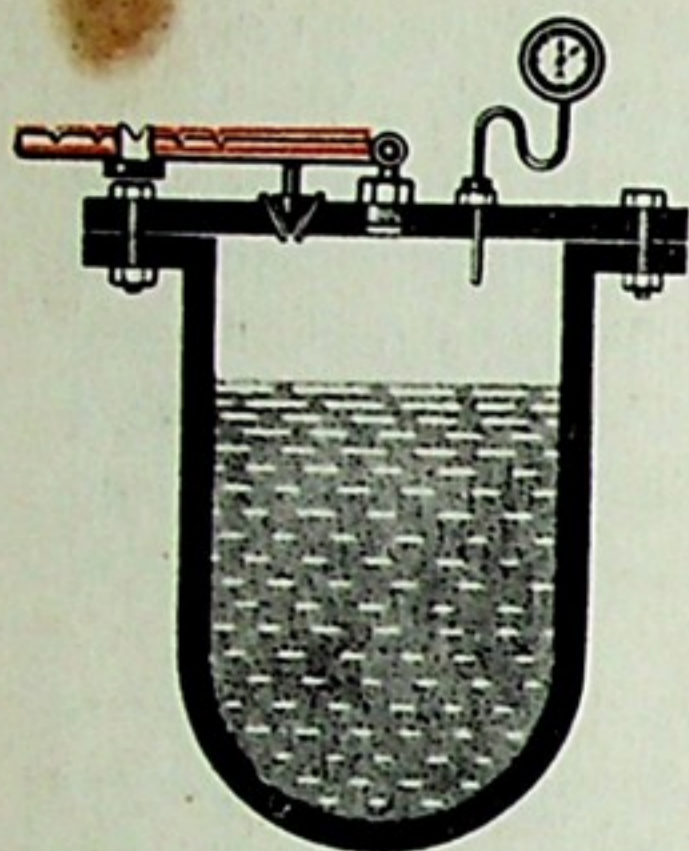
რაც უფრო მეტია გარე წნევა, მით მეტია დუღილის ტემპერატურა მაგალითად, როცა წნევა ორთქლის ქვაბში  $1,6 \cdot 10^6$  პა-ს აღწევს, წყალი  $200^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურაზეც კი არ დუღს. სამედიცინო დაწესებულებებში წყალს აღუდებენ პერმეტულად დახშულ ჭურჭელში — ავტოკლავებში (სურ. 47). ჭურჭელში წნევას ზრდიან, ამიტომ დუღილის ტემპერატურა საგრძნობლად მეტია  $100^{\circ}\text{C}$ -ზე. ავტოკლავებს იყენებენ ქირურგიული ინსტრუმენტების, სახვევი მასალისა და სხვათა სტერილიზაციისათვის.

პირიქით, თუ წნევას შევამცირებთ, ამით ჩვენ დაბლა დავწევთ დუღილის ტემპერატურას. კოლბიდან ჰაერისა და წყლის ორთქლის ამოტუმბვით, შეგვიძლია წყალი ავადუღოთ ოთახის ტემპერატურაზე (სურ. 48). მთაზე ასვლისას ატმოსფერული წნევა მცირდება. ამიტომ დაბლა იწევს დუღილის ტემპერატურაც.

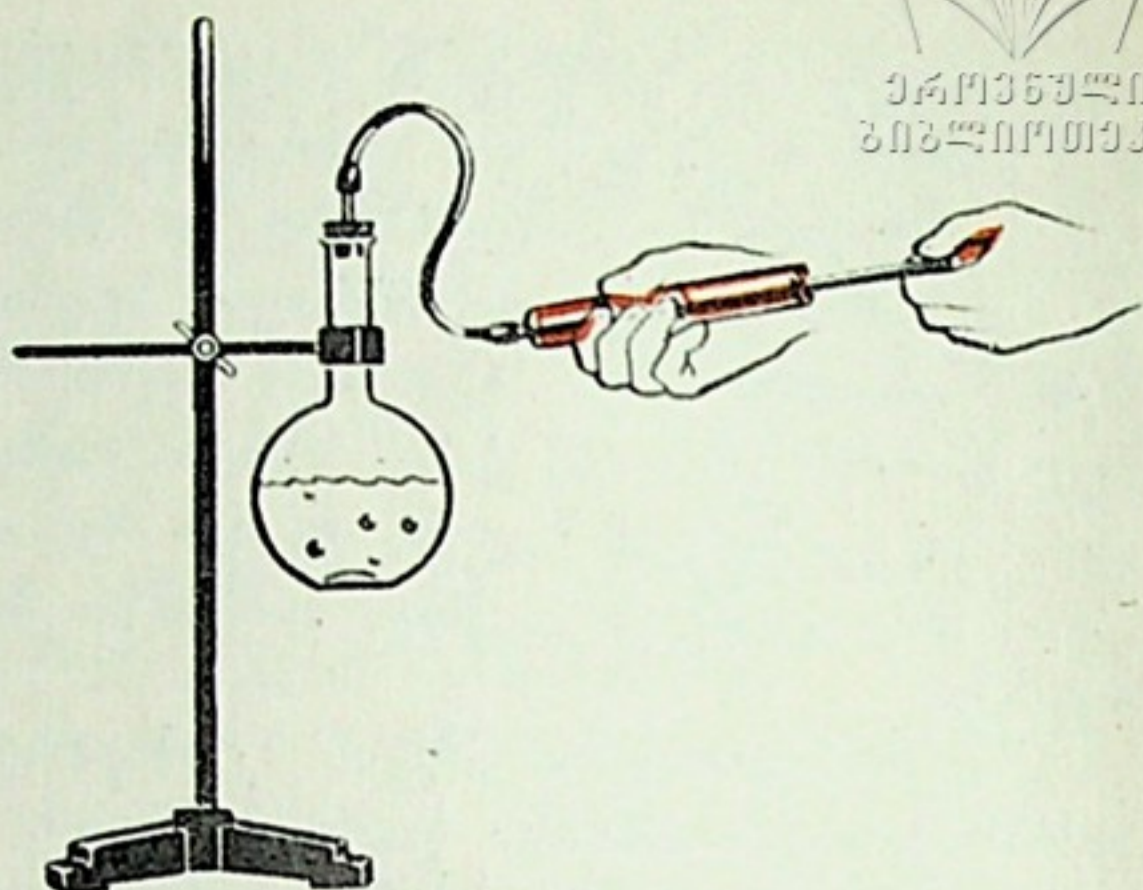
7134 მ სიმაღლეზე (ლენინის პიკი პამირზე) წნევა დაახლოებით  $4 \cdot 10^4$  პა-ია (300 მმ. ვწყ. სვ.). წყლის დუღილის ტემპერატურა კი დაახლოებით  $70^{\circ}\text{C}$ -ია.

სითხეების დუღილის ტემპერატურათა განსხვავება განისაზღვრება მათი ნაჯერი ორთქლის წნევათა განსხვავებით. რაც უფრო მაღალია ნაჯერი ორთქლის წნევა, მით უფრო დაბალია შესაბამისი სითხის დუღილის ტემპერატურა. ეს გასაგებია: ნაჯერი ორთქლის წნევა დაბალ ტემპერატურებზე ატმოსფერულს უტოლდება. მაგალითად,  $100^{\circ}\text{C}$ -ზე წყლის ნაჯერი ორთქლის წნევა  $101325$  პა-ია



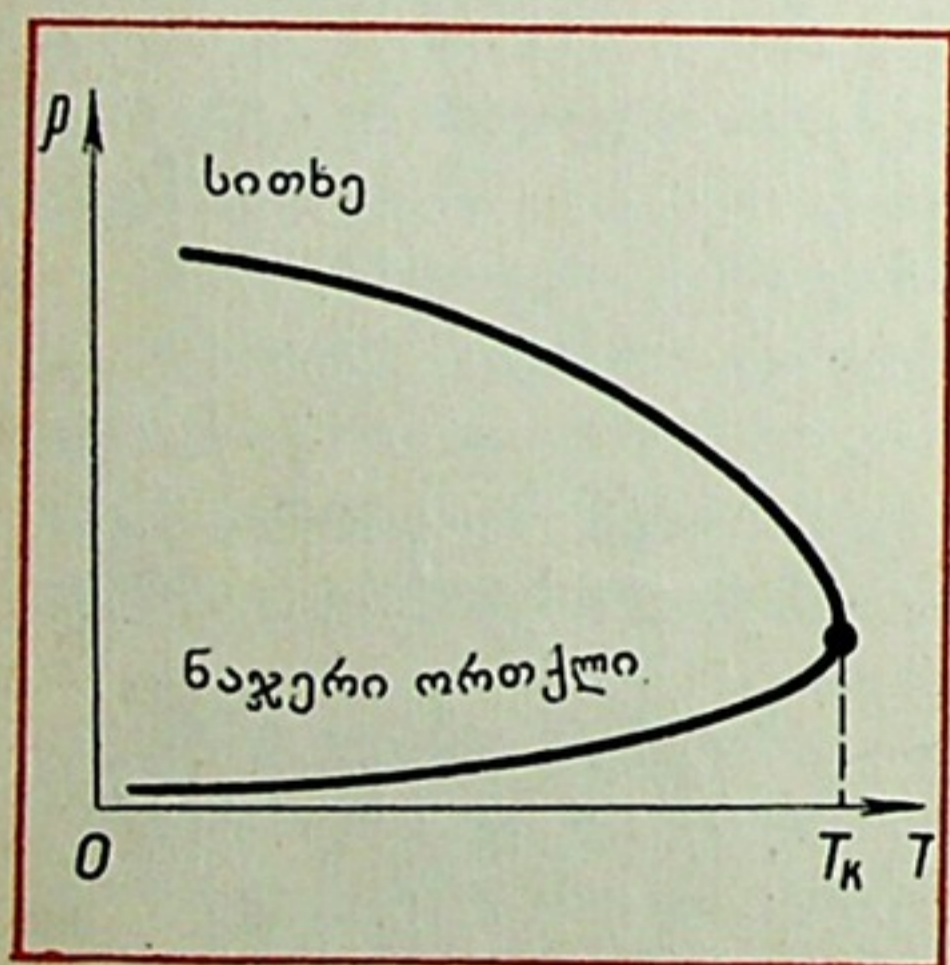


სურ. 47.



სურ. 48.

(760 მმ. ვწყ. სვ.), ვერცხლისწყლის ორთქლისა კი—მხოლოდ 117 პა (0,88 მმ. ვწყ. სვ.). ვერცხლისწყალი ნორმალური წნევის დროს დუღს  $357^{\circ}\text{C}$ -ზე.



სურ. 49.

**გადახურებული სითხე.** სითხე შეიძლება მივიღოთ მოცემული წნევის შესაბამის დუღილის ტემპერატურასთან შედარებით მაღალ ტემპერატურაზეც. ასეთ სითხეს გადახურებული სითხე ეწოდება. იმისათვის, რომ მივიღოთ გადახურებული სითხე, იგი წინასწარ გულმოდგინედ უნდა გასუფთავდეს და გათავისუფლდეს აირისაგან. ასეთ სითხეში პრაქტიკულად აღარაა ორთქლწარმოქმნის ცენტრები — ჰაერის მცირე ბუშტულები. გადა-

ხურებული სითხე არამდგრად მდგომარეობაშია. საკმარისია მასში ჩავყაროთ ცარცის ფხვნილი (რომლის ფორებში ჰაერის დიდი რაოდენობაა), რომ სითხე აჩუხჩუხდეს და ჭურჭლიდანაც გადმოიშხეფოს. ამ დროს სითხის ტემპერატურა ეცემა დუღილის ტემპერატურამდე, რადგან სითხის ორთქლად ქცევისათვის საჭიროა ენერგიის დახარჯვა.

**კრიტიკული ტემპერატურა.** ტემპერატურის გაზრდით ნაჯერი ორთქლის წნევასთან ერთად მისი სიმკვრივეც იზრდება. იმ სითხის სიმკვრივე კი, რომელიც წონასწორობაშია თავის ორთქლთან, პირიქით,



იკლებს გათბობისას სითხის გაფართოების გამო. თუ ერთ ნახაზზე გამოვსახავთ სითხისა და მისი ორთქლის სიმკვრივის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების მრუდებს, მაშინ სითხის სიმკვრივის მრუდი წავაქვევით, ორთქლისა კი — ზევით (სურ. 49).

რალაც ტემპერატურაზე, რომელსაც კრიტიკული ეწოდება, მრუდები ერთდება, ე. ი. სითხის სიმკვრივე უტოლდება ორთქლის სიმკვრივეს. წარმოდგენა კრიტიკული ტემპერატურის შესახებ მოგვცა დ. ი. მენდელეევი.

კრიტიკული ეწოდება ტემპერატურას, რომლის დროსაც სითხისა და მისი ნაჯერი ორთქლის ფიზიკური თვისებების განსხვავება ისპობა.

კრიტიკულ ტემპერატურაზე ნაჯერი ორთქლის სიმკვრივე (და წნევა) მაქსიმალურია, ორთქლთან წონასწორობაში მყოფი სითხის სიმკვრივე კი — მინიმალური. ტემპერატურის მატებისას ორთქლადქცევის კუთრი სითბო იკლებს და კრიტიკულ ტემპერატურაზე ნულის ტოლი ხდება.

ყოველი ნივთიერება თავისი კრიტიკული ტემპერატურით ხასიათდება. მაგალითად, წყლის კრიტიკული ტემპერატურაა  $\approx 375^{\circ}\text{C}$ , ხოლო თხევადი ნახშირბადის (IV) ოქსიდისა  $\text{CO}_2 \approx 31^{\circ}\text{C}$ . კრიტიკული ტემპერატურის განსაკუთრებული მნიშვნელობა ისაა, რომ მასზე უფრო მაღალ ტემპერატურებზე აირი სითხედ ვერ გადაიქცევა რაგინდ დიდიც უნდა იყოს წნევა.

## 25/ ჰაერის ტენიანობა

წყლის ორთქლი ატმოსფეროში. მიუხედავად იმისა, რომ ოკეანეების, ზღვების, ტბებისა და მდინარეების წყლის ზედაპირი უზარმაზარია, წყლის ორთქლი ჰაერში მაინც არაა ნაჯერი. ჰაერის მასის გადაადგილების შედეგად ჩვენი პლანეტის ზოგიერთ ადგილას მოცემულ მომენტში წყლის აორთქლება მეტია კონდენსაციაზე, სხვაგან კი, პირიქით, კონდენსაცია სჭარბობს. მაგრამ სინამდვილეში ჰაერში ყოველთვის არის წყლის ორთქლი.

ჰაერში წყლის ორთქლის შემცველობა — ჰაერის ტენიანობა — რამდენიმე სიდიდით ხასიათდება.

წყლის ორთქლის პარციალური წნევა. ატმოსფერული ჰაერი სხვადასხვა აირისა და წყლის ორთქლის ნარევი. თითოეულ აირს თავისი წვლილი შეაქვს ჰაერის ჯამურ წნევაში. წნევას, რომელსაც გამოიწვევდა წყლის ორთქლი, დანარჩენი აირები რომ არ ყოფილიყო, წყლის ორთქლის პარციალური წნევა ეწოდება. წყლის ორთქლის პარციალური წნევა ჰაერის ტენიანობის ერთ-ერთ მაჩვენებლად არის



იღებულნი. შმას გამოსახვენ წნევის ერთეულებით — პასკალებით ან  
ვერცხლისწყლის სვეტის მილიმეტრებით. ]

ფარდობითი ტენიანობა წყლის ორთქლის პარციალური წნევა  
ჯერ კიდევ არ გვაძლევს საშუალებას ვიმსჯელოთ იმაზე, თუ წყლის  
ორთქლი მოცემულ პირობებში რამდენად შორსაა ნაჯერობიდან. სწო-  
რედ ამაზეა დამოკიდებული წყლის აორთქლების ინტენსიურობა და  
ცოცხალი ორგანიზმის მიერ ტენის დაკარგვა. ლამიტომ არის შემოღე-  
ბული სიდიდე — ფარდობითი ტენიანობა, რომელიც გვიჩ-  
ვენებს, რამდენად შორსაა წყლის ორთქლი ნაჯერობიდან მოცემულ  
ტემპერატურაზე.

ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა ეწოდება მოცემულ ტემპერა-  
ტურაზე ჰაერში არსებული წყლის ორთქლის  $p$  პარციალური წნევის  
შეფარდებას იმავე ტემპერატურაზე ნაჯერი ორთქლის  $p_0$  წნევასთან, ]  
გამოსახულს პროცენტობით:

$$\varphi = \frac{p}{p_0} 100\%. \quad (5. 2)$$

ნამის წერტილი. მუდმივი წნევისას უჯერი ორთქლის გაცივება,  
აღრე თუ გვიან გამოიწვევს მის გადაქცევას ნაჯერ ორთქლად. ამაში  
ადვილად დავრწმუნდებით, თუ დავაკვირდებით წყლის ნაჯერი ორთქ-  
ლის წნევის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების გრაფიკს (სურ. 50).

ვთქვათ,  $t_1$  ტემპერატურაზე წყლის ორთქლის პარციალური წნევა  
 $p_1$ -ის ტოლია. ამ დროს ორთქლის მდგომარეობა გამოისახება  $A$   
წერტილით. თუ მუდმივი წნევის პირობებში ორთქლს გავაცივებთ  
 $t_2$  ტემპერატურამდე, როცა  $p_1 = \text{const}$ , ორთქლი ნაჯერი გახდება და  
მისი მდგომარეობა  $B$  წერტილით გამოისახება.

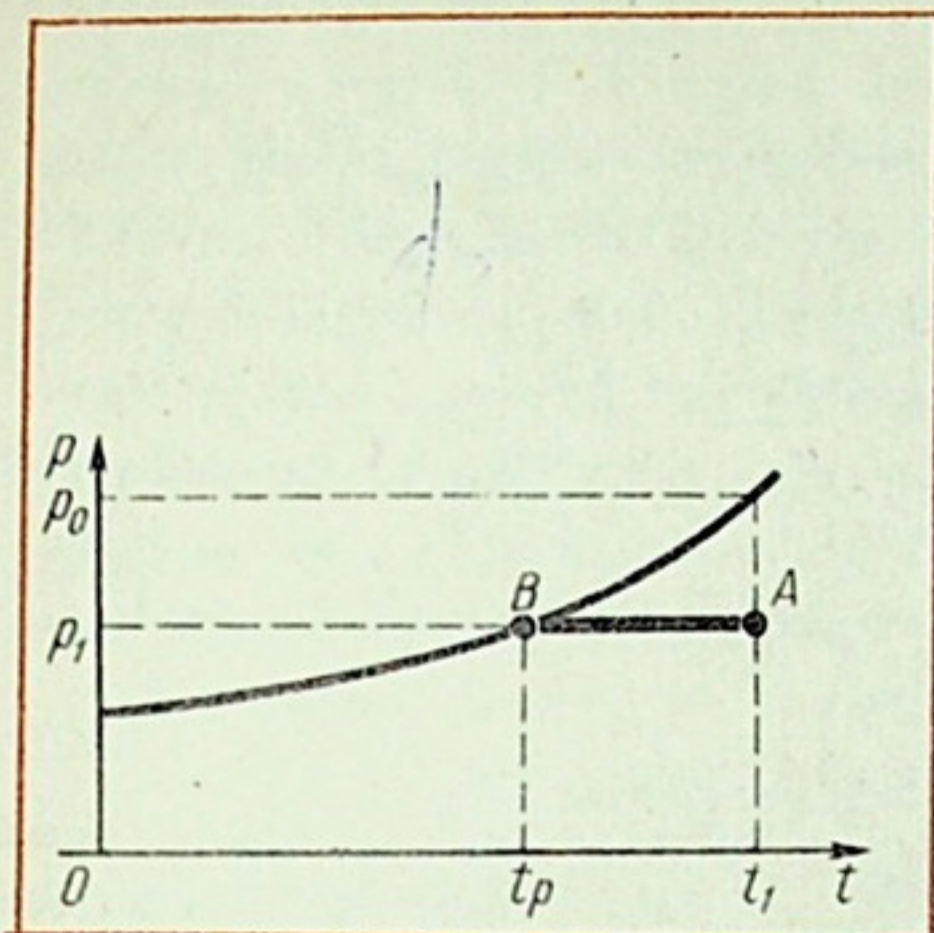
ტემპერატურას ( $t_2$ ), რომელზეც წყლის ორთქ-  
ლი ნაჯერი ხდება, ნამის წერტილი ეწოდება. ]

ნამის წერტილამდე ჰაერის გაცივებისას იწყება ორთქლის კონ-  
დენსაცია: წარმოიქმნება ნისლი და ჩნდება ნამი. ]

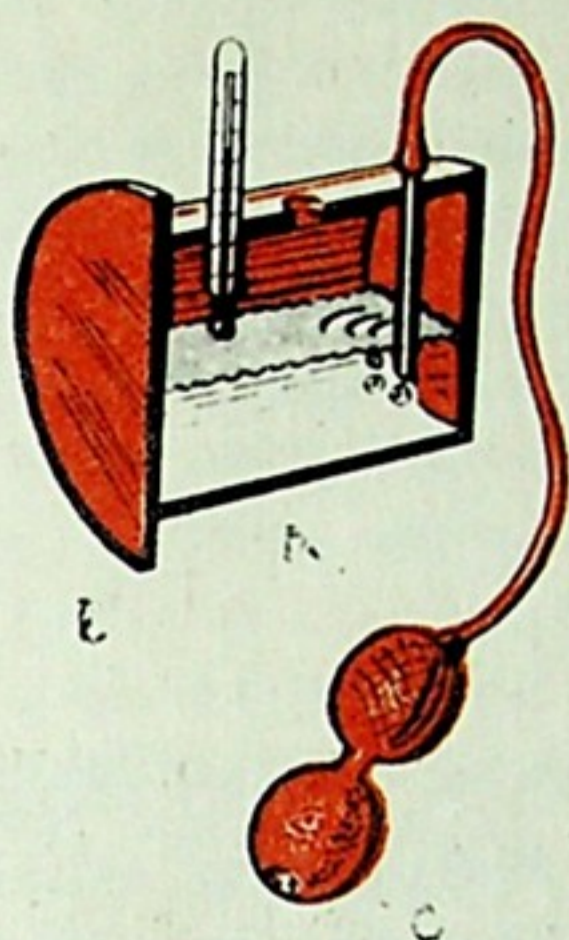
ნამის წერტილი ახასიათებს ჰაერის ტენიანობას, რადგან ის სა-  
შუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ წყლის ორთქლის პარციალური  
წნევა და ფარდობითი ტენიანობა. მართლაც,  $t_2$  უცნობილია ნამის  
წერტილი, ცნობილი ხდება წყლის ორთქლის  $p_1$  პარციალური წნევა. ]  
ის შეიძლება მოვნახოთ ცხრილში, რომელშიც მოცემულია ნაჯერი  
ორთქლის წნევის მნიშვნელობა სხვადასხვა ტემპერატურაზე (იხ.  
ცხრილი ფორზაცზე). ნაჯერი ორთქლის  $t_1$  ტემპერატურის შესაბამის  
 $p_0$  წნევასაც ცხრილში ვნახავთ, როცა ვიცით  $p_1$  და  $p_0$ , ვიპოვიოთ ფარ-  
დობით ტენიანობას

$$\varphi = \frac{p_1}{p_0} 100\%.$$

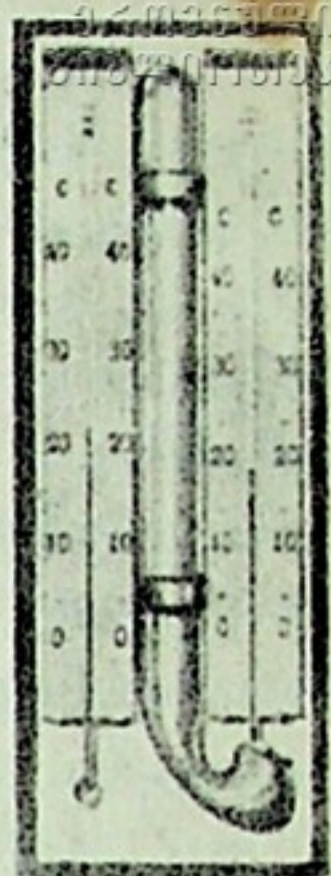




სურ. 50.



სურ. 51.



სურ. 52.

**ჰიგრომეტრები** <sup>1</sup>. ჰაერის ტენიანობას ზომავენ გასსაკუთრებული ხელსაწყოებით — ჰიგრომეტრებით და ფსიქომეტრებით <sup>2</sup>. ჯონდენსაციური ჰიგრომეტრი საშუალებას გვაძლევს უშუალოდ განვსაზღვროთ ნამის წერტილი. ამ ტიპის უმარტივესი ხელსაწყო წარმოადგენს ლითონის A ყუთს, რომლის წინა B კედელი კარგადაა გაპრიალებული (სურ. 51). ყუთში ასხამენ ადვილად აქროლად სითხეს — ეთერს და შიგ დებენ თერმომეტრს. რეზინის C ბუშტის მეშვეობით ყუთში ჩაბერავენ ჰაერს, რაც იწვევს ეთერის ძლიერ აორთქლებას და ყუთის სწრაფ გაცივებას. თერმომეტრზე ათვლიან ტემპერატურას, რომლის დროსაც კედლის გაპრიალებულ ზედაპირზე ნამის წვეთები გაჩნდება. J

წნევა კედელთან მიმდებარე უბანში მუდმივად ითვლება, რადგან ეს უბანი ატმოსფეროს ერთვის და გაცივების გამო წნევის დაწევა ორთქლის კონცენტრაციის გაზრდით კომპენსირდება.

ნამის გაჩენა მიუთითებს, რომ წყლის ორთქლი ნაჯერი გახდა. ჰაერის ტემპერატურისა და ნამის წერტილის ცოდნა საშუალებას გვაძლევს ვიპოვოთ წყლის ორთქლის პარციალური წნევა და ფარდობითი ტენიანობა იმ ცხრილის გამოყენებით, რომელშიც ნაჯერი ორთქლის წნევის ტემპერატურაზე დამოკიდებულებაა მოცემული.

**ფსიქრომეტრი.** ფსიქრომეტრი შედგება ორი თერმომეტრისაგან (სურ. 52). ერთი მათგანის რეზერვუარი მშრალია და თერმომეტრი

<sup>1</sup> ბერძნული სიტყვა „ჰიგროს“ — ტენიანი.

<sup>2</sup> ბერძნული სიტყვა „ფსიქროს“ — ცივი.



აჩვენებს ჰაერის ტემპერატურას. მეორის რეზერვუარზე შემოხვეულია ქსოვილის ვიწრო ნაჭერი, რომლის ბოლო ჩაშვებულია წყალში. წყალი ორთქლდება, რის გამოც თერმომეტრი ცივდება. (რაც მეტია ფარდობითი ტენიანობა, მით უფრო ნაკლებად ინტენსიურია აორთქლება და მით უფრო მაღალ ტემპერატურას აჩვენებს თერმომეტრი, რომელსაც სველი ქსოვილი აქვს შემოხვეული. X როცა ფარდობითი ტენიანობა 100%-ია, წყალი საერთოდ არ აორთქლდება და ორივე თერმომეტრის ჩვენება ერთნაირი იქნება. ამ თერმომეტრების ტემპერატურათა სხვაობისა და სპეციალური ცხრილის საშუალებით განვსაზღვრავთ ჰაერის ტენიანობას. ჰაერის ტენიანობა ფსიქრომეტრით უფრო ზუსტად იზომება, ვიდრე ჰიგრომეტრით. ]

**ტენიანობის მნიშვნელობა.** ადამიანის კანის ზედაპირიდან ტენის აორთქლების ინტენსიურობა დამოკიდებულია ჰაერის ტენიანობის სიდიდეზე. ტენის აორთქლებას კი დიდი მნიშვნელობა აქვს სხეულის ტემპერატურის უცვლელად შენარჩუნებისათვის. კოსმოსურ ხომალდებში, ჰაერის ტემპერატურასა და წნევასთან ერთად უზრუნველყოფილია ადამიანისათვის ყველაზე ხელსაყრელი ფარდობითი ტენიანობაც (40—60%).

ტენიანობის ცოდნას დიდი მნიშვნელობა აქვს მეტეოროლოგიაში ამინდის გამოსაცნობად. მართალია, ატმოსფეროში წყლის ორთქლის რაოდენობა შედარებით მცირეა (დაახლოებით 1%), მაგრამ მისი როლი ატმოსფერულ მოვლენებში მნიშვნელოვანია. წყლის ორთქლის კონდენსაცია იწვევს ღრუბლების წარმოქმნას და ნალექს. ამ დროს სითბოს დიდი რაოდენობა გამოიყოფა. წყლის აორთქლებას კი, პირიქით, თან ახლავს სითბოს შთანთქმა.

საფეიქრო, საკონდიტრო, თამბაქოსა და სხვა საწარმოებში პროცესების ნორმალური მიმდინარეობისათვის საჭიროა განსაზღვრული ტენიანობა. ხელოვნების ნიმუშებისა და წიგნების შენახვა კი საჭიროებს ჰაერის ტენიანობის მკაცრად დაცვას, რისთვისაც მუზეუმების კედლებზე ჰკიდია ფსიქრომეტრები.

- 9
1. რას ეწოდება ნაჯერი ორთქლი?
  2. რატომ არაა დამოკიდებული ნაჯერი ორთქლის წნევა მოცულობაზე?
  3. რატომაა, რომ ტემპერატურის აწევისას ნაჯერი ორთქლის წნევა უფრო სწრაფად იზრდება, ვიდრე იდეალური აირისა?
  4. რატომ იზრდება დუდილის ტემპერატურა წნევის გადიდებით?
  5. რას ეწოდება კრიტიკული ტემპერატურა?
  6. განმარტეთ ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა.
  7. როგორ განვსაზღვროთ ფარდობითი ტენიანობა, თუ ვიცით ნამის წერტილი?



ამოცანების ამოხსნისას უნდა გავითვალისწინოთ, რომ ნაჯერი ორთქლის წნევა და სიმკვრივე დამოკიდებულია არა მოცულობაზე, არამედ მხოლოდ ტემპერატურაზე.

კრიტიკული ტემპერატურიდან მოშორებით იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება ნაჯერი ორთქლისთვისაც შეიძლება გამოვიყენოთ. მაგრამ ნაჯერი ორთქლის შეკუმშვის ან გახურების დროს მისი მასა მუდმივი აღარ რჩება.

1.  $V_1 = 0,5$  მ<sup>3</sup> მოცულობის დახურულ ჭურჭელში მოთავსებულია  $m = 0,5$  კგ მასის წყალი. ჭურჭელი გააცხელეს  $t = 147^\circ\text{C}$  ტემპერატურამდე. რამდენით უნდა შევცვალოთ ჭურჭლის მოცულობა, რომ მასში იყოს მხოლოდ ნაჯერი ორთქლი?  $t = 147^\circ\text{C}$  ტემპერატურაზე ნაჯერი ორთქლის წნევა  $p_0 = 4,7 \cdot 10^5$  პა.

ამოხსნა.  $p_0$  წნევის დროს ნაჯერი ორთქლის მოცულობა

$$V = \frac{mRT}{p_0M}; \quad V = 0,2 \text{ მ}^3,$$

სადაც  $M = 0,18$  კგ/მოლი წყლის მოლური მასაა. ჭურჭლის მოცულობა  $V_1 > V$  და ორთქლი ნაჯერი არაა. იმისთვის, რომ ორთქლი გახდეს ნაჯერი, საჭიროა ჭურჭლის მოცულობა შევამციროთ

$$\Delta V = V_1 - V = V_1 - \frac{mRT}{p_0M} = 0,3 \text{ მ}^3 \text{ სიდიდით.}$$

2. ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა დახურულ ჭურჭელში  $t_1 = 5^\circ\text{C}$  ტემპერატურის დროს  $\varphi_1 = 84\%$ ,  $t_2 = 22^\circ\text{C}$  ტემპერატურისას კი  $\varphi_2 = 80\%$ . რამდენჯერ მეტია წყლის ნაჯერი ორთქლის წნევა  $t_2$  ტემპერატურაზე,  $t_1$ -თან შედარებით?

ამოხსნა. წყლის ორთქლის წნევა ჭურჭელში  $T_1 = 278$  კელ. ტემპერატურის დროს  $p_1 = \varphi_1 p_{01}$ , სადაც  $p_{01}$  ნაჯერი ორთქლის წნევაა  $T_1$  ტემპერატურის დროს. ანალოგიურად  $T_2 = 295$  კელ ტემპერატურისას  $p_2 = \varphi_2 p_{02}$ . რადგან მოცულობა მუდმივია, ამიტომ შარლის კანონის თანახმად,

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

აქედან

$$\frac{p_{02}}{p_{01}} = \frac{\varphi_1 T_2}{\varphi_2 T_1} \approx 3.$$

7. ფიზიკა, X კლ.





1.  $U$ -ს მაგვარ დარჩილული მილის ორივე მუხლში წყალი სხვადასხვა დონეზე დგას. შეიძლება თუ არა ვთქვათ, რომ წყლის ნაჯერი ორთქლის გარდა წყლის ზემოთ არის ჰაერი? რატომ?

2. როგორ შეგვიძლია ავადულოთ წყალი, თუ ჰურქელს, რომელშიც ის ასხია, გავაცივებთ?

3. როგორ შეიცვლება წყლის დუღილის ტემპერატურა და ორთქლად ქცევის კუთრი სითბო, თუ წყლიან ჰურქელს ღრმა შახტში ჩავუშვებთ?

4. რას უდრის ორთქლის სიმკვრივე ბუშტებში, რომლებიც წყლის ზედაპირზე ამოდიან, თუ წყალი დუღს ატმოსფერული წნევის დროს?

5. გარეთ მთელი დღე უინელლავს შემოდგომის ცივი წვიმა. ოთახში გაფენილია გარეცხილი თეთრეული. დააჩქარებს თუ არა სარკმლის გაღება თეთრეულის გაშრობას?

\*6. შემწოვ ტუმბოს ცივი წყალი ააქვს  $10,3$  მ სიმაღლეზე. რა სიმაღლეზე აიტანს ის მდულარე წყალს ( $100^{\circ}\text{C}$ -ს დროს), თუ ტუმბოს დგუში ძალიან ნელა გადაადგილდება?

7. კონდენსაციური ჰიგრომეტრის საშუალებით განსაზღვრული იქნა ნამის წერტილი; ის აღმოჩნდა  $10^{\circ}\text{C}$ . რას უდრის ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა, თუ მისი ტემპერატურა  $20^{\circ}\text{C}$ -ია (ვისარგებლოთ სახელმძღვანელოს ფორმულაზე მოცემული ცხრილით).

8.  $V=120$  მ<sup>3</sup> მოცულობის ოთახში  $t=15^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურისას ფარდობითი ტენიანობა  $\varphi=60\%$ . განვსაზღვროთ წყლის ორთქლის მასა ოთახის ჰაერში. ნაჯერი ორთქლის წნევა  $t=15^{\circ}\text{C}$ -ზე ტოლია  $p_0=12,8$  მმ ვწყ. სვ.

\*9.  $t=20^{\circ}\text{C}$ -ზე ოთახში ფარდობითი ტენიანობა  $\varphi_1=20\%$ . რა მასის წყალი უნდა ავაორთქლოთ ტენიანობის გაზრდისათვის  $\varphi_2=50\%$ -მდე, თუ ოთახის მოცულობა  $V=40$  მ<sup>3</sup>?  $t=20^{\circ}\text{C}$ -ზე წყლის ნაჯერი ორთქლის სიმკვრივე  $\rho_0=1,73 \cdot 10^{-2}$  კგ/მ<sup>3</sup>.

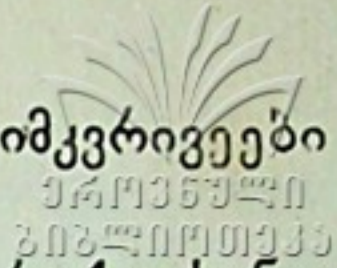
## მ ო კ ლ ე დ ა ს კ ვ ნ ა

სითხესა და მის ორთქლს შორის შეიძლება არსებობდეს დინამიკური წონასწორობა, როცა დროის გარკვეულ შუალედში სითხიდან ამოტყორცნილი მოლეკულების რიცხვი ტოლია იმავე დროში ორთქლიდან სითხეში დაბრუნებული მოლეკულების რიცხვისა. ორთქლს, რომელიც წონასწორობაშია თავის სითხესთან, ნაჯერი ორთქლი ეწოდება. ნაჯერი ორთქლის წნევა დამოკიდებული არაა მოცულობაზე და განისაზღვრება მხოლოდ ტემპერატურით.

სითხე დუღს იმ ტემპერატურაზე, რომლის დროსაც ნაჯერი ორთქლის წნევა ბუშტულებში გაუტოლდება სითხეში არსებულ წნევას. რაც მეტია გარე წნევა, მით მაღალია დუღილის ტემპერატურა.

ტემპერატურის მომატებით ნაჯერი ორთქლის სიმკვრივე იზრდება, სითხის სიმკვრივე კი კლებულობს. ტემპერატურაზე, რომელსაც კრიტიკულს უწოდებენ, განსხვავება (ფიზიკური თვისებების მხრივ)





ისპობა სითხესა და მის ნაჯერ ორთქლს შორის. მათი სიმკვრივეები ერთნაირი ხდება.

ატმოსფერული ჰაერი სხვადასხვა აირისა და წყლის ორთქლის ნარევიანია. წყლის ორთქლის შემცველობა ჰაერში — ჰაერის ტენიანობა — ხასიათდება გარკვეული სიდიდეებით. წნევას, რომელსაც წყლის ორთქლი მოახდენდა თუ სხვა აირები არ იქნებოდა, წყლის ორთქლის პარციალური წნევა ეწოდება.

ჰაერის ფარდობითი ტენიანობა ეწოდება პროცენტებით გამოსახულ წილადს, რომლის მრიცხველშია მოცემულ ტემპერატურაზე ჰაერში არსებული წყლის ორთქლის პარციალური წნევა, მნიშვნელში კი ნაჯერი ორთქლის წნევა იმავე ტემპერატურაზე.

ტენიანობის ცოდნას დიდი მნიშვნელობა აქვს მეტეოროლოგიაში ამინდის წინასწარმეტყველებისათვის.

## VI თავი

### სითხის ზედაპირული დაჭიმულობა

#### 26. ზედაპირული დაჭიმულობა

ბუნებაში მიზიდულობის, დრეკადობისა და ხახუნის ძალებთან ერთად მოქმედებს კიდევ ერთი ძალა, რომელსაც, ჩვეულებრივ, ყურადღებას არ ვაქცევთ. ეს ძალა მოქმედებს ყველა სითხის ზედაპირის მხების გასწვრივ.

წარმოვიდგინოთ, რომ სითხის ზედაპირზე გავლებულია წირი, რომელიც ზედაპირს ორ ნაწილად ყოფს. ძალებს, რომლებიც ამ ნაწილებს ერთმანეთიდან ეწევა, ზედაპირული დაჭიმულობის ძალებს ვუწოდებთ (სურ. 53). ეს ძალები შედარებით მცირეა, მაგრამ უმნიშვნელო როლს როდი ასრულებს ბუნებაში.

ზედაპირული დაჭიმულობის ძალთა მოქმედება. ზედაპირული დაჭიმულობის ძალის თავისებურებას ყველაზე ადვილად ჩავწვდებით, თუ არამჭიდროდ დაკეტილ ონკანზე დავაკვირდებით წვეთის წარმოქმნას. ყურადღებით ვადევნოთ თვალი, თუ როგორ იზრდება წვეთი თანდათანობით, იქმნება შევიწროებული ყელი და წვეთი წყდება (სურ. 54). დიდი ფანტაზია არაა საჭირო იმის წარმოსადგენად, რომ წყალი თითქოს მოქცეულია ელასტიკურ პარკში და ეს პარკი იხვევა, როცა მისი სიმტკიცე არაა საკმარისი წყლის დიდი მასის შესაკავებლად. სინამდვილეში, რა თქმა უნდა, წყლის გარდა წვეთში არაფერი არაა, მაგრამ თვით წყლის ზედაპირული ფენა იქცევა გა-



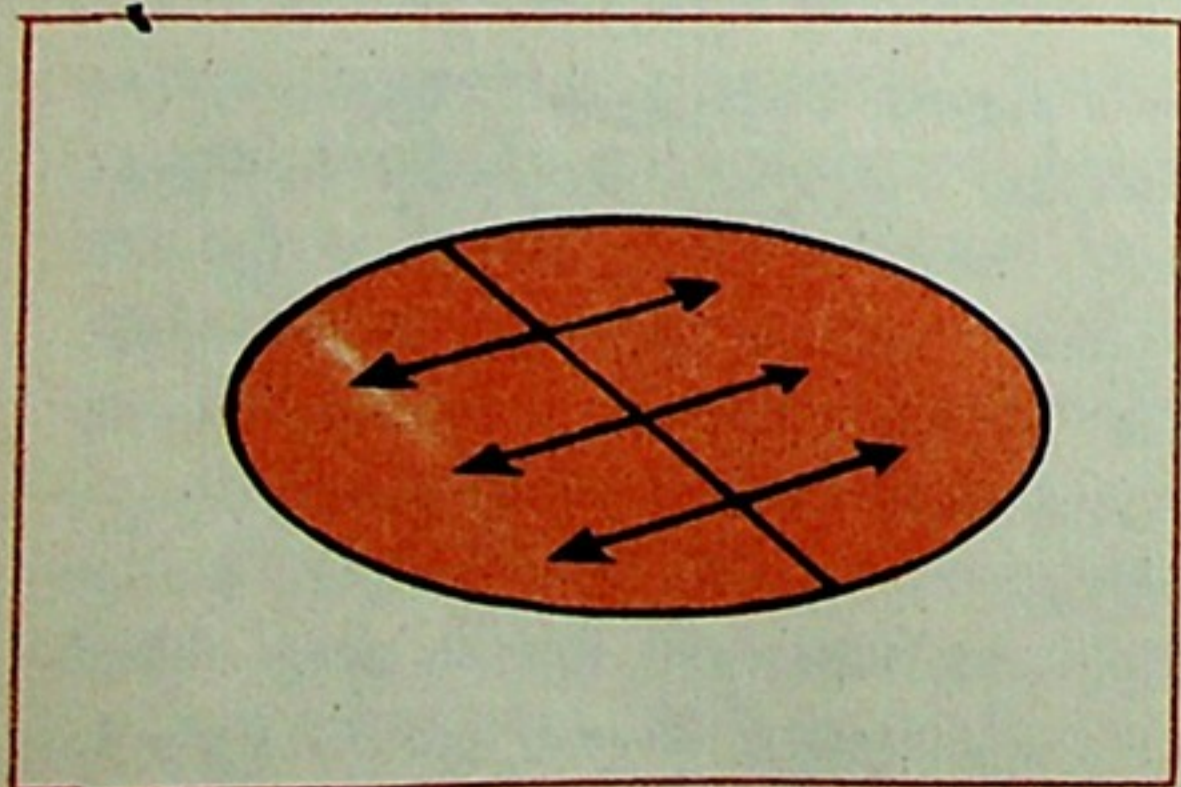
ჭიმული ელასტიკური აფსკივით. ასეთივე შთაბეჭდილებას ახდენს საპნის ბუშტის აფსკი. ის წააგავს საბავშვო ბუშტის თხელ დაჭიმულ რეზინს.

დავდოთ ფრთხილად ნემსი წყლის ზედაპირზე. ზედაპირული აფსკი ჩაიზნიჭება და ნემსს ჩაძირვის საშუალება არ მიეცემა. ამავე მიზეზით მსუბუქი მწერი — წყალმზომელა — ისე სრიალებს წყლის ზედაპირზე, როგორც მოციგურავე ყინულზე (იხ. ფერადი დანართი 2).

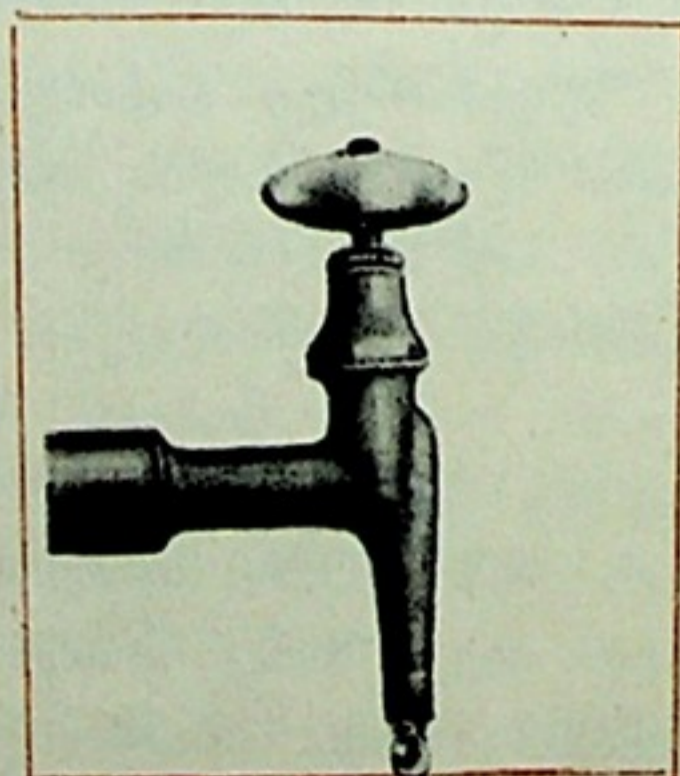
თუ წვრილნახვრეტებიან ცხავზე ფრთხილად დავასხამთ წყალს, მაშინ აფსკის ჩაზნიჭის გამო წყალი არ დაიღვრება. ქსოვილი იგივე ცხავია, რომელიც ძაფების გადახლართვით მიიღება. ზედაპირული დაჭიმულობა ძლიერ აძნელებს მასში წყლის გაჟონვას, რის გამოც ქსოვილი მყის არ სველდება.

შემცირებისაკენ სწრაფვით ზედაპირული აფსკი სითხეს სფერულ ფორმას მისცემდა, რომ არ ყოფილიყო დედამიწის მიზიდულობა. რაც უფრო პატარაა წვეთი, მით უფრო დიდ როლს ასრულებს ზედაპირული ძალა მოცულობითთან (მიზიდულობა) შედარებით. ამიტომაც ნამის მცირე წვეთები თავისი ფორმით სფეროს მოგვაგონებს (იხ. ფერადი დანართი 2). თავისუფალი ვარდნის დროს უწონობის მდგომარეობა იქმნება, ამიტომ წვიმის წვეთი თითქმის ზუსტად სფეროსებრია.

კოსმოსურ ზომალდში, რომელიც უწონობის მდგომარეობაშია, სფერულ ფორმას ღებულობს არა მარტო ცალკეული წვეთი, არამედ დიდი მასის სითხეც.



სურ. 53.



სურ. 54.



**ზედაპირული დაჭიმულობის  
ძალთა წარმოშობა.** ზედაპირული  
დაჭიმულობის ძალების გაჩენა  
თვალსაჩინოდ ასე შეიძლება ავხს-  
ნათ: წარმოვიდგინოთ, რომ ინდი-  
ვიდთა დიდ ჯგუფს ახასიათებს  
ურთიერთმიზიდვა, ან უბრალოდ,  
ისინი თავისი სურვილის შესაბა-  
მისად ერთმანეთისაკენ ისწრაფ-  
ვიან, მაშინ შედეგი იქნება ერთი:  
ინდივიდები შეიკვრებიან გუნდად,  
მსაგავსად ფუტკრის ნაყარისა.  
თითოეული ინდივიდი „მიისწრა-  
ფვის“ გუნდის შიგნით, რის გამოც



სურ. 55.

გუნდის ზედაპირი შემცირდება და სფეროს მიუახლოვდება (სურ. 55).  
ეს იქნება ზედაპირული დაჭიმულობის ძალების წარმოქმნის მოდელი.

წყლის ან სხვა სითხის მოლეკულები ურთიერთმიზიდვის გამო  
დაახლოვებას ესწრაფვიან. სითხის ზედაპირის თითოეულ მოლეკულას  
იზიდავს სიღრმეში მოთავსებული დანარჩენი მოლეკულები, ამიტომ  
ზედაპირის მოლეკულებს აქვს სითხეში ჩაძირვის ტენდენცია. მოლე-  
კულების ერთი „ბინადარი“ მდებარეობიდან მეორეში გადახტომის  
გამო სითხე დენადია, ამიტომ ღებულობს ისეთ ფორმას, რომლის  
დროსაც ზედაპირის მოლეკულების რაოდენობა მინიმალურია.

მინიმალური ფართობის ზედაპირი კი, ერთი და იმავე მოცულო-  
ბის დროს, სფეროს აქვს. სითხის ზედაპირი მცირდება, ეს კი აღიქმე-  
ბა როგორც ზედაპირული დაჭიმულობა.

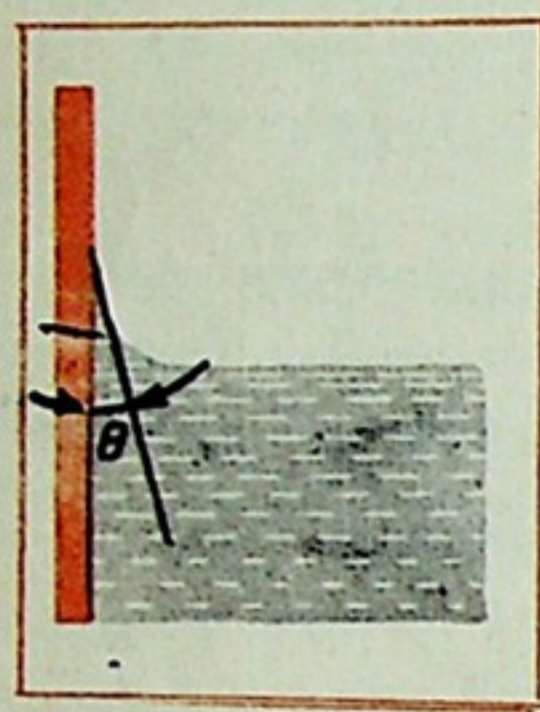
აქ ირკვევა, რომ ზედაპირული ძალების წარმოშობა სრულიად  
განსხვავებულია დაჭიმული რეზინის აფსკის დრეკადი ძალების წარ-  
მოშობისაგან. რეზინის შემოკლებისას დრეკადი ძალა მცირდება, ზე-  
დაპირული დაჭიმულობის ძალები კი სრულიად არ იცვლება აფსკის  
ზედაპირის შემცირების მიხედვით, რადგან სითხის სიმკვრივე და,  
მაშასადამე, ზედაპირზე მოლეკულებს შორის საშუალო მანძილი უცვ-  
ლელი რჩება.

ამრიგად, ზედაპირული დაჭიმულობის ძალთა წარმოქმნას ვერ  
ავხსნით ისევე მარტივად, როგორც დრეკადობის ძალების წარმოქმ-  
ნას, სადაც ყველაფერი დაკავშირებულია მოლეკულებს შორის მანძი-  
ლის შეცვლასთან. ზედაპირული დაჭიმულობის ძალები ვლინდება  
მთელი სითხის ფორმის რთული შეცვლისას მოცულობის მუდმივო-  
ბის პირობებში.



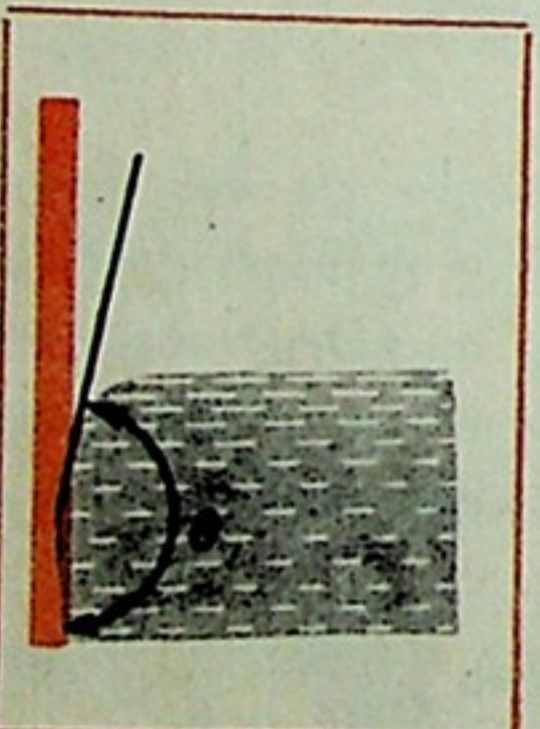


**დასველება.** სითხისა და მყარი სხეულის საზღვარზე ვაკვირდებით დასველებას. დასველება არის მოვლენა, რომელიც წარმოიქმნება სითხისა და მყარი სხეულის მოლეკულების ურთიერთქმედების შედეგად და იწვევს სითხის ზედაპირის გამრუდებას მყარი სხეულის ზედაპირთან.  $\curvearrowright$



სურ. 58.

შეიძლება უგულვებლევყოთ მიზიდვა სითხისა და აირის მოლეკულებს შორის, მაგრამ შეუძლებელია მხედველობაში არ მივიღოთ სითხისა და მყარი სხეულის მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედება. მყარი სხეულის შემხები სითხის ზედაპირის ფორმა დამოკიდებულია იმაზე, თუ რომელი ძალაა მეტი: სითხისა და მყარი სხეულის მოლეკულებს შორის არსებული მიზიდულობის ძალა, თუ თვით სითხის მოლეკულებს შორის არსებული მიზიდულობის ძალა.



სურ. 59.

უპირველ შემთხვევაში სითხე დამსველებელია და მისი ზედაპირის ფორმა ჭურჭლის კედელთან (სურ. 58) ისეთია, რომ  $\theta$  კუთხე სითხის ზედაპირისადმი მხებ სიბრტყესა და კედელს შორის მახვილია (სითხე ეკვრის კედელს). მეორე შემთხვევაში სითხე არ დასველებს მყარ ზედაპირს და  $\theta$  კუთხე (სურ. 59) ბლაგვია (სითხე შორდება კედელს).  $\curvearrowright$

სრული დასველებისას კუთხე  $\theta = 0^\circ$ , ხოლო სრული არდასველებისას  $\theta = 180^\circ$ .  $\curvearrowright$

დასველებას დიდი მნიშვნელობა აქვს მრეწველობასა და ყოფა-ცხოვრებაში. კარგი დასველება საჭიროა შეღებვის, რეცხვის, ფოტოგრაფიული მასალების დამუშავების, გალაქვის და სხვა მსგავს შემთხვევებში. ზის, ტყავის, რეზინის და სხვა მასალების შეწებება აგრეთვე დასველების გამოყენების მაგალითია. დასველების თვისებასთან არის დაკავშირებული ჩრჩილვა. იმისათვის, რომ გამდნარი სარჩილი კარგად მოეფინოს ლითონის საგნების ზედაპირს და



მიეკრას მას, საჭიროა ზედაპირი გასუფთავდეს ცხიმისაგან, მტვრისა და ოქსიდებისაგან. კალის სარჩილით კარგად მიერჩილება სპილენძის, თითბრის და სხვა ლითონის დეტალები. მაგრამ ალუმინი არ სველდება ამ სარჩილით. ალუმინის ნაკეთობათა მირჩილვისათვის იყენებენ სპეციალურ, ალუმინისა და სილიციუმის სარჩილს.

**კაპილარული მოვლენები.**  $\hookrightarrow$  კაპილარულ მოვლენებში ჩვეულებრივ გულისხმობენ სითხის აწევას ან დაწევას წვრილ მილებში — კაპილარებში<sup>1</sup>,  $\hookrightarrow$  იმ დონესთან შედარებით, რომელიც სითხეს აქვს ფართო მილებში.

$\hookrightarrow$  დამსველებელი სითხე (მაგალითად, წყალი მინის მილში) ადის კაპილარში. ამასთანავე, რაც უფრო ნაკლებია მილის რადიუსი, მით უფრო მაღლა ადის (სურ. 60).  $\hookrightarrow$  თუ კაპილარში სითხის გამრუდებულ ზედაპირს ლუპით დავაკვირდებით, შევამჩნევთ, რომ ის ჰგავს გაჭიმულ რეზინის აფსკს, რომელიც მიმაგრებულია მილის კედლებზე და ქვემოთაა ჩაღუნული (სურ. 61).

$\hookrightarrow$  სრული დასველების ან არდასველების დროს კაპილარებში სითხის გაღუნული ზედაპირი შეიძლება ჩავთვალოთ ნახევარსფეროს ზედაპირად, რომლის რადიუსი ტოლია მილის არხის  $r$  რადიუსისა.

$\hookrightarrow$  ზედაპირული ფენის საზღვრის გასწვრივ, რომელსაც წრეწირის ფორმა აქვს, მილის კედელზე მოქმედებს ქვემოთ მიმართული ზედაპირული დაჭიმულობის ძალა (6.2). ნიუტონის მესამე კანონის თანახმად ასეთივე მოდულის ძალა მოქმედებს სითხეზე მილის კედლის მხრივ, რომელიც მიმართულია ზევით. სწორედ ეს ძალა აპირობებს სითხის აწევას.

რადგან წრეწირის სიგრძე  $l = 2\pi r$ , ამიტომ ეს ძალა ტოლია:

$$F = \sigma \cdot 2\pi r. \quad \hookrightarrow \quad (6.3)$$

$\hookrightarrow$  სითხის აწევა კაპილარში შეწყდება მაშინ, როცა (6.3) ძალა გაწონასწორდება აწეული სითხის სვეტის სიმძიმის ძალით:

$$\vec{F} = -m\vec{g}. \quad \hookrightarrow \quad (6.4)$$

$\hookrightarrow$  აღვნიშნოთ სითხის აწევის სიმაღლე კაპილარში  $h$ -ით. მაშინ აწეული სითხის მოცულობა ტოლი იქნება:  $V = \pi r^2 h$ .

სიმძიმის ძალის მოდული ტოლია:

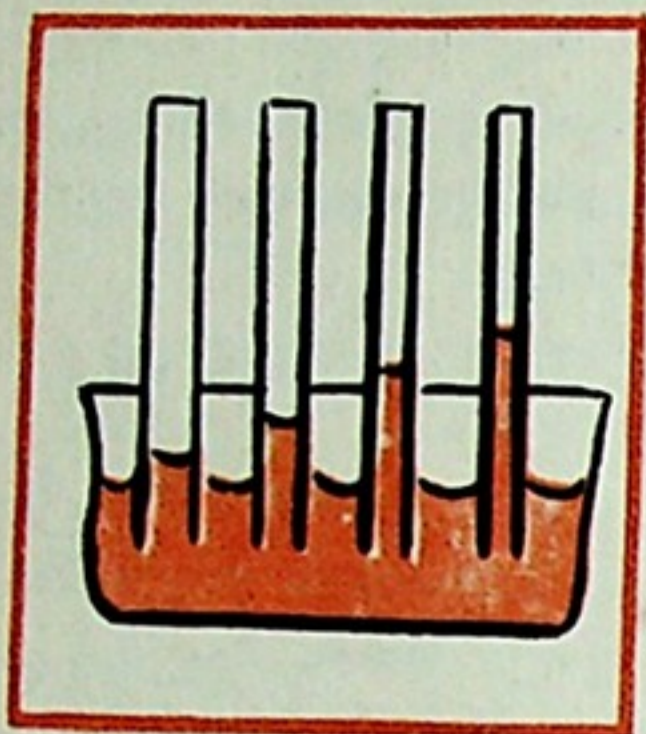
$$mg = \rho g V = \rho g h \pi r^2, \quad \hookrightarrow \quad (6.5)$$

$\hookrightarrow$  სადაც  $\rho$  სითხის სიმკვრივეა.

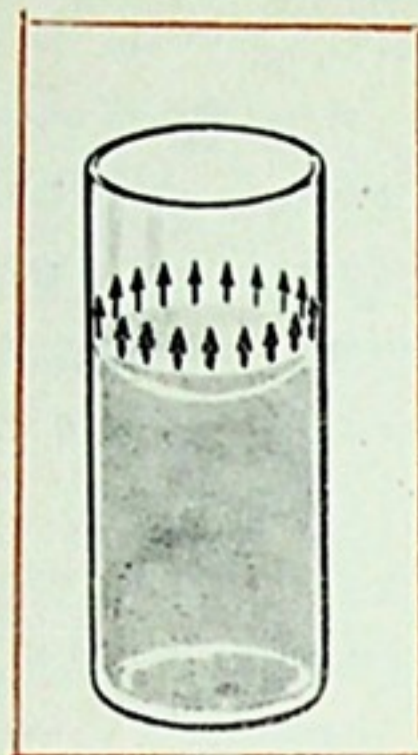
ჩავსვათ (6.4) განტოლებაში ძალთა მოდულების გამოსახულებანი (6.3) და (6.5), მივიღებთ:  $2\sigma\pi r = \rho g h \pi r^2$ .

<sup>1</sup> ტერმინი „კაპილარი“ წარმოდგება ლათინური სიტყვისაგან capillus — ბეწვი.





სურ. 60.



სურ. 61.

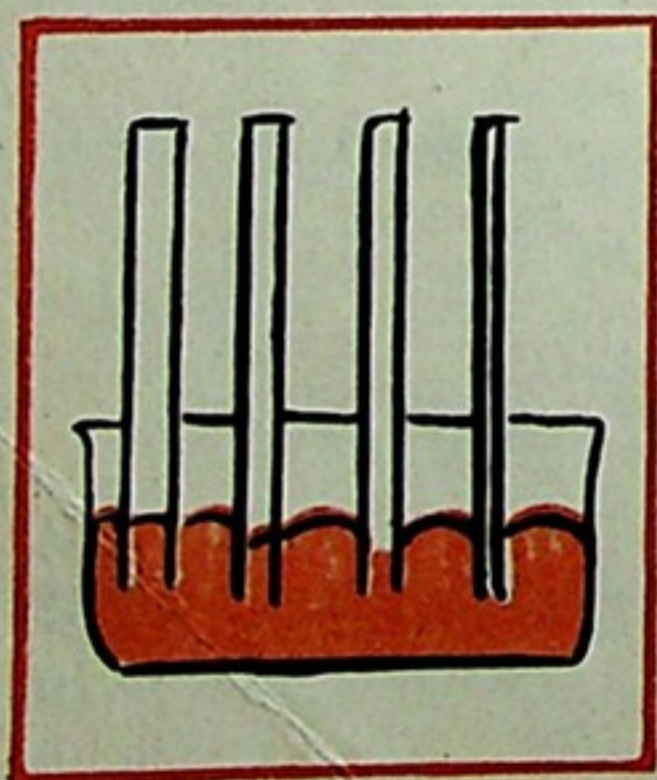
აქედან დამსველებელი სითხის აწევის სიმაღლე კაპილარში ტოლია

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r} \quad (6.6)$$

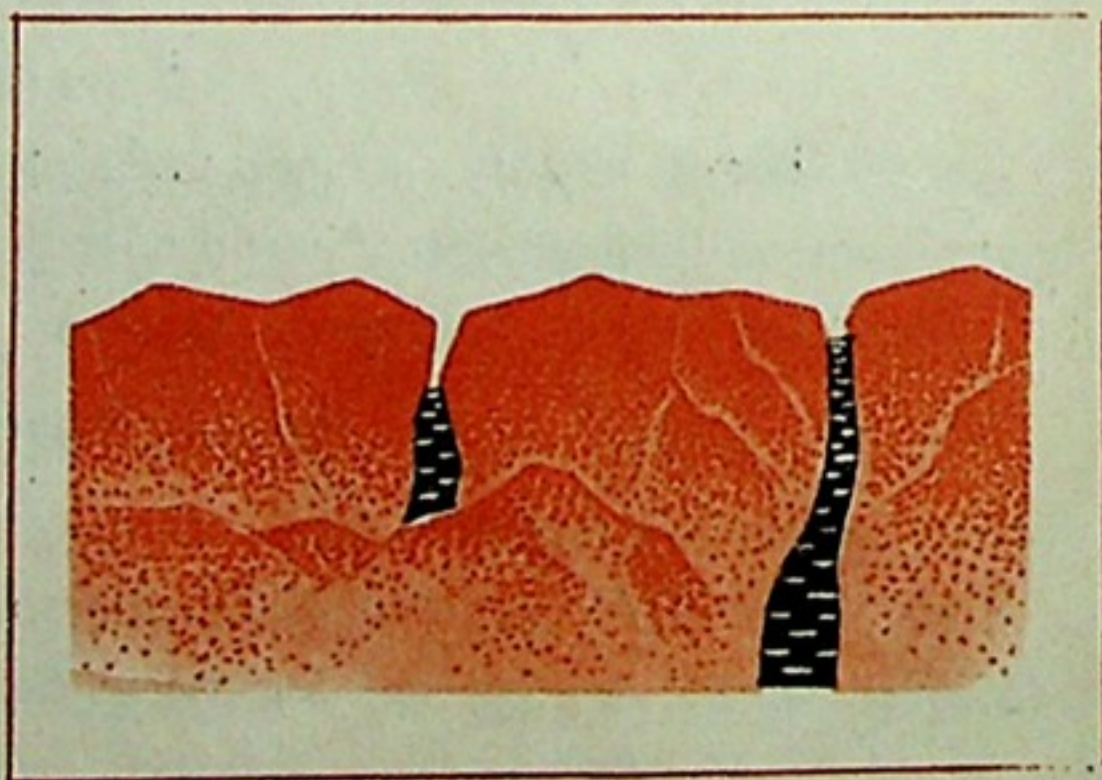
კაპილარის კედლის არადამსველებელი სითხე (მაგალითად, ვერცხლისწყალი მინის მილში) დაბლა იწევს იმ დონესთან შედარებით, რომელიც სითხეს აქვს ფართო ჭურჭელში (სურ. 62). დაწევის სიღრმე  $h$  აგრეთვე (6.6) ფორმულით განისაზღვრება.

ბევრი წვრილი არხის (კაპილარის) მქონე სხეული აქტიურად შეიწოვს წყალსა და სხვა სითხეს. ოღონდ აუცილებელია, რომ სითხე ასველებდეს სხეულის ზედაპირს. ამიტომაც, რომ პირსახოცი შეიწოვს წყალს შემშრალებისას. ნავთქურისა ან ლამპის პატრუქში ნავთი განუწყვეტლად იწევს კაპილარებით მაღლა, სადაც იწვის.

ტექნიკაში მანქანათა დეტალებზე საპოხის მიწოდების ერთ-ერთ ხერხად ზოგჯერ იყენებენ ფითილით ზეთის მიწოდებას.



სურ. 62.



სურ. 63.





ჩვეულებრივი აგური ფოროვანი სხეულია და ტენს კარგად იწოვს. ამიტომ აგურის სახლები თავის ქვედა ნაწილში იზოლირებული უნდა იყოს ტენისაგან. ამისათვის ფუნდამენტს ფარავენ ცხელი ბიტუმით ან შემოაფენენ ტოლს.

მრავალრიცხოვანი კაპილარების მეშვეობით ნიადაგში წყალი ძალიან ადის და ინტენსიურად ორთქლდება (სურ. 63). ეს კი იწვევს მცენარეებისათვის საჭირო ტენიანობის კარგვას.

- 9 1. მოიყვანეთ ზედაპირული დაჭიმულობის ძალის მოქმედების ისეთი მაგალითები, რომლებიც ტექსტში არ არის ნაჩვენები. 2. რა მსგავსება და განსხვავებაა ზედაპირული დაჭიმულობის ძალასა და დრეკადობის ძალას შორის? 3. რას ეწოდება ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტი? 4. რაზეა დამოკიდებული ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტი? 5. რას ეწოდება ზედაპირული დაჭიმულობის ძალა? 6. რა ფორმულით განისაზღვრება სითხის აწევის სიმაღლე კაპილარში?

**ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები**

ამ თავის ამოცანები მხოლოდ იმით განსხვავდება ჰიდროსტატიკის ჩვეულებრივი ამოცანებისაგან, რომ მათში გათვალისწინებულია კიდევ ერთი ძალა — ზედაპირული დაჭიმულობის ძალა (6.2).

ბევრი ამოცანის ამოხსნისათვის გამოვიყენებთ (6.6). ფორმულას, რომელიც კაპილარში სითხის აწევის სიმაღლეს განსაზღვრავს.

1.  $m=0,02$  კგ მასის დასველებადი კუბიკი წყლის ზედაპირზე ტივტივებს, კუბიკის წიბოს სიგრძე  $a=0,08$  მ. წყლის ზედაპირიდან რა  $x$  მანძილზე მოთავსდება კუბიკის ქვედა წახნაგი?

ამოხსნა. ზევით მიმართული არქიმედეს ძალა  $a^2x\rho\vec{g}$  აწონასწორებს კუბიკის  $m\vec{g}$  სიმძიმის ძალას და ზედაპირული დაჭიმულობის ძალას. ზედაპირული დაჭიმულობის ძალა (6.2)-ის თანახმად ტოლია  $4a\sigma$ -სი და მოქმედებს კუბიკზე ქვემოთ. მაშასადამე, ძალთა გეგმილებისათვის ზემოთ მიმართულ ღერძზე გვექნება:

$$a^2x\rho g - mg - 4a\sigma = 0.$$

აქედან

$$x = \frac{mg + 4a\sigma}{a^2\rho g}; \quad x \approx 0,023 \text{ მ.}$$

ზედაპირული დაჭიმულობის ძალას შეაქვს დაახლოებით 1 მმ შესწორება.



2. ვერტიკალური კაპილარული მილი, რომლის რადიუსი  $r=10^{-4}$  მ, ჩაძირულია ვერცხლისწყალში. ჩავთვალოთ, რომ ვერცხლისწყალი აბსოლუტურად არ ასველებს მილის მასალას და განვსაზღვროთ ვერცხლისწყლის წნევა კაპილარში უშუალოდ სითხის ამოწევილი (ნახევარსფერული) ზედაპირის ქვეშ. ატმოსფეროს წნევა არ გავითვალისწინოთ.

ამოხსნა. მილში სითხის სვეტის წონასწორობის პირობიდან გამომდინარეობს, რომ წნევა უშუალოდ ზედაპირის ქვეშ მილში და იმავე დონეზე მილის გარეთ, ერთნაირია. ეს წნევა ტოლია  $p=\rho gh$ , სადაც  $h$  არის მილში ვერცხლისწყლის დონის დაწვევის სიღრმე. ჩავსვათ  $h$  (6.6) ფორმულიდან, მივიღებთ:

$$p = \frac{2\sigma}{r}, \quad p = \frac{9,4 \cdot 10^{-1}}{10^{-4}} \quad \text{პა} \approx 9400 \quad \text{პა.}$$

### ს ა ვ ა რ ჯ ი შ ო . 6

1. სპირტის წყალხსნარში შეურიეს ერთი კოვზი ზეთუნის ზეთი (პლატოს ცდა). რა ფორმას მიიღებს ზეთი, თუ მისი სიმკვრივე ტოლია ხსნარის სიმკვრივისა?

2. ცდის საშუალებით გაიგეთ გაიზრდება თუ შემცირდება წყლის ზედაპირული დაჭიმულობა მასში შაქრის ან საპნის გახსნისას.

3. ბენზინს, რომელშიც ცხიმია გახსნილი, მეტი ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტი აქვს, ვიდრე სუფთა ბენზინს. ქსოვილიდან ცხიმოვანი ლაქას მოსაშორებლად, ლაქას ცენტრი უნდა დავასველოთ ბენზინით თუ კიდეები?

4. 0,1 მმ დიამეტრის მავთული ვერტიკალურად დაკიდებულია მგრძობიარე სასწორის პინაზე და ნაწილობრივ ჩაშვებულია წყლიან ქურჭელში. წყლის ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტი  $7,3 \cdot 10^{-2}$  ნ/მ. რას უდრის სასწორზე მოქმედი დამატებითი ძალა, რომელიც გამოწვეულია იმით, რომ წყალი მავთულს ასველებს?

5. რატომაა, რომ დაფარცხვისას ნიადაგის გაფხვიერება ხელს უწყობს მასში ტენის შენახვას?

6. კაპილარულ მილში სპირტი 55 მმ სიმაღლეზე ავიდა, წყალი კი — 146 მმ-ზე. განსაზღვრეთ სპირტის სიმკვრივე.

### მ ო კ ლ ე დ ა ს კ ვ ნ ა

ზედაპირული დაჭიმულობის ძალას უწოდებენ იმ ძალას, რომელიც სითხის ზედაპირის გასწვრივ მოქმედებს ამ ზედაპირის შემოსაზღვრელი წირის მართობულად და ცდილობს ის მინიმუმამდე შეამციროს. ზედაპირული ფენის  $l$  სიგრძის საზღვარზე მოქმედი ზედაპირული დაჭიმულობის ძალის მოდული ტოლია:

$$F = \sigma l,$$



სადაც  $\sigma$  ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტია. ეს კოეფიციენტი დამოკიდებულია თანამოსაზღვრე გარემოთა ბუნებასა და ტემპერატურაზე.

ზედაპირული დაჭიმულობის ძალებით დამსველებელი სითხე წვრილ მილებში (კაპილარებში) მაღლა ადის, არადამსველებელი სითხე კი — დაბლა იწევს. სითხის აწევის (დაწევის) სიმაღლე ტოლია:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$$

სადაც  $\rho$  სითხის სიმკვრივეა,  $g$  — თავისუფალი ვარდნის აჩქარება,  $r$  — კაპილარის რადიუსი.

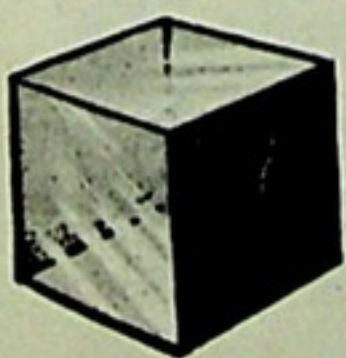
## VII თავი

### მყარი სხეული

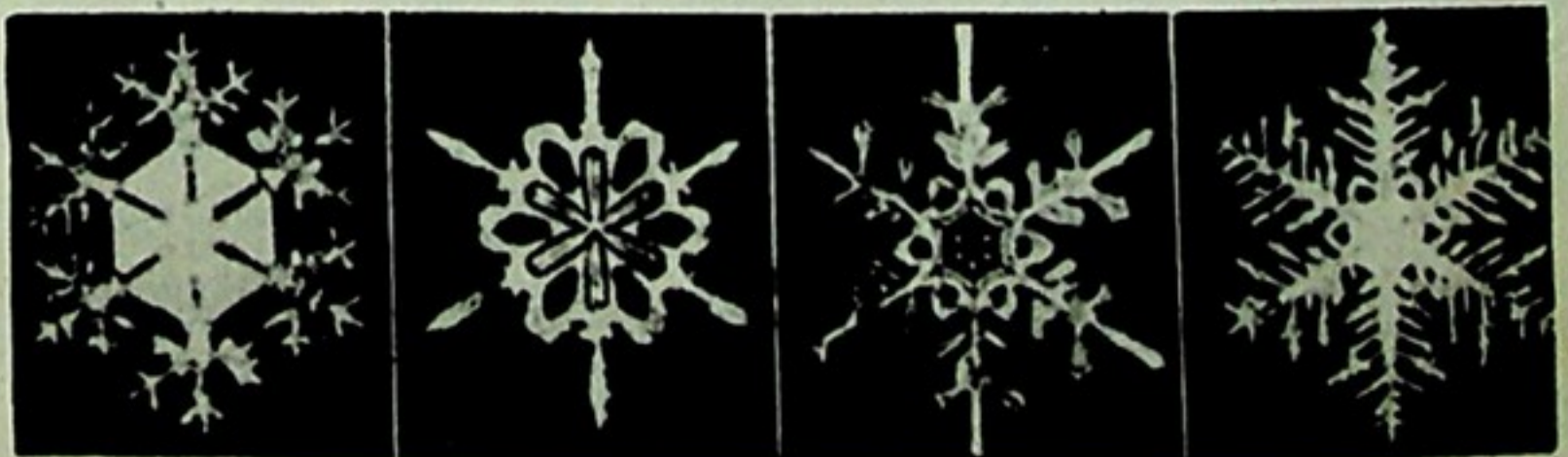
#### 29. კრისტალური სხეული

მყარი სხეული ინარჩუნებს არა მხოლოდ მოცულობას, სითხის მსგავსად, არამედ ფორმასაც. მყარი სხეული უმთავრესად კრისტალურ მდგომარეობაშია.

კრისტალი მყარი სხეულია, რომლის ატომებს ან მოლეკულებს ზანსაზღვრული, მოწესრიგებული ურთიერთმდებარეობა უკავია სივრცეში (იხ. § 5). ამის შედეგია კრისტალის წესიერი გარეგანი ფორმა. მაგალითად, ჩვეულებრივი სუფრის მარილის კვნიტს აქვს ბრტყელი წახნაგები, რომლებიც ერთმანეთთან მართ კუთხეებს ადგენენ (სურ. 64). ეს შეიძლება შევამჩნიოთ, თუ მარილს ლუპით დავაკვირდებით. თოვლის ფიფქს გეომეტრიულად წესიერი ფორმა აქვს. მასში ასევე ასახულია კრისტალური მყარი სხეულის — ყინულის შინაგანი აგებულების გეომეტრიული წესრიგი (სურ. 65).



სურ. 64.



სურ. 65.



**კრისტალთა ანიზოტროპია.** წესიერი გარეგანი ფორმა კრისტალის მოწესრიგებული აგებულების არც ერთადერთი და არც მთავარი შედეგია. მთავარია კრისტალის ფიზიკური თვისებების დამოკიდებულება არჩეულ მიმართულებაზე. უწინარეს ყოვლისა თვალში გვეცემა, რომ კრისტალს სხვადასხვა მიმართულებით განსხვავებული მექანიკური სიმტკიცე აქვს. ქარსის ნაჭერი ერთი მიმართულებით ადვილად იპობა თხელ ფირფიტებად (სურ. 66). მისი გაპობა ფირფიტებისადმი მართობულად გაცილებით ძნელია. ასევე ადვილად განშრევდება გრაფიტის კრისტალი ერთი მიმართულებით. როცა ფანქრით ვწერთ, გრაფიტი განშრევდება უწყვეტად და თხელ ფენად რჩება ქალაღზე. ეს იმიტომ ხდება, რომ გრაფიტის კრისტალურ მესერს შრეული სტრუქტურა აქვს. შრეები შექმნილია პარალელური ბრტყელი ბადეების რიგით, რომლებიც ნახშირბადის ატომებისგან შედგება (სურ. 67). ატომები, განლაგებულია წესიერი ექვსკუთხედების წვეროებში. შრეებს შორის მანძილი შედარებით დიდია: დაახლოებით ორჯერ მეტი, ვიდრე ექვსკუთხედის გვერდის სიგრძე. ამიტომ შრეებს შორის უფრო სუსტია კავშირი, ვიდრე მათ შიგნით.

ბევრი კრისტალი სხვადასხვა მიმართულებით განსხვავებულად ატარებს სითბოსა და ელექტრულ დენს. მიმართულებაზეა დამოკიდებული აგრეთვე კრისტალთა ოპტიკური თვისებები. მაგალითად, კვარცის კრისტალი სხვადასხვანაირად გარდატეხს სინათლეს იმის მიხედვით, თუ როგორია მასზე დაცემული სხივების მიმართულება.

კრისტალის ფიზიკური თვისებების დამოკიდებულებას მის შიგნით აღებულ მიმართულებაზე ანიზოტროპია<sup>1</sup> ეწოდება. ყველა კრისტალური სხეული ანიზოტროპულია.

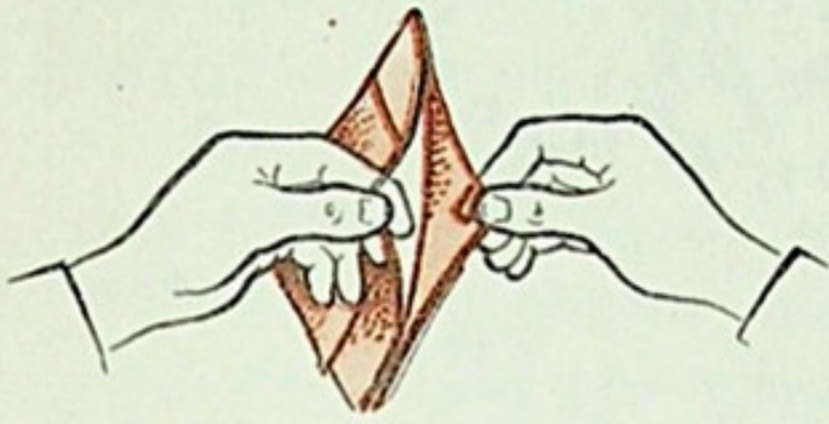
**მონოკრისტალები და პოლიკრისტალები.** ყველა ლითონს კრისტალური სტრუქტურა აქვს. უმთავრესად სწორედ ლითონებს იყენებენ ჩვენს დროში შრომის იარაღების, სხვადასხვა მანქანისა და მექანიზმის დასამზადებლად.

თუ ავიღებთ ლითონის შედარებით დიდ ნაჭერს, მაშინ, ერთი შეხედვით, მისი კრისტალური აგებულება სრულიად არ გამოვლინდება ნაჭრის არც გარეგან სახეში, არც მის ფიზიკურ თვისებებში. ჩვეულებრივ მდგომარეობაში ლითონები არ ამჟღავნებენ ანიზოტროპიას.

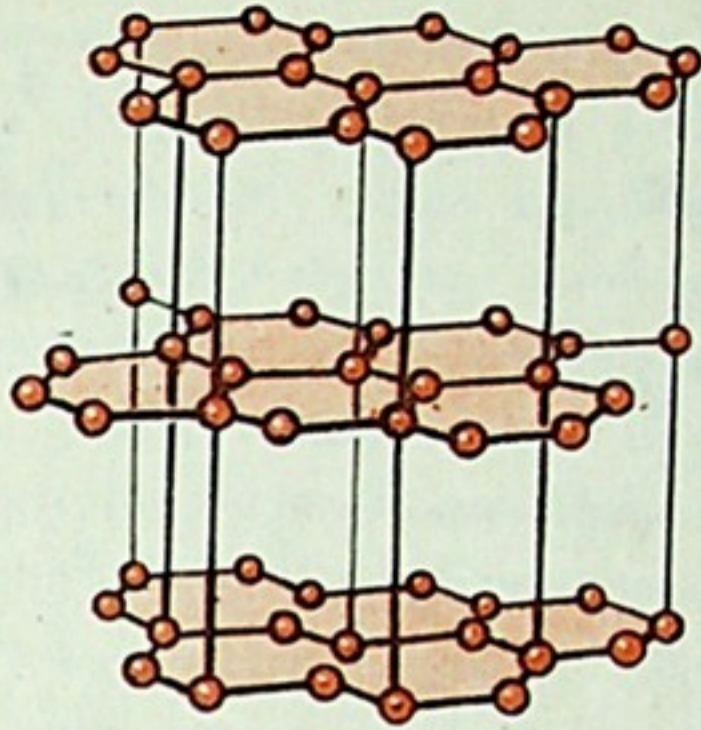
საქმე ისაა, რომ ლითონი შედგება ერთმანეთთან შეზრდილი მრავალი პატარა კრისტალისაგან. მიკროსკოპით ან ლუპითაც კი მათი დანახვა ადვილად შეიძლება განსაკუთრებით ლითონის ახალ მონატეხზე (სურ. 68). თითოეული პატარა კრისტალის თვისებები სხვა-

<sup>1</sup> ბერძნულიდან „ანიზოს“ — არატოლი, „ტროპოს“ — მიმართულება.





სურ. 66.



სურ. 67.



სურ. 68.

დასხვა მიმართულებით განსხვავებულია, მაგრამ ეს კრისტალები ერთმანეთის მიმართ ქაოსურად არიან განლაგებული. ამის გამო მოცულობაში, რომელიც მნიშვნელოვნად აღემატება ცალკეულ კრისტალთა მოცულობას, ყველა მიმართულება ტოლფუნქციანია და ლითონთა თვისებები ერთნაირია ნებისმიერი მიმართულებით.

მყარ სხეულს, რომელიც მრავალი პატარა კრისტალისაგან შედგება, პოლიკრისტალური ეწოდება, ერთეულ კრისტალებს კი — მონოკრისტალი.

თუ დიდ სიფრთხილეს დავიცავთ, შეიძლება ლითონის დიდი ზომის კრისტალი — მონოკრისტალი გავზარდოთ. ჩვეულებრივ პირობებში პოლიკრისტალური სხეულის წარმოქმნა იმის შედეგია, რომ ერთდროულად იწყება მრავალი კრისტალის ზრდა და გრძელდება მანამ, სანამ ისინი ერთმანეთს შეეხებიან და ერთიან სხეულს წარმოქმნიან.

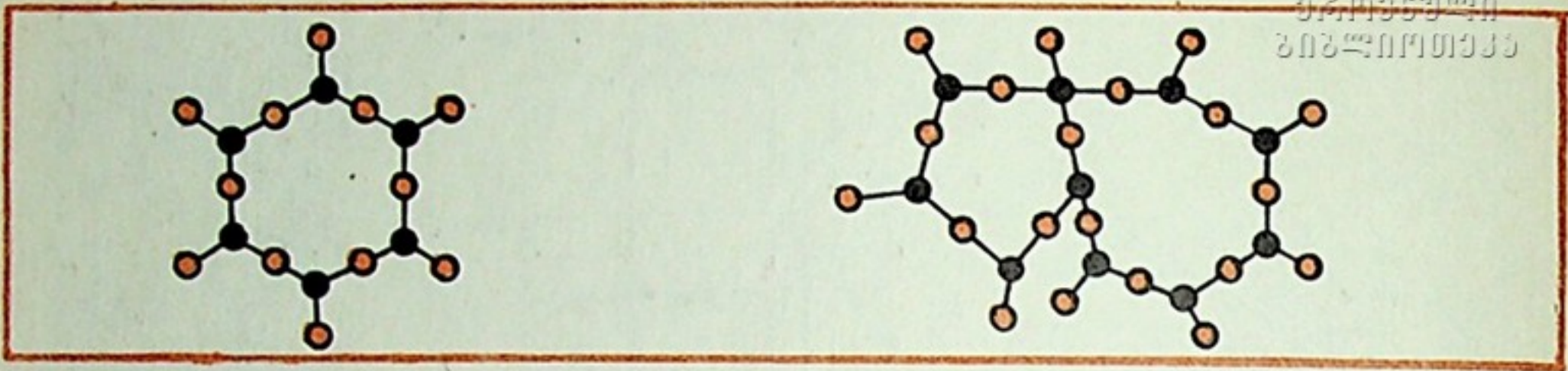
პოლიკრისტალებს მარტო ლითონები არ ეკუთვნის; მაგალითად, შაქრის ნატეხებსაც პოლიკრისტალური სტრუქტურა აქვს.

### 30. ამორფული სხეული

კრისტალურ მყარ სხეულთან ერთად გვხვდება ამორფული<sup>1</sup> მყარი სხეული. კრისტალებისაგან განსხვავებით ამორფულ სხეულს არ ახასიათებს მკაცრი წესრიგი ატომების განლაგებაში. მხოლოდ ერთმანეთთან ახლო მყოფი ატომები — მეზობლები ლაგდებიან კადაცნაირ წესრიგში. მაგრამ კრისტალებისთვის დამახასიათებელ თვისებას — ერთი და იმავე სტრუქტურული ელემენტის ყველა მიმართულებით გამეორებას — ამორფულ სხეულში ადგილი არა აქვს.

<sup>1</sup> წარმოდგება ბერძნული სიტყვისაგან „მორფე“, რაც ფორმას ნიშნავს და „ა“ ნაწილაკისაგან, რაც უარყოფას ნიშნავს.





სურ. 69.

სურ. 70.

ხშირად ერთი და იგივე ნივთიერება შეიძლება იმყოფებოდეს როგორც კრისტალურ, ისე ამორფულ მდგომარეობაში. მაგალითად, კვარცი ( $\text{SiO}_2$ ) შეიძლება იყოს როგორც კრისტალურ, ისე ამორფულ მდგომარეობაში (კაჟმიწა). კვარცის კრისტალური ფორმა შეიძლება წესიერი ექვსკუთხედებისაგან (სურ. 69) შედგენილი მესრის სახით წარმოვიდგინოთ. კვარცის ამორფულ სტრუქტურასაც ასევე მესრის სახე აქვს, მაგრამ არაწესიერი. ექვსკუთხედებთან ერთად მასში გვხვდება ხუთ- და შვიდკუთხედები (სურ. 70).

**ამორფული სხეულის თვისებები.** ყველა ამორფული სხეული იზოტროპულია<sup>1</sup>. მათი ფიზიკური თვისებები ერთნაირია ყველა მიმართულებით. ამორფულ სხეულებს მიეკუთვნება მინა, მრავალი პლასტმასა, ფისი, კანიფოლი, შაქარყინული და სხვ.

გარეგანი ზემოქმედებისას ამორფული სხეული ერთდროულად ამქლავნებს დრეკად თვისებებს მყარი სხეულის მსგავსად და დენადობას სითხის მსგავსად, ხანმოკლე ზემოქმედებისას (დარტყმა) იქცევა როგორც მყარი სხეული და ძლიერი დარტყმის დროს იპობა ნატეხებად. მაგრამ ძალიან ხანგრძლივი ზემოქმედებისას ამორფული სხეული დენას იწყებს. მაგალითად, ფისის ნაჭერი თანდათანობით მოიღვრება მყარ ზედაპირზე. ამორფული სხეულის ატომებს ან მოლეკულებს, სითხის მოლეკულების მსგავსად, აქვს „ბინადარი ცხოვრების“ — გარკვეული დრო — წონასწორობის მდებარეობის მახლობლად რხევის დრო. მაგრამ სითხისაგან განსხვავებით, ეს დრო ძალიან დიდია. ამ მხრივ ამორფული სხეული კრისტალურს უახლოვდება, რადგან ატომთა გადახტომები წონასწორობის ერთი მდებარეობიდან მეორეში ძალიან იშვიათია.

დაბალ ტემპერატურაზე ამორფული სხეული თავისი თვისებებით კვარ სხეულს მოგვაგონებს. დენადობას თითქმის სრულად კარგავს,

<sup>1</sup> წარმოდგება ბერძნული სიტყვებისაგან „იზოს“ — ტოლი და „ტროპოს“ — მიმართულება.



მაგრამ ტემპერატურის მომატებისას თანდათან რბილდება და მისი თვისებები სულ უფრო უახლოვდება სითხის თვისებებს. ეს იმიტომ ხდება, რომ ტემპერატურის ზრდასთან ერთად თანდათან ხშირდება ატომთა გადახტომები წონასწორობის ერთი მდებარეობიდან მეორეში. დნობის განსაზღვრული ტემპერატურა, რომელიც კრისტალურ სხეულს ახასიათებს, ამორფულ სხეულს არ გააჩნია.

**მყარი სხეულის ფიზიკა.** კაცობრიობა მუდამ იყენებდა და კვლავაც გამოიყენებს მყარ სხეულებს. მაგრამ, თუ წინათ მყარი სხეულის ფიზიკის განვითარება ჩამორჩებოდა ტექნოლოგიის განვითარებას, რაც დაფუძნებულია უშუალო გამოცდილებაზე, ამჟამად მდგომარეობა შეიცვალა. თეორიული გამოკვლევების საფუძველზე იქმნება ისეთი უჩვეულო თვისებების მქონე მყარი სხეულები, რომელთა მიღება, წმინდა პრაქტიკული გზით შეუძლებელი იქნებოდა. ისეთ მოწყობილობათა შექმნა, როგორიცაა ტრანზისტორები (მათ შემდეგში განვიხილავთ), ნათელი მაგალითია იმისა, თუ მყარ სხეულთა სტრუქტურის შეცნობამ როგორ გამოიწვია რევოლუცია მთელ რადიოტექნიკაში.

ჩვენს დროში მყარი სხეულის ფიზიკის განვითარების ერთ-ერთი ძირითადი მიმართულებაა შეიქმნას მასალები წინასწარ მოცემული მექანიკური, მაგნიტური, ელექტრული და სხვა თვისებების მიხედვით. მსოფლიოს ფიზიკოსთა დაახლოებით ნახევარი მყარი სხეულის ფიზიკის დარგში მუშაობს.

- 7 1. რით განსხვავდება კრისტალური სხეული ამორფულისაგან? 2. რას ეწოდება ანიზოტროპია? 3. მოიყვანეთ მონოკრისტალური, პოლიკრისტალური და ამორფული სხეულების მაგალითები.

## 81. დეფორმაცია. მყარი სხეულის დეფორმაციის სახეები

**მყარი სხეულის დეფორმაცია.** დეფორმაცია ეწოდება სხეულის ფორმის ან მოცულობის შეცვლას.

დეფორმაცია წარმოიშობა მაშინ, როცა სხეულის სხვადასხვა ნაწილი არაერთნაირად გადაადგილდება. ასე, მაგალითად, თუ რეზინის ზონარს ბოლოებით გავჭიმავთ, მაშინ ზონარის ნაწილები ერთმანეთის მიმართ გადაადგილდება, ზონარი გახდება დეფორმირებული, დაგრძელდება (და დაწვრილდება).

დეფორმაციას, რომელიც მთლიანად ისპობა გარე ძალთა მოქმედების შეწყვეტის შემდეგ, დრეკადი ეწოდება. დრეკად დეფორმაციას განიცდის, მაგალითად, ზამბარა, რომელიც თავდაპირველ ფორმას აღიდგენს მის ბოლოზე დაკიდებული ტვირთის მოხსნის შემდეგ.



დეფორმაციას, რომელიც არ ისპობა გარე ძალთა მოქმედების შეწყვეტის შემდეგ პლასტიკური ეწოდება. ცვილი, პლასტილინი, თიხა, ტყვია პლასტიკურ დეფორმაციას განიცდის უკვე მცირე (მაგრამ არახანმოკლე) დაბვის დროს.

მყარ სხეულთა ნებისმიერი დეფორმაცია ორ სახეზე დაიყვანება: გაჭიმვა (კუმშვა) და ძვრა.

**გაჭიმვის (კუმშვის) დეფორმაცია.** თუ ერთგვაროვან ღეროს, რომელიც ერთი ბოლოთი დამაგრებულია, მოვდებთ მისი ღერძის გასწვრივ ღეროდან გარეთ მიმართულ  $\vec{F}$  ძალას (სურ. 71), მაშინ ის გამოიწვევს ღეროს გაჭიმვის დეფორმაციას. გაჭიმვის დეფორმაციას ახასიათებენ  $\Delta l = l - l_0$  აბსოლუტური წაგრძელებით და

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

ფარდობითი წაგრძელებით, სადაც  $l_0$  საწყისი

სიგრძეა,  $l$  კი — საბოლოო.

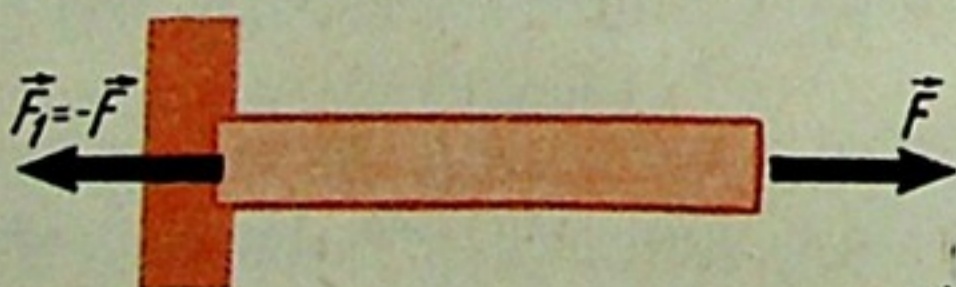
გაჭიმვის დეფორმაციას განიცდის გვარლი, ბაგირი, ჯაჭვი ამწევ მოწყობილობებში, მოსაჭიმები ვაგონთა შორის და ა. შ.

მცირე გაჭიმვისას ( $\Delta l \ll l_0$ ) სხეულთა მეტი ნაწილის დეფორმაცია დრეკადია.

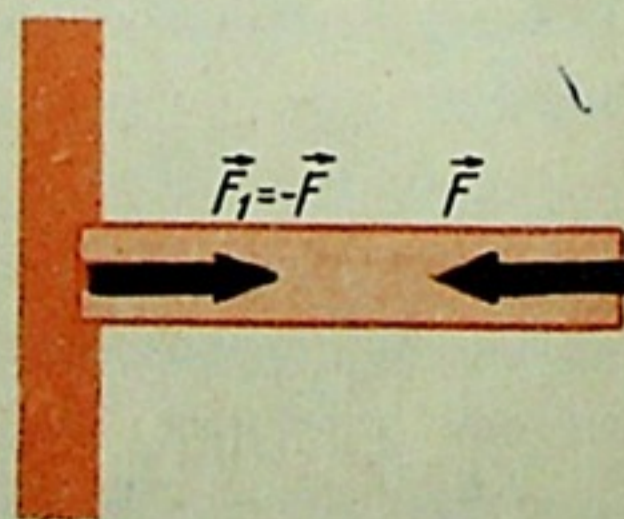
თუ დამაგრებულ ღეროზე ვიმოქმედებთ  $\vec{F}$  ძალით, რომელიც მიმართულია მისი ღერძის გასწვრივ ღეროსკენ (სურ. 72), მაშინ ღერო შეიკუმშება. ამ შემთხვევაში  $\varepsilon$  ფარდობითი წაგრძელება უარყოფითია:  $\varepsilon < 0$ .

კუმშვის დეფორმაციას განიცდის ბოძი, სვეტი, კედელი, შენობის საძირკველი და ა. შ.

გაჭიმვისა ან კუმშვის დროს იცვლება სხეულის განივკვეთის ფართობი. ეს ნათელი გახდება, თუ გავჭიმავთ რეზინის მილს, რომელზედაც წინასწარ ჩამოცმულია ლითონის რგოლი. საკმაოდ ძლიერი გაჭიმვისას რგოლი ვარდება. კუმშვისას, პირიქით, სხეულის განივ-



სურ. 71.



სურ. 72.



კვეთის ფართობი იზრდება. თუმცა მყარ სხეულთა უმრავლესობისათვის ეს ეფექტები მცირეა.

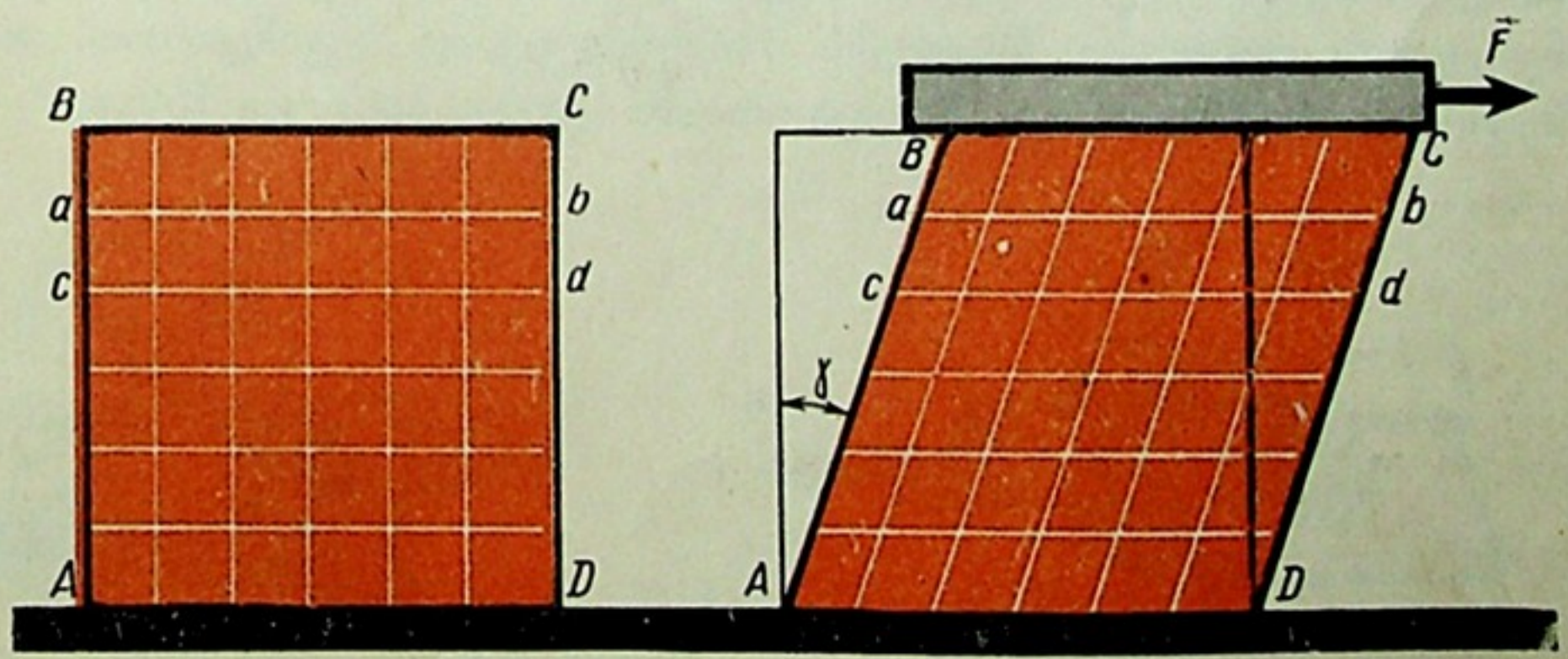
**ძვრის დეფორმაცია.** ავიღოთ რეზინის ძელაკი, რომლის ზედაპირზე დახაზულია ჰორიზონტალური და ვერტიკალური წირები. დავამაგროთ ძელაკი მაგიდაზე (სურ. 73, ა). შემოდან ძელაკს მივამაგროთ ლარტყა და მოვდოთ მას ჰორიზონტალური ძალა (სურ. 73, ბ) ძელაკის  $ab$ ,  $cd$  და ა. შ. წრეები გადაიწევა, მაგრამ პარალელური რჩება; ვერტიკალური წახნაგები კი, რომლებიც კვლავ ბრტყელი რჩება, დაიხრება  $\gamma$  კუთხით. ამ სახის დეფორმაციას, რომლის დროსაც წრეები ერთმანეთის მიმართ წაინაცვლებს, ძვრის დეფორმაცია ეწოდება.

თუ  $\vec{F}$  ძალას გავადიდებთ ორჯერ, მაშინ  $\gamma$  კუთხეც გადიდება ორჯერ. ცდები გვიჩვენებს, რომ **ღრეკადი დეფორმაციის დროს  $\gamma$  ძვრის კუთხე პირდაპირპროპორციულია მოდებული ძალის  $F$  მოდულისა.**

ძვრის დეფორმაციის დემონსტრირება შეიძლება მყარი სხეულის მოდელით, რომელიც ერთმანეთთან ზამბარებით შეერთებულ პარალელური ფირფიტების წყებას წარმოადგენს (სურ. 74). ჰორიზონტალური ძალა ფირფიტებს გადასწევს ერთმანეთის მიმართ სხეულის მოცულობის შეუცვლელად (სურ. 75). ძვრის დეფორმაციის დროს ასევე არ იცვლება რეალური მყარი სხეულის მოცულობა.

ძვრის დეფორმაციას განიცდის ყველა კოჭი საყრდენ ადგილებში, მოქლონები (სურ. 76) და ჭანჭიკები, რომლითაც ლითონის ნაწილებს ამაგრებენ და ა. შ. დიდი კუთხით გადაწევამ შეიძლება გამოიწვიოს სხეულის რღვევა — ჭრა. ჭრა ხდება მაკრატლით, სატეხით, ღოჯით, ხერხით მუშაობის დროს.

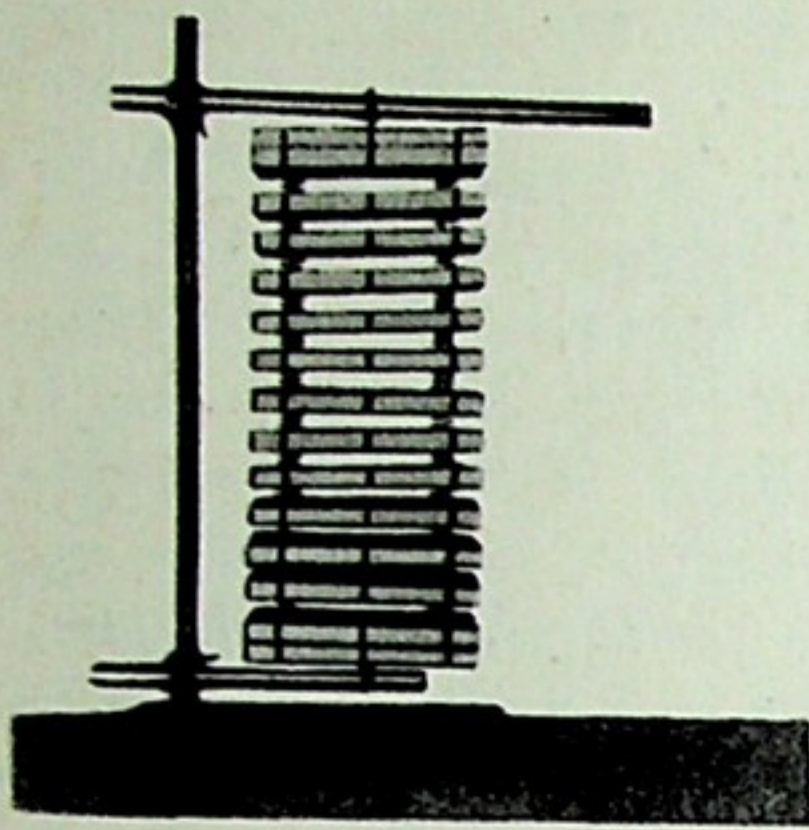
**ღუნვის დეფორმაცია.** ღუნვის დეფორმაციას განიცდის ღერო, რომელიც ბოლოებით ქვესადგამებს ეყრდნობა და შუაში დატვირთულია.



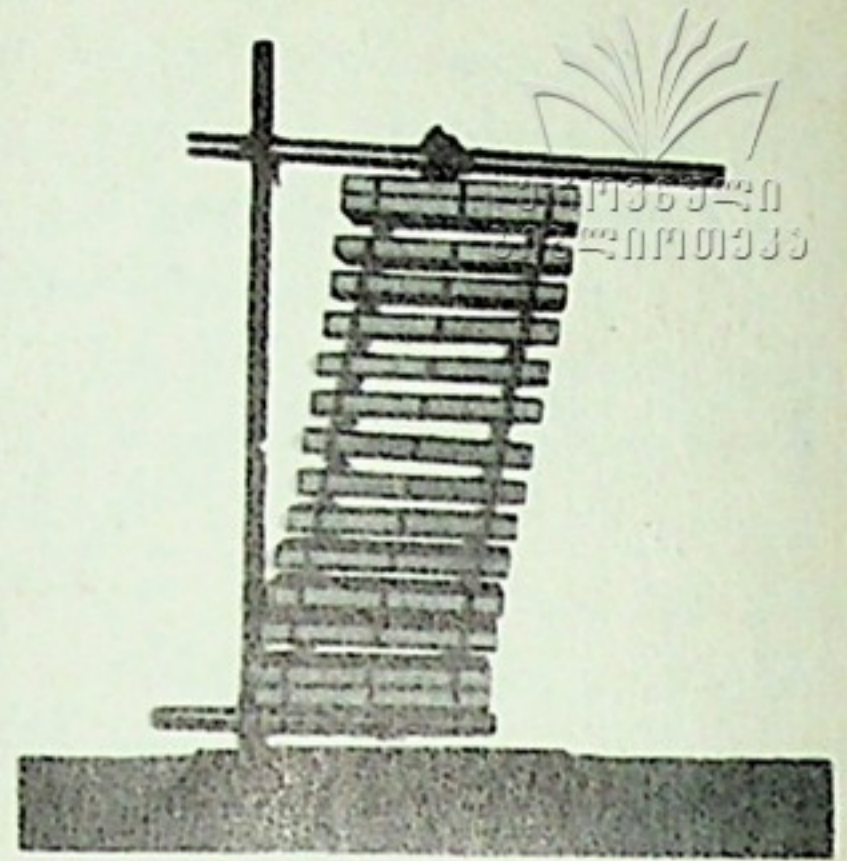
სურ. 73, ა.

სურ. 73, ბ.





სურ. 74.



სურ. 75.

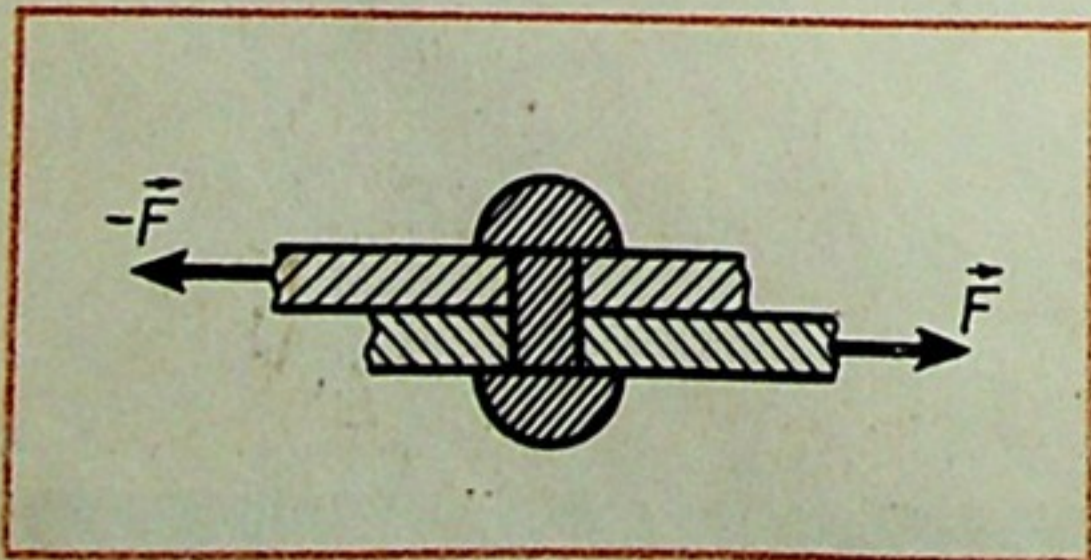
ან რომლის ერთი ბოლო დამაგრებულია მეორე კი დატვირთული (სურ. 77).

ლუნვის დეფორმაციის ზომად მიღებულია კოჭის შუა ადგილის ან ბოლოს გადაადგილება. მას ჩალუნვის ისარს უწოდებენ. ცდა გვიჩვენებს, რომ დრეკადი დეფორმაციის დროს ჩალუნვის ისარი დატვირთვის პროპორციულია.

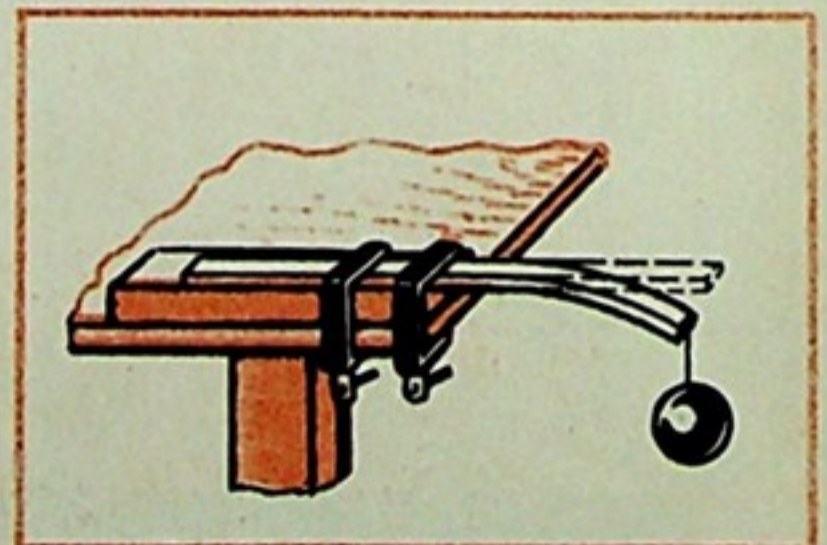
ლუნვისას ერთი მხარე — ამოზნექილი — გაჭიმვას განიცდის, მეორე კი — ჩაზნექილი — კუმშვას. გალუნულ სხეულში არის შრე, რომელიც არც გაჭიმვას განიცდის და არც ლუნვას. მას ნეიტრალური შრე ეწოდება (სურ. 78).

ამრიგად, ლუნვა დეფორმაციაა, რომელიც გაჭიმვაზე (კუმშვაზე) დაიყვანება. ამ დროს გაჭიმვა (კუმშვა) სხვადასხვაა სხეულის სხვადასხვა ნაწილში.

ნეიტრალური შრის მახლობლად სხეული თითქმის არ განიცდის დეფორმაციას. ამ შრეში მცირეა დეფორმაციისას აღძრული ძალებიც. ამიტომ, ნეიტრალური შრის მახლობლობაში გასაღუნი დეტალის განივკვეთის ფართობი შეიძლება მნიშვნელოვნად შევამციროთ. თანამედროვე ტექნიკასა და მშენებლობაში ღეროებისა და მასიური ძე-

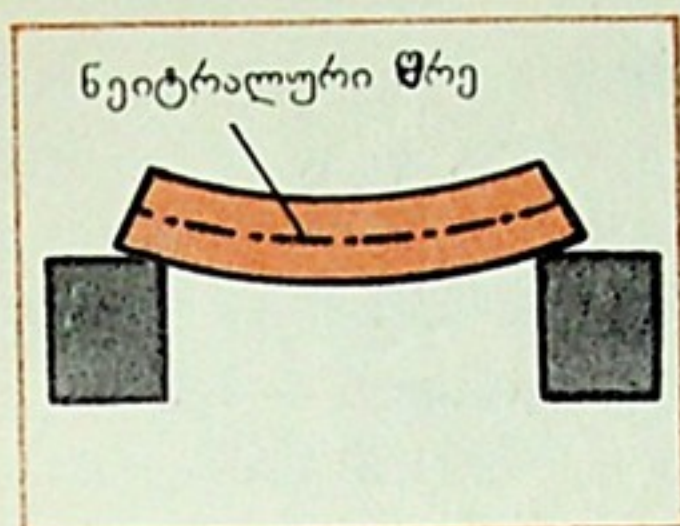


სურ. 76.

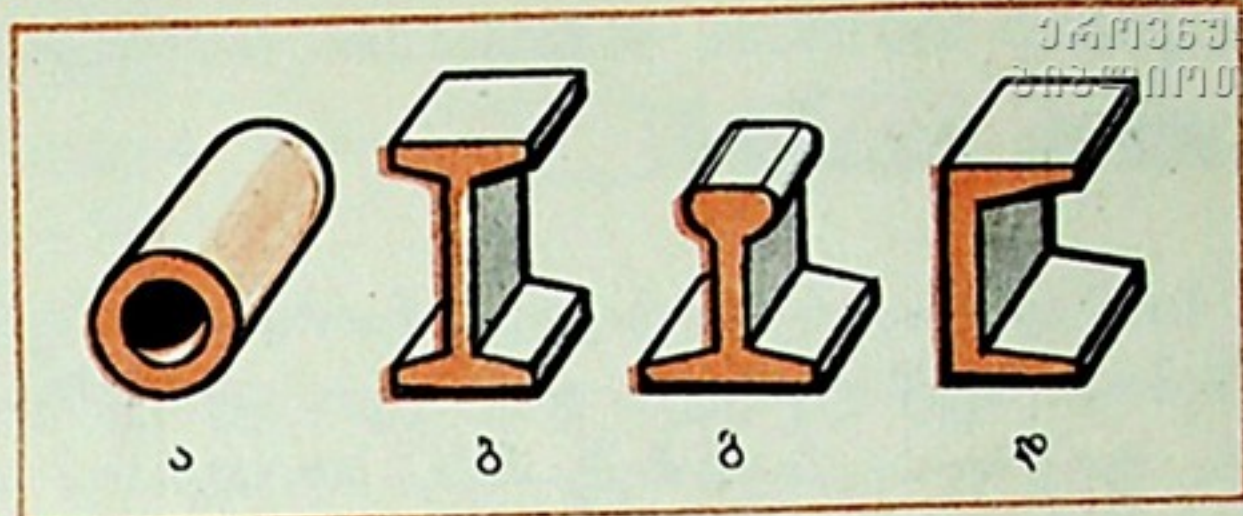


სურ. 77.





სურ. 78.



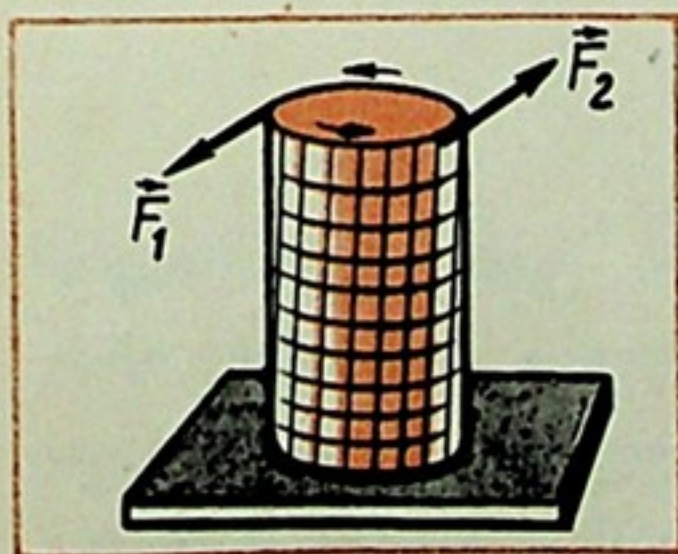
სურ. 79.

ლების ნაცვლად იყენებენ მილებს (სურ. 79, ა), ორტესებრ კოჭებს (სურ. 79 ბ), რელსებს (სურ. 79, გ), შველერებს (სურ. 79 დ). ამით აღწევენ კონსტრუქციების სიმსუბუქესა და მასალის ეკონომიას.

ეკონომიის პროცესში თვით ბუნებამ დააჯილდოვა ადამიანი და ცხოველები კიდურთა ლულოვანი ძვლებით, გახდა მარცვლოვანთა ღეროები მილისებრი და შეახმა მასალის ეკონომია „კონსტრუქციის“ სიმტკიცესა და სიმჩატესთან.

**გრეხის დეფორმაცია.** თუ ღეროზე, რომლის ერთი ბოლო დამაგრებულია, მოქმედებს ღეროს ღერძისადმი მართობ სიბრტყეში მდებარე პარალელური და საპირისპიროდ მიმართული  $\vec{F}_1$  და  $F_2$  ძალები (სურ. 80), მაშინ წარმოიქმნება გრეხის დეფორმაცია. სხეულის ცალკეული შრეები, ისევე როგორც ძვრისას, პარალელური რჩება, მაგრამ შემობრუნდება ერთმანეთის მიმართ რაღაც კუთხით. გრეხის დეფორმაცია არაერთგვაროვან ძვრას წარმოადგენს.

ეს დეფორმაცია ხდება, მაგალითად, ქანჩის ჩახრახნისას (სურ. 81). გრეხის დეფორმაციას განიცდის აგრეთვე მანქანათა ლილვები, ბურღები და სხვ.

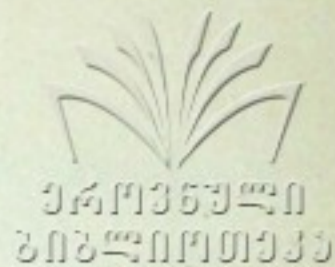


სურ. 80.



სურ. 81.





საიმედო სახლები, ხიდები, ჩარხები, მრავალგვარი მანქანები რომ ვაშენოთ, აუცილებელია ვიცოდეთ გამოყენებული მასალის — ბეტონის, ფოლადის, რკინაბეტონის, პლასტმასის და ა. შ. — მექანიკური თვისებები. კონსტრუქტორმა წინასწარ უნდა იცოდეს მასალის ქცევა საგრძნობი დეფორმაციების დროს, აგრეთვე პირობები, რომლის დროსაც მასალა იწყებს რღვევას. სხვადასხვა მასალის მექანიკური თვისებების შესახებ ცნობებს ექსპერიმენტული გზით ლებულობენ.

ამ პარაგრაფში მყარი სხეულის მექანიკურ თვისებებს განვიხილავთ გაჭიმვის დეფორმაციის კვლევის მაგალითზე. წინასწარ შემოვიღებთ კიდევ ერთ მნიშვნელოვან ცნებას.

**ძაბვა.** დეფორმირებული სხეულის ნებისმიერ კვეთაში მოქმედებს დრეკადობის ძალა, რომელიც ეწინააღმდეგება სხეულის ნაწილებად გაგლეჯას (სურ. 82). დეფორმირებული სხეულის მდგომარეობას ახასიათებენ განსაკუთრებული სიდიდით, რომელსაც ძაბვა, ან უფრო ზუსტად, მექანიკური ძაბვა ეწოდება. ძაბვა სიდიდეა, რომელიც ტოლია დრეკადობის ძალის  $F$  მოდულის შეფარდებისა სხეულის განივკვეთის  $S$  ფართობთან:

$$\sigma = \frac{F}{S}. \tag{7. 1}$$

$SI$  სისტემაში ძაბვის ერთეულად მიღებულია

$$1 \text{ პა} = 1 \frac{\text{ნ}}{\text{მ}^2}.$$

**გაჭიმვის დიაგრამა.** გაჭიმვის დეფორმაციის გამოკვლევისათვის იღებენ საკვლევი მასალის ღეროს და სპეციალური მოწყობილობის საშუალებით ჭიმვენ. ზომვენ ნიმუშის წაგრძელებას და მასში აღძრულ ძაბვას. ცდის შედეგების მიხედვით აგებენ  $\sigma$  ძაბვის ფარდობით წაგრძელებაზე დამოკიდებულების გრაფიკს. ამ გრაფიკს  $\epsilon$  გაჭიმვის დიაგრამა ეწოდება (სურ. 83).



ჰუკის კანონი. ცდა გვიჩვენებს, რომ მცირე დეფორმაციებისას  $\sigma$  ძაბვა პროპორციულია  $\varepsilon$  ფარდობითი წაგრძელებისა (დიაგრამის  $OA$  უბანი). ამ დამოკიდებულებას ჰუკის კანონი ეწოდება და ასე ჩაიწერება:

$$\sigma = E|\varepsilon|. \quad (7.2)$$

(7.2) ფორმულაში  $E$  ფარდობითი წაგრძელება მოდულითაა აღებული, რადგან ჰუკის კანონი მართებულია როგორც გაჭიმვის, ისე კუმშვის დეფორმაციისათვის ( $\varepsilon < 0$ ).

ჰუკის კანონში შემაჯავალ  $E$  პროპორციულობის კოეფიციენტს დრეკადობის მოდული ან უიუნგის მოდული ეწოდება.

იუნგის მოდულს იგებენ (7.2) ფორმულიდან. ამისათვის ზომავენ  $\sigma$  ძაბვას და  $\varepsilon$  ფარდობით წაგრძელებას მცირე დეფორმაციების დროს. ფართოდ გავრცელებულ მასალათა უმეტესი ნაწილისათვის იუნგის მოდული ექსპერიმენტულად არის განსაზღვრული. მაგალითად, ქრომნიკელიანი ფოლადისათვის  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  პა, ალუმინისათვის  $E = 7 \cdot 10^{10}$  პა, რაც მეტია  $E$ , მით ნაკლებად დეფორმირდება ღერო, სხვა თანაბარი პირობების დროს (ერთნაირი  $F$ ,  $S$ ,  $l_0$ ). იუნგის მოდული ახასიათებს მასალის გამძლეობას გაჭიმვის (კუმშვის) დრეკადი დეფორმაციის მიმართ. (7.2) სახით ჩაწერილ ჰუკის კანონს ადვილად მივცემთ იმ სახეს, რომელიც ცნობილია ფიზიკის IX კლასის კურსიდან.

მართლაც, თუ ჩავსვამთ (7.2)-ში  $\sigma = \frac{F}{S}$  და  $\varepsilon = \frac{|\Delta l|}{l_0}$  მივიღებთ

$$\frac{F}{S} = E \frac{|\Delta l|}{l_0},$$

აქედან

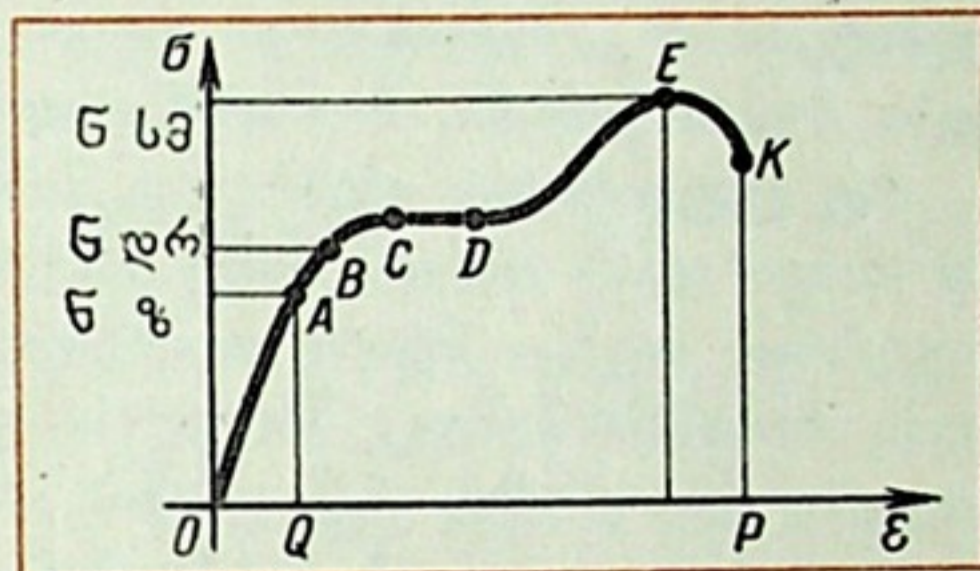
$$F = \frac{SE}{l_0} |\Delta l|. \quad (7.3)$$

შემოვიღოთ აღნიშვნა  $\frac{SE}{l_0} = k$ , მაშინ

$$F = k|\Delta l|. \quad (7.4)$$



სურ. 82.



სურ. 83.



ამრიგად, ღეროს სიხისტე პირდაპირპროპორციულია იუნვის მოდულისა და განივკვეთის ფართობის ნამრავლისა და უკუპროპორციულია მისი სიგრძისა.

სიხისტე

**პროპორციულობისა და დრეკადობის ზღვრები.** როგორც უკვე ვთქვით, ჰუკის კანონი სრულდება მცირე დეფორმაციებისა და, მაშასადამე, ვანსაზღვრული დაბევისას, რომლებიც რაღაც ზღვარს არ აღემატება.  $\sigma_{\text{ლ}}$  მაქსიმალურ დაბვას, რომლის დროსაც კიდევ სრულდება ჰუკის კანონი, პროპორციულობის ზღვარი ეწოდება.

თუ დატვირთვას გავზრდით, მაშინ დეფორმაცია არაწრფივი ხდება: დაბვა აღარ იქნება პირდაპირპროპორციული ფარდობითი წაგრძელებისა. თუმცა მცირე არაწრფივი დეფორმაციებისას დატვირთვის მოხსნის შემდეგ სხეულის ფორმა და ზომები პრაქტიკულად აღდგება (დიაგრამის  $AB$  უბანი).  $\sigma_{\text{ფ}}$  მაქსიმალურ დაბვას, რომლის დროსაც ჯერ კიდევ არ წარმოიშობა საგრძნობი ნარჩენი დეფორმაცია (ფარდობითი ნარჩენი დეფორმაცია  $0,1\%$ -ს არ აღემატება), დრეკადობის ზღვარს უწოდებენ. დრეკადობის ზღვარი პროპორციულობის ზღვარს აღემატება პროცენტის რაღაც მეასედი ნაწილებით.

**სიმტკიცის ზღვარი.** თუ გარე დატვირთვა ისეთია, რომ სხეულში აღძრული დაბვა დრეკადობის ზღვარს აღემატება, დატვირთვის მოხსნის შემდეგ ნიმუში თუმცა მოკლდება, მაგრამ წინანდელ ზომებს ვერ ღებულობს, რჩება დეფორმირებული.

დატვირთვის გადიდებისას დეფორმაცია სულ უფრო სწრაფად იზრდება. დაბვის რაღაც მნიშვნელობის დროს, რომელიც დიაგრამაზე  $C$  წერტილს შეესაბამება, წაგრძელება პრაქტიკულად დატვირთვის გაუდიდებლად იზრდება. ამ მოვლენას მასალის დენადობა ეწოდება ( $CD$  უბანი). ამ დროს მრუდი დიაგრამაზე თითქმის პორიზონტალურია.

შემდეგ,  $E$  დეფორმაციის გადიდებით დაბვის მრუდი ცოტათი აიწევს და  $E$  წერტილში მაქსიმუმს აღწევს. შემდეგ დაბვა სწრაფად ეცემა და ნიმუში ირღვევა ( $K$  წერტილი). ამრიგად, რღვევა იწყება მას შემდეგ, რაც დაბვამ მაქსიმალურ მნიშვნელობას მიაღწია (ნიმუში გარე დატვირთვის გაუდიდებლად იჭიმება რღვევამდე). დაბვის ამ მნიშვნელობას სიმტკიცის ზღვარი ეწოდება, აღინიშნება  $\sigma_{\text{ფ}}$ -ით. ეს სიდიდე დამოკიდებულია ნიმუშის მასალაზე და მის დამუშავებაზე.

### 83. კლასტიკურობა და სიმყიფე

ნებისმიერი მასალისაგან დამზადებული სხეული მცირე დეფორმაციის დროს ისე იქცევა, როგორც დრეკადი სხეული. დატვირთვის მოხსნის შემდეგ მისი ზომები და ფორმა აღდგება. ამავე დროს ცო-





ტად თუ ბევრად თითქმის ყველა სხეული განიცდის პლასტიკურ დეფორმაციას.

მასალათა მექანიკური თვისებები მრავალფეროვანია. ისეთი მასალა, როგორცაა რეზინი ან ფოლადი, დრეკად თვისებებს ამჟღავნებს შედარებით დიდი დაბვისა და დეფორმაციის დროს. ფოლადისათვის, მაგალითად, ჰუკის კანონი სრულდება  $\epsilon = 1\%$ -მდე, რეზინისათვის კი უფრო დიდ მნიშვნელობამდე — ათეულ პროცენტამდე. ამიტომ ასეთ მასალას დრეკადი ეწოდება.

**პლასტიკურობა.** სველ თიხას, პლასტილინს ან ტყვიას დრეკადი დეფორმაციის არე მცირე აქვს. მასალას, რომლის უმნიშვნელო დატვირთვაც კი იწვევს პლასტიკურ დეფორმაციას, პლასტიკური მასალა ეწოდება.

დაყოფა დრეკად და პლასტიკურ მასალებად უფრო მეტად პირობითია. იმის მიხედვით, თუ როგორია აღძრული დაბვა, ერთი და იგივე მასალა იქცევა ან როგორც დრეკადი, ან როგორც პლასტიკური. ასე მაგალითად, ძალიან დიდი დაბვის დროს ფოლადი ამჟღავნებს პლასტიკურ თვისებებს. ამას ფართოდ იყენებენ ფოლადის ნაკეთობათა ტვიფრვისას წნეხებით, რომლებიც ძალიან დიდ დატვირთვას ქმნის.

ცივი ფოლადი ან რკინა ძნელად ემორჩილება უროთი ჭედვას, მაგრამ ძლიერი გაცხელების შემდეგ ჭედვის მეშვეობით მათ ადვილად აძლევენ ამა თუ იმ ფორმას. ტყვია, რომელიც ოთახის ტემპერატურაზე პლასტიკურია, აშკარად გამოხატულ დრეკად თვისებებს შეიძენს, თუ მას გავაცივებთ —  $100^{\circ}\text{C}$ -ზე უფრო დაბალ ტემპერატურამდე.

**სიმყიფე.** პრაქტიკაში დიდი მნიშვნელობა აქვს მყარი სხეულის თვისებას, რომელსაც სიმყიფე ეწოდება. მასალა მყიფეა, თუ ის ირღვევა მცირე დეფორმაციის დროს. მინისა და ფაიფურის ნაკეთობა მყიფეა: იმსხვრევა ნატეხებად მაშინაც კი, როცა მცირე სიმაღლიდან ვარდება იატაკზე. თუჯი, მარმარილო, ქარვა ასევე დიდი სიმყიფით ხასიათდება. პირიქით, ფოლადი, სპილენძი, ტყვია და ა. შ. მყიფე არაა.

ყველა მყიფე მასალის დაბვა ძალიან სწრაფად იზრდება დეფორმაციის გაზრდით და მასალა უმნიშვნელო დეფორმაციის დროსაც კი ირღვევა. მაგალითად, თუჯი ირღვევა  $0,45\%$  ფარდობითი წაგრძელების დროს, ფოლადის დეფორმაცია კი, როცა  $\epsilon = 0,45\%$ , ჯერ კიდევ დრეკადია. ფოლადი ირღვევა, როცა  $\epsilon \approx 15\%$ .

მყიფე მასალებში პლასტიკური თვისებები პრაქტიკულად არ მჟღავნდება.



- 7 1. ჩამოთვალეთ მყარი სხეულის დეფორმაციის ძირითადი სახეები. 2. რას ეწოდება მექანიკური ძაბვა? 3. როგორაა დაკავშირებული მექანიკური ძაბვა ფარდობით წაგრძელებასთან? 4. რით განსხვავდება დრეკადი დეფორმაციები პლასტიკურისაგან? 5. რას ეწოდება სიმტკიცის ზღვარი? 6. როგორ მასალას ეწოდება მყიფე?

### ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები

ამ თავის გამოთვლით ამოცანებში გამოყენებულია ძაბვის ცნება (ფორმულა 7.1) და ჰუკის კანონი (7.2) და (7.3) სახით.

1. განსაზღვრეთ  $F=8,14 \cdot 10^5$  ნ ძალით შეკუმშული ფოლადის ღეროს ფარდობითი დამოკლება, თუ ღეროს დიამეტრი  $D=2$  სმ და იუნგის მოდული  $E=2 \cdot 10^{11}$  პა.

ამოხსნა. (7.3) ჰუკის კანონის თანახმად,

$$|\epsilon| = \frac{|\Delta l|}{l_0} = \frac{F}{ES},$$

სადაც  $S = \frac{\pi D^2}{4}$  ღეროს განივკვეთის ფართობია.

$$\text{ამრიგად, } |\epsilon| = \frac{4F}{\pi D^2 E} = 0,005, \text{ ანუ } |\epsilon| = 0,5\%.$$

2. თითბრის მავთულის დიამეტრი  $D=0,8$  მმ, სიგრძე კი  $l=8,6$  მ.  $F=25$  ნ ძალის გავლენით მავთული გრძელდება  $\Delta l=2$  მმ-ით. განსაზღვროთ იუნგის მოდული თითბრისათვის.

ამოხსნა. იუნგის მოდული განისაზღვრება ჰუკის კანონიდან (7.3):

$$E = \frac{Fl_0}{S|\Delta l|} \text{ რადგან } S = \frac{\pi D^2}{4}, \text{ ამიტომ}$$

$$E = \frac{4Fl_0}{\pi D^2 |\Delta l|};$$

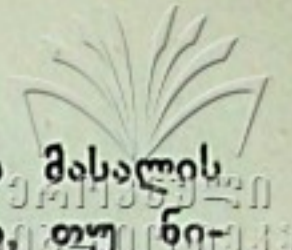
$$E \approx 9 \cdot 10^{10} \text{ პა.}$$

### სავარჯიშო 7.

1. თუ სხეულს ახასიათებს ანიზოტროპია, ნიშნავს თუ არა ეს, რომ იგი აუცილებლად კრისტალურია?

2. იქნებოდა თუ არა მინამბერის პროფესია, მინა რომ კრისტალური სხეული იყოს და არა ამორფული?





3. გუთანი მიბმულია ტრაქტორზე ფოლადის საწევით. საწევის მასალის დასაშვები ძაბვა  $\sigma = 20$  კპა. როგორი უნდა იყოს საწევის კვეთის ფართობი ადაგის წინაღობა გუთნის მოძრაობისადმი  $1,6 \cdot 10^5$  ნ-ია?

4. განსაზღვრეთ მოდული ძალისა, რომელიც მოდებულია ღეროზე მისი ღერძის გასწვრივ და მასში იწვევს  $1,5 \cdot 10^8$  პა ძაბვას. ღეროს დიამეტრია 0,4 სმ.

5. რა სიღრმის ძაბვა აღიძვრება აგურის კედლის ფუძეში, თუ კედლის სიმაღლეა 20 მ? აგურის სიმკვრივეა  $1800$  კგ/მ<sup>3</sup>. ერთნაირი უნდა იყოს თუ არა აგურების სიმტკიცე კედლის ფუძესთან და მის ზემო ნაწილში?

6. რა უმოკლესი სიგრძე უნდა ჰქონდეს ერთი ბოლოთი თავისუფლად დაკიდებულ ფოლადის მავთულს, რომ გაწყდეს თავისი სიმძიმის ძალის მოქმედებით? ფოლადის სიმტკიცის ზღვარია  $3,2 \cdot 10^8$  პა, სიმკვრივე კი  $7800$  კგ/მ<sup>3</sup>.

7. 5 მ სიგრძისა და  $2,5$  მმ<sup>2</sup> განივკვეთის მავთული  $100$  ნ ძალის მოქმედებით დაგრძელდა  $1$  მმ-ით. განსაზღვრეთ მავთულში აღძრული ძაბვა და იუნგის მოდული.

8. რკინაბეტონის სვეტი იკუმშება  $F$  ძალით. ჩავთვალოთ, რომ  $E$  ბეტონის იუნგის მოდული  $E_{\text{ბეტონის}}$  რკინის იუნგის მოდულის  $\frac{1}{10}$  შეადგენს. ხოლო რკინის განივკვეთის ფართობი — ბეტონის განივკვეთის ფართობის  $\frac{1}{20}$ -ს. დატვირთვის რა ნაწილი მოდის ბეტონზე?

**მოდული დასაკვირვებელი**

მყარი სხეული უმთავრესად კრისტალურ მდგომარეობაშია. კრისტალები ანიზოტროპულია: კრისტალთა ფიზიკური თვისებები დამოკიდებულია აღებულ მიმართულებაზე.

ამორფულ სხეულში, კრისტალებისგან განსხვავებით, ატომების განლაგებას მკაცრი წესრიგი არ ახასიათებს. დაბალ ტემპერატურაზე ამორფული სხეული თავისი თვისებებით მყარ სხეულს მოგვაგონებს, მაღალ ტემპერატურაზე კი ბლანტ სითხეს ემსგავსება.

მცირე დეფორმაციის დროს დატვირთვის მოხსნის შემდეგ დეფორმაცია ისპობა. სხეული დრეკად თვისებებს ამჟღავნებს. დრეკადი დეფორმაციის დროს ძაბვა, ე. ი. დრეკადობის ძალის მოდულის შეფარდება განივკვეთის ფართობთან, ჰუკის კანონს ემორჩილება:

$$\sigma = E|\epsilon|,$$

სადაც  $E$  იუნგის მოდულია, რომელიც ნივთიერების დრეკად თვისებებს ახასიათებს,  $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$  კი სხეულის ზომების ფარდობითი ცვლილებაა.

მყარი სხეულის მექანიკური თვისებები ყველაზე ნათლად ჩანს გაჭიმვის დიაგრამაზე (სურ. 83).



84. რა არის ელექტროდინამიკა?

ვიწყებთ ფიზიკის ახალი განყოფილების „ელექტროდინამიკის“ შესწავლას. თვით სახელწოდება გვეუბნება, რომ ლაპარაკი იქნება პროცესებზე, რომლებიც განპირობებულია ელექტრულად დამუხტული ნაწილაკების მოძრაობითა და ურთიერთქმედებით. ასეთ ურთიერთქმედებას ელექტრომაგნიტური ეწოდება. მის შესწავლას მივყავართ ფიზიკის ერთ-ერთ ყველაზე უფრო ფუნდამენტურ — ელექტრომაგნიტური ველის ცნებასთან.

ელექტრომაგნიტური ველი მატერიის განსაკუთრებული სახეა. რომელიც ურთიერთქმედებას ახორციელებს ელექტრულად დამუხტულ სხეულებსა ან ნაწილაკებს შორის.

მეცნიერებას ელექტრომაგნიტური ველის თვისებებისა და ქცევის კანონზომიერებათა შესახებ ელექტროდინამიკა ეწოდება.

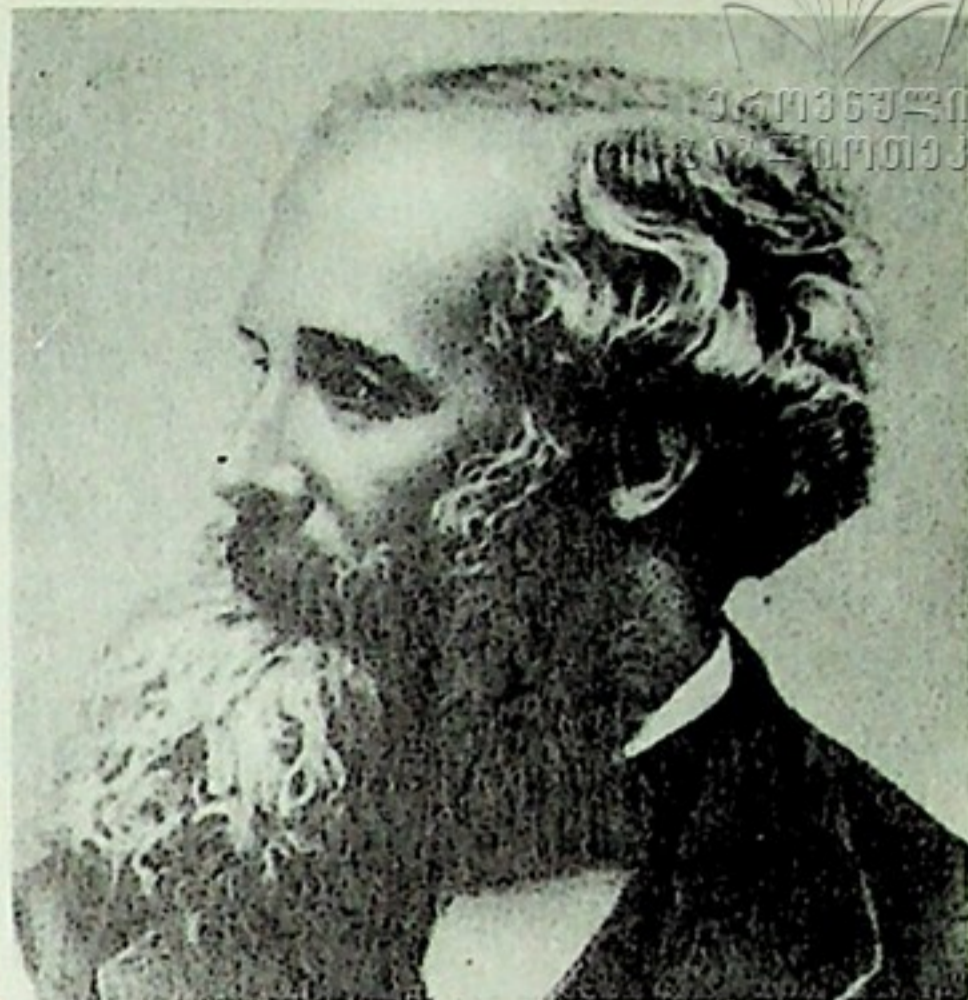
მეცნიერებაში დადგენილი ოთხი ტიპის ურთიერთქმედებიდან — გრავიტაციული, ელექტრომაგნიტური, ძლიერი (ბირთვული) და სუსტი<sup>1</sup> — სწორედ ელექტრომაგნიტური ძალები ვლინდება ყველაზე ფართოდ და მრავალფეროვნად. ყოველდღიურ ცხოვრებასა და ტექნიკაში, ყველაზე ხშირად ელექტრომაგნიტურ ძალთა სხვადასხვა სახეს ვხვდებით. ესაა დრეკადობისა და ხახუნის ძალები, ჩვენი კუნთებისა და სხვადასხვა ცხოველის კუნთის ძალები.

ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედება საშუალებას გვაძლევს დავინახოთ წიგნი, რომელსაც ვკითხულობთ და ეს გასაგებია, რადგან სინათლე ელექტრომაგნიტური ველის ერთ-ერთი ფორმაა. თვით სიცოცხლე წარმოუდგენელია ამ ძალების გარეშე. ცოცხალ არსებებს და თვით ადამიანსაც, როგორც კოსმოსურმა გაფრენებმა გვიჩვენა, შეუძლიათ ხანგრძლივად ყოფნა უწონობის მდგომარეობაში, როცა მსოფლიო მიზიდულობის ძალა არავითარ გავლენას არ ახდენს ორგანიზმთა ცხოველქმედებაზე. მაგრამ ელექტრომაგნიტურ ძალთა მოქმედება ერთი წამითაც რომ შეწყდეს, მაშინვე შეწყდებოდა სიცოცხლეც.

<sup>1</sup> სუსტი ურთიერთქმედება ძირითადად ელემენტარულ ნაწილაკთა გარდაქმნას იწვევს.



ჯეიმს კლერკ მაქსველი (1831—1879)  
დიდი ინგლისელი ფიზიკოსია, მან შექმ-  
ნა ელექტრომაგნიტური ველის თეორია.  
მაქსველის განტოლებები, რომლებიც  
ელექტრომაგნიტურ ველს ეხება, სა-  
ფუძვლად უდევს მთელ ელექტროდინა-  
მიკას, ისევე როგორც ნიუტონის კანო-  
ნები — კლასიკურ მექანიკას, მაქსველი  
არის აგრეთვე ნივთიერების აგებულე-  
ბის მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის  
ერთ-ერთი ფუძემდებელი. მან პირველ-  
მა შემოიღო ფიზიკაში წარმოდგენები  
სტატისტიკური კანონების შესახებ, რო-  
მელშიც ალბათობის მათემატიკური ცნე-  
ბაა გამოყენებული.



ელექტრომაგნიტური ძალები მნიშვნელოვან როლს ასრულებს  
ბუნების როგორც ყველაზე მცირე სისტემებში — ატომის ბირთვებში  
ნაწილაკთა ურთიერთქმედებისას, ისე კოსმოსურ სხეულთა ურთი-  
ერთქმედების დროს; ძლიერი და სუსტი ურთიერთქმედება განსაზღ-  
ვრავს მხოლოდ მცირე<sup>1</sup> მასშტაბის პროცესებს, გრავიტაციული  
კი — მხოლოდ კოსმოსურს.

ატომის გარსის აგებულება, ატომების შეჭიდულობა მოლეკუ-  
ლებში (ქიმიური ძალები) და მაკროსკოპული სხეულების წარმოქმნა  
მხოლოდ და მხოლოდ ელექტრომაგნიტური ძალებით განისაზღვრება.  
ძნელია, თითქმის შეუძლებელიც კი, ისეთი მოვლენის დასახელება,  
რომელიც დაკავშირებული არ არის ელექტრომაგნიტურ ძალთა მოქ-  
მედებასთან.

ელექტროდინამიკის შექმნა მოჰყვა გეგმაზომიერი გამოკვლევების  
და შემთხვევითი აღმოჩენების გრძელ ჯაჭვს; დაწყებული აბრეშუმის  
ქსოვილზე გახახუნებული ქარვის მიერ მსუბუქი სხეულების მიზიდ-  
ვის თვისების შემჩნევიდან, დამთავრებული მაქსველის ჰიპოთეზით  
იმის შესახებ, რომ ცვლადი ელექტრული ველი წარმოქმნის მაგნი-  
ტურ ველს. მხოლოდ მას შემდეგ, რაც შეიქმნა ელექტროდინამიკა,  
XIX საუკუნის მეორე ნახევარში დაიწყო ელექტრომაგნიტური მოვ-  
ლენების ფართო პრაქტიკული გამოყენება. ა. ს. პოპოვის მიერ რა-  
დიოს გამოგონება, ახალი თეორიის პრინციპების ერთ-ერთი უმნიშ-  
ვნელოვანესი გამოყენებაა. ელექტროდინამიკის განვითარების დროს  
პირველად მოხდა, რომ მეცნიერული გამოკვლევები წინ უსწრებდა  
ტექნიკურ გამოყენებებს. თუ ორთქლის მანქანა ააგეს დიდი ხნით აღ-

<sup>1</sup> მანძილი, რომელზეც მქლავნდება ძლიერი ურთიერთქმედება 10-12 სმ რიგისაა.  
სუსტი ურთიერთქმედება კი — უფრო მცირე მანძილზე, არაუმეტეს 10-17 სმ-სა.



რე, ვიდრე სითბური პროცესების თეორია შეიქმნებოდა, ელექტრო-  
ძრავას ან რადიომიმღების აგება შესაძლო გახდა მხოლოდ ელექ-  
ტროდინამიკის კანონების აღმოჩენისა და შესწავლის შემდეგ.

ელექტრომაგნიტურ მოვლენათა უთვალავმა პრაქტიკულმა გამოყე-  
ნებამ სავსებით გარდაქმნა ადამიანთა ცხოვრება დედამიწის ზურგ-  
ზე. თანამედროვე ცივილიზაცია წარმოუდგენელია ელექტროდენის  
ენერჯის ფართო გამოყენების გარეშე.

ჩვენი ამოცანაა, შევისწავლოთ ელექტრომაგნიტური ურთიერთ-  
ქმედების ძირითადი კანონები, აგრეთვე გავეცნოთ ელექტრული  
ენერჯის მიღებისა და პრაქტიკაში მისი გამოყენების ხერხებს.

## VIII თავი

### ელექტროსტატიკა

#### 85. ელექტრული მუხტი და ელემენტარული ნაწილაკები

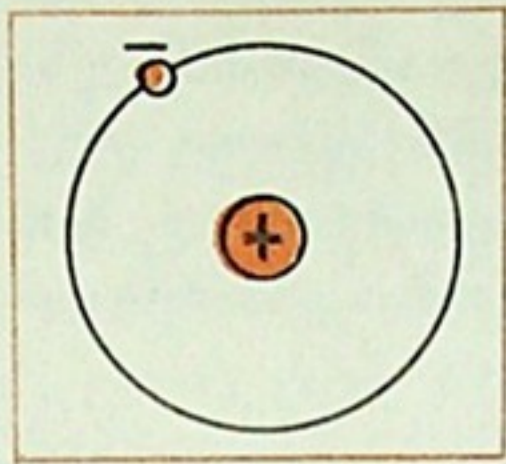
სიტყვები „ელექტრობა“, „ელექტრული მუხტი“ „ელექტრული  
დენი“ ხშირად მოგვისმენია და მიჩვეულიც ვართ მათ ხმარებას. მაგ-  
რამ აბა სინჯეთ უპასუხოთ კითხვას: „რა არის ელექტრული მუხტი?“  
დარწმუნდებით, რომ ეს არც ისე მარტივია. მართლაც, მუხტის ცნება  
ძირითადი, პირველადი ცნებაა, რომელიც ჩვენი ცოდნის განვითარე-  
ბის თანამედროვე დონის მიხედვით არ დაიყვანება რაიმე უფრო  
მარტივ, ელემენტარულ ცნებაზე.

შევეცადოთ ჯერ გავარკვიოთ, თუ რას გულისხმობენ გამონათ-  
ქვამში: მოცემულ სხეულს ან ნაწილაკს აქვს ელექტრული მუხტი.

ვიცით, რომ ყველა სხეული აგებულია ისეთი უმცირესი ნაწილა-  
კებისაგან, რომლებიც აღარ იყოფა (როგორც ამჟამად არის ცნობილი  
მეცნიერებაში) უფრო მარტივ ნაწილაკებად. მათ ელემენტარული ნა-  
წილაკები ეწოდება. ყველა ელემენტარულ ნაწილაკს აქვს მასა და  
ამიტომ, მსოფლიო მიზიდულობის კანონის თანახმად, ერთმანეთს  
იზიდავენ ძალით, რომელიც უკუპროპორციულია მათ შორის მანძი-  
ლის კვადრატისა.

ელემენტარულ ნაწილაკთა უმრავლესობას, გარდა ამისა, ახასი-  
ათებს ურთიერთქმედება ისეთი ძალით, რომელიც აგრეთვე მანძილს  
კვადრატის უკუპროპორციულად მცირდება; მაგრამ ეს ძალა გაცი-  
ლებით დიდია მსოფლიო მიზიდულობის ძალაზე. მაგალითად, წყალ-  
ბადის ატომში (სურ. 84) ბირთვი (პროტონი) ელექტრონს იზიდავს  
ძალით, რომელიც  $10^{39}$ -ჯერ აღემატება გრავიტაციული მიზიდულობის  
ძალას.





სურ. 84.

თუ ნაწილაკებს ახასიათებს ასეთი ურთი-  
ერთქმედების უნარი, მაშინ ამბობენ, რომ მათ  
აქვთ ელექტრული მუხტი, თვით ნა-  
წილაკებს დამუხტული ნაწილაკე-  
ბი ეწოდება. არსებობს ნაწილაკი უმუხ-  
ტოდ, მაგრამ არ არსებობს ელექტ-  
რული მუხტი უნაწილაკოდ.

დამუხტულ ნაწილაკებს შორის ურთიერთ-  
ქმედებას ელექტრომაგნიტური ურ-  
თიერთქმედება ეწოდება. ელექტრული მუხტი განსაზღვრავს ელექტ-  
რომაგნიტური ურთიერთქმედების ინტენსიურობას, მსგავსად იმისა,  
როგორც მასა განსაზღვრავს გრავიტაციული ურთიერთქმედების ინ-  
ტენსიურობას.

ელემენტარული ნაწილაკის ელექტრული მუხტი არ არის განსა-  
კუთრებული „მექანიზმი“, რომელიც შეიძლება ნაწილაკს მოვაცი-  
ლოთ, დავშალოთ შემადგენელ ნაწილებად და შემდეგ კვლავ აღვად-  
გინოთ. ელექტრონს და სხვა ნაწილაკს რომ მუხტი აქვს, ეს მხოლოდ  
მათ შორის განსაზღვრულ ძალური ურთიერთქმედების არსებობას  
ნიშნავს. მაგრამ არსებითად არაფერი გვეცოდინება მუხტის შესახებ,  
თუ არ ვიცით ამ ურთიერთქმედებათა კანონები. მუხტზე ჩვენი წარ-  
მოდგენები უნდა შეიცავდეს ურთიერთქმედებათა კანონების ცოდ-  
ნას. ეს კანონები მარტივი როდია, რამდენიმე სიტყვით მათი გადმო-  
ცემა შეუძლებელია. ამიტომაც შეუძლებელია მოკლედ და სრულად  
განვსაზღვროთ, თუ რა არის ელექტრული მუხტი.

**ელექტრული მუხტების ორი ნიშანი.** ყველა სხეულს აქვს მასა,  
ამიტომ ისინი ერთმანეთს იზიდავენ. დამუხტულ სხეულებს კი შეუძ-  
ლია ერთმანეთის როგორც მიზიდვა, ისე განზიდვა. ეს მეტად მნიშ-  
ვნელოვანი ფაქტი, რომელიც VIII კლასის ფიზიკის კურსიდან ვიცით,  
ნიშნავს, რომ ბუნებაში არის საპირისპირო ნიშნით დამუხტული ნა-  
წილაკები. თუ მუხტის ნიშნები საპირისპიროა, ნაწილაკები მიიზი-  
დებიან, ხოლო თუ ერთნაირია — განიზიდებიან.

ყველა ატომის ბირთვში შემავალი ელემენტარული ნაწილაკების—  
პროტონების მუხტს დადებითად თვლიან, ელექტრონების მუხტს  
კი — უარყოფითად. დადებითსა და უარყოფით მუხტებს შორის არ  
არის არავითარი შინაგანი განსხვავება. ნაწილაკთა მუხტების ნიშნებ-  
მა რომ ერთმანეთი შეცვალონ, ამით ელექტრომაგნიტურ ურთიერთ-  
ქმედებათა ხასიათი ოდნავადაც არ შეიცვლება.

**ელემენტარული მუხტი.** გარდა ელექტრონებისა და პროტონე-  
ბისა, არის კიდევ დამუხტული ელემენტარული ნაწილაკების რამდენ-  
იმე ტიპი. მაგრამ განუსაზღვრელად დიდხანს მხოლოდ ელექტრო-



ნებსა და პროტონებს შეუძლიათ იარსებონ თავისუფალ მდგომარეობაში. სხვა დამუხტული ნაწილაკები კი წამის მემილიონედ ნაწილზე უფრო მცირე ხანს ცოცხლობენ. ისინი წარმოიშობიან სწრაფი ელემენტარული ნაწილაკების ურთიერთშეხლისას და უსაზღვროდ ხახმოკლე არსებობის შემდეგ დაიშლებიან, გადაიქცევიან სხვა ნაწილაკებად. ამ ნაწილაკებს XI კლასში გაეცნობით.

უმუხტო ნაწილაკებს მიეკუთვნება ნეიტრონი. მისი მასა უმნიშვნელო სიდიდით აღემატება პროტონის მასას. პროტონებთან ერთად ნეიტრონები შედიან ატომის ბირთვის შედგენილობაში.

თუ ელემენტარულ ნაწილაკს მუხტი აქვს, მაშინ მისი სიდიდე როგორც მრავალრიცხოვანი ცდები გვიჩვენებს, სრულიად განსაზღვრულია (ერთ-ერთი ცდა — მილიკენისა და იოფეს ცდა — აღწერილი იყო VIII კლასის სახელმძღვანელოში).

არსებობს მინიმალური მუხტი, რომელიც ყველა დამუხტულ ელემენტარულ ნაწილაკს აქვს. მას ელემენტარული მუხტი ეწოდება. ელემენტარულ ნაწილაკთა მუხტები მხოლოდ ნიშნით განსხვავდებიან. შეუძლებელია მოვაცილოთ ნაწილაკს, მაგალითად, ელექტრონს მუხტის ნაწილი.

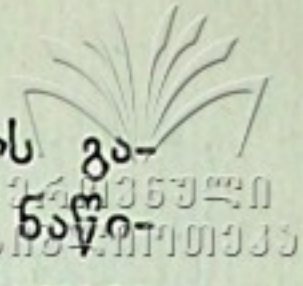
## 86. დამუხტული სხეული. სხეულთა დაელექტროება

ელექტრომაგნიტური ძალები უდიდეს როლს ასრულებს ბუნებაში. ეს გასაგებიცაა, რადგან ელექტრულად დამუხტული ნაწილაკები ყველა სხეულის შედგენილობაში შედის. ატომთა შემადგენელ ნაწილებს — ბირთვებსა და ელექტრონებს — ელექტრული მუხტი აქვს. სხეულებს შორის ელექტრომაგნიტური ძალების მოქმედება უშუალოდ არ მქლავნდება, რადგან ჩვეულებრივ მდგომარეობაში სხეულები ელექტრულად ნეიტრალურია. ყოველი ნივთიერების ატომი ნეიტრალურია, რადგან ელექტრონთა რიცხვი გარსში ტოლია პროტონების რიცხვისა ბირთვში. დადებითად და უარყოფითად დამუხტული ნაწილაკები ერთმანეთთან დაკავშირებულია ელექტრული ძალებით და ქმნიან ნეიტრალურ სისტემებს.

მაკროსკოპული სხეული ელექტრულად დამუხტულია იმ შემთხვევაში, თუ ის შეიცავს ერთი ნიშნის მუხტის მქონე ელემენტარულ ნაწილაკთა ჭარბ რაოდენობას. სხეულის უარყოფითი მუხტი განპირობებულია ელექტრონთა სიჭარბით პროტონებთან შედარებით, დადებითი კი — ელექტრონთა დანაკლისით.

იმისათვის, რომ მივიღოთ ელექტრულად დამუხტული მაკროსკოპული სხეული, ე. ი. რომ დავაელექტროვოთ ის, საჭიროა უარყოფითი მუხტის ნაწილი გავაცალკევოთ მასთან ბმული დადები-





თისაგან<sup>1</sup>. ეს შეიძლება ხახუნის საშუალებით. თუ სავარცხელს გადავისვამთ მშრალ თმაზე, მაშინ უფრო მოძრავი დამუხტული ნაწილაკების ელექტრონების მცირე ნაწილი თმიდან სავარცხელზე გადავა და მას უარყოფითად დამუხტავს, თმა კი დადებითად დაიმუხტება.

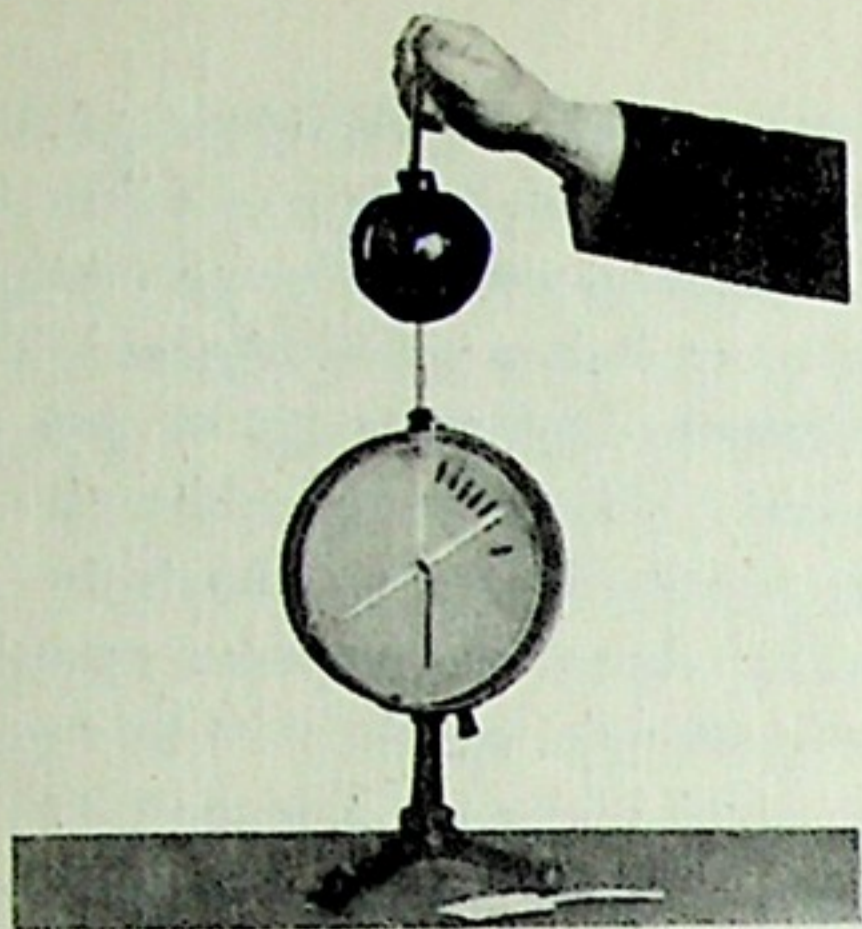
**მუხტების ტოლობა დაელექტროების დროს.** შეიძლება ცდით დავამტკიცოთ, რომ ხახუნით დაელექტროების დროს ორივე სხეული ნიშნით საპირისპირო და მოდულით ტოლ მუხტებს ღებულობს. ავიღოთ ელექტრომეტრი<sup>2</sup> მის ღეროზე დამაგრებული ხვრელიანი ლითონის სფეროთი და ორი გრძელტარიანი ფირფიტა: ერთი ებონიტის, მეორე კი პლექსიგლასისა. ერთმანეთზე გახახუნებისას ფირფიტები ელექტროვდებიან. შევიტანოთ ერთ-ერთი ფირფიტა სფეროს შიგნით ისე, რომ კედლებს არ შეეხოს. თუ ფირფიტა დადებითადაა დამუხტული, მაშინ ელექტრომეტრის ისრიდან და ღეროდან ელექტრონთა ნაწილი მიიზიდება ფირფიტისაკენ და მოგროვდება სფეროს შიდა ზედაპირზე. ამ დროს ისარი დაიმუხტება დადებითად და განიზიდება ღეროსაგან (სურ. 85). თუ სფეროს შიგნით მეორე ფირფიტას შევიტანთ პირველის ამოღების შემდეგ, მაშინ სფეროსა და ღეროს ელექტრონები ფრფიტისაგან განიზიდებიან და ჭარბად დაგროვდებიან ისარზე. ეს გამოიწვევს ისრის გადახრას და ამასთან იმავე კუთხით, როგორც პირველი ცდის დროს. თუ სფეროს შიგნით ორივე ფირფიტას ჩავუშვებთ, ისარი აღარ გადაიხრება (სურ. 86). ეს ამტკიცებს, რომ ფირფიტების მუხტები, მოდულით ტოლია და ნიშნით საპირისპირო.

**როგორ ხდება სხეულთა დაელექტროება?** სხეულთა დაელექტროების დროს მნიშვნელოვანია მჭიდრო კონტაქტი მათ შორის. ელექტრული ძალები ელექტრონებს აკავებს სხეულის შიგნით. მაგრამ სხვადასხვა ნივთიერებისთვის ეს ძალები განსხვავებულია. მჭიდრო კონტაქტის დროს იმ ნივთიერებიდან, რომელშიც ელექტრონების სხეულთან კავშირი შედარებით სუსტია, ელექტრონთა მცირე ნაწილი გადადის მეორე ნივთიერებაზე. ამ დროს ელექტრონთა გადაადგილება არ აღემატება ატომთაშორის მანძილის ზომებს ( $10^{-8}$  სმ). მაგრამ თუ სხეულებს განვაცალკევებთ, ორივე დამუხტული აღმოჩნდება.

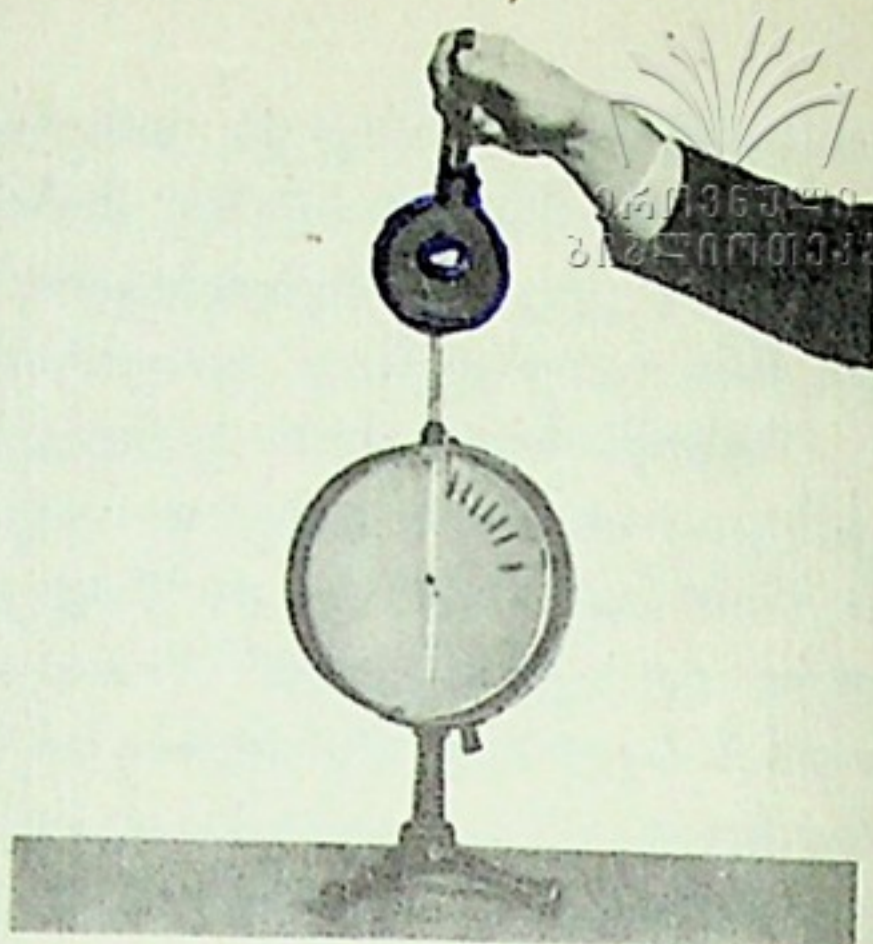
<sup>1</sup> აქ და შემდეგში ხშირად სიმოკლისათვის ვილაპარაკებთ „მუხტების“, „მუხტების გადაადგილების“ შესახებ და ა. შ. სინამდვილეში კი ამ დროს მხედველობაში გვეჩნება „დამუხტული სხეულები (ან ნაწილაკები)“, „დამუხტული ნაწილაკების გადაადგილება“ და ა. შ. რადგან მუხტი ნაწილაკის გარეშე არ არსებობს.

<sup>2</sup> ელექტრომეტრის მოწყობილობას დაწვრილებით გაეცნობით 52-ე პარაგრაფში. მოქმედების პრინციპის მიხედვით არ არის არსებითი განსხვავება ელექტრომეტრსა და ელექტროსკოპს (რომელსაც VIII კლასში გაეცანით) შორის.





სურ. 85.

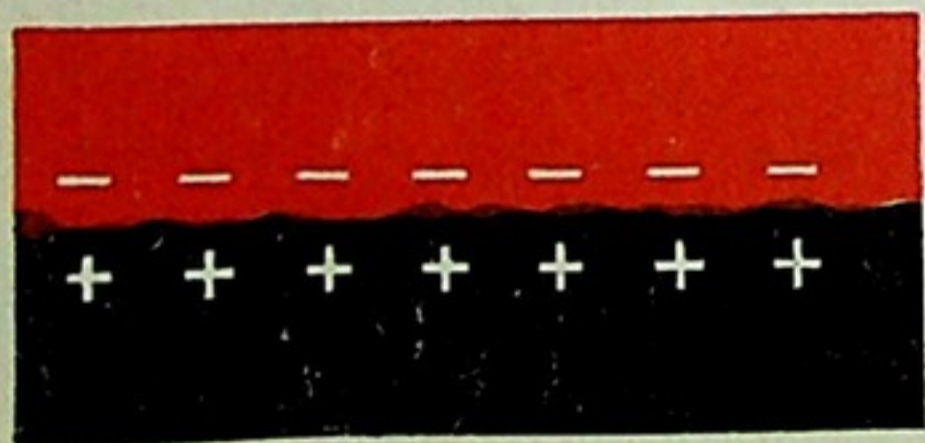


სურ. 86.

რადგან სხეულთა ზედაპირი არასოდეს არ არის იდეალურად გლუვი, ამიტომ ელექტრონთა გადასვლისათვის აუცილებელი მჭიდრო კონტაქტი სხეულებს შორის მათი ზედაპირების მხოლოდ მცირე უბნებზე მიიღება (სურ. 87). სხეულების ერთმანეთზე ხახუნის დროს მჭიდროკონტაქტიანი უბნების რიცხვი იზრდება.

**სხეულთა დაელექტროება და მისი გამოყენება ტექნიკაში.** საგრძნობი დაელექტროება ხდება სინთეზურ ქსოვილთა ხახუნის დროს. მშრალ ჰაერში ნეილონის პერანგის გახდისას ჯავიგონებთ დამახასიათებელ ტკაცანს. მოხახუნე ზედაპირთა დამუხტულ უბნებს შორის გახტება პატარა ნაპერწკლები. მსგავს მოვლენებს ანგარიშს უწევენ წარმოებაში. მაგალითად, საფეიქრო ფაბრიკაში ნართის ძაფი იმუხტება ხახუნის გამო, მიიზიდება თითისტარისა და გორგოლაჭისკენ და წყდება. ნართი იზიდავს მტვერს და ჭუჭყიანდება. საჭიროა სპეციალური ზომების მიღება ძაფის დაელექტროების საწინააღმდეგოდ.

სხეულთა მჭიდრო კონტაქტით დაელექტროების მოვლენა გამოყენებულია თანამედროვე ელექტროპირგადასაღებ დანადგარში („ერას“, „ქსეროქსის“ და სხვა მსგავსი ტიპისა).



სურ. 87.

ასე მაგალითად, ერთ-ერთ ამ დანადგარში შავი გაფისული ფხვნილი შერეულია მინის უმცირეს ბურთულებთან. ამ დროს ბურთულები იმუხტება დადებითად, ფხვნილის ნაწილაკები კი — უარყოფითად. მიზიდვის შედეგად ისინი თხელი ფენით ფარავენ ბურთულების ზედაპირს.



პირგადასაღები ტექსტი ან სურათი გეგმილდება სელენის თხელ ფირფიტაზე, რომლის ზედაპირი დამუხტულია დადებითად. ფირფიტა ძევს ლითონის უარყოფითად დამუხტულ ზედაპირზე. სინათლის გავლენით ფირფიტა განიმუხტება და დადებითი მუხტი რჩება მხოლოდ იმ უბნებზე, რომლებიც გამოსახულების ბნელ ადგილებს შეესაბამება. ამის შემდეგ ფირფიტა იფარება ბურთულების თხელი ფენით. სხვადასხვანიშნიანი მუხტების ურთიერთმიზიდვის შედეგად გაფისული ფხვნილი მიეზიდება ფირფიტის დადებითად დამუხტულ უბნებს. შემდეგ ბურთულებს ჩამობერტყავენ და ფირფიტას მჭიდროდ მიაკრავენ ქალაღდის ფურცელს, რომელზეც ანაბეჭდი მიიღება.

### 37. ელექტრული მუხტის მუღმივობის კანონი

ფირფიტების დაელექტროების ცღა გვიმტკიცებს რომ ხახუნით დაელექტროების დროს არსებული მუხტები გაღანაწილდება სხეულებს შორის, რომლებიც პირველ მომენტში ნეიტრალურია. ელექტრონთა მცირე ნაწილი ერთი სხეულიდან მეორეზე გაღადის. ახალი დამუხტული ნაწილაკები არ წარმოიქმნება, ადრე არსებული კი არ ისპობა.

[სხეულთა დაელექტროება ემორჩილება ელექტრული მუხტის მუღმივობის კანონს. ეს კანონი მართებულია ისეთი სისტემისთვის, რომელშიც გარედან არ შეღიან და რომლიღანაც გარეთ არ გამოღიან დამუხტული ნაწილაკები, ე. ი. ჩაკეტილი სისტემისათვის. ჩაკეტილ სისტემაში ყველა ნაწილაკის მუხტების აღგებრული ჯამი მუღმივი რჩება:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_N = \text{const.} \quad (8.1)$$

მუხტის მუღმივობის კანონს ღრმა აზრი აქვს. თუ დამუხტულ ელემენტარულ ნაწილაკთა რიცხვი არ იცვლება, მაშინ მუხტის მუღმივობის კანონის შესრულება სავსებით ნათელია. მაგრამ შესაძლოა მოხდეს ელემენტარულ ნაწილაკთა ურთიერთგარღაქმნა, წარმოქმნა ან მოსპობა და ამ დროს ახალი ნაწილაკების გაჩენა<sup>1</sup>. მაგრამ ყველა შემთხვევაში დამუხტული ნაწილაკები წარმოიქმნება წყვილად, მოღულით ერთნაირი და ნიშნით სპირისპირო მუხტებით. დამუხტული ნაწილაკები ისპობა და ნეიტრალურ ნაწილაკებად იქცევა, მაგრამ ისევე წყვილად. ყველა შემთხვევაში იზოღირებული სისტემის მუხტების ჯამი ერთი და იგივე რჩება.

მუხტის მუღმივობის კანონს აღასტურებს ელემენტარულ ნაწილაკთა უამრავი რაოღენობის გარღაქმნებზე დაკვირვებანი. ეს კანონი

<sup>1</sup> ამის შესახებ დაწვრიღვებით იქნება მოთხრობილი ფიზიკის XI კლასის სახელმღღვანელოში.



გამოხატავს ელექტრული მუხტის ერთ-ერთ ყველაზე ფუნდამენტურ თვისებას. მუხტის მუდმივობის მიზეზი აქამდე უცნობია.



- 9 1. როგორ ურთიერთქმედებას ეწოდება ელექტრომაგნიტური? 2. რა არის ელემენტარული მუხტი? 3. დაასახელეთ სხეულთა დაელექტროებით გამოწვეულ მოვლენათა მაგალითები, რომლებიც გინახავთ ყოველდღიურ ცხოვრებაში. 4. ებონიტის ღერო დამუხტა უარყოფითად. დარჩა თუ არა უცვლელი ღეროს მასა? 5. ჩამოაყალიბეთ ელექტრული მუხტის მუდმივობის კანონი. 6. დაასახელეთ მოვლენათა მაგალითები, რომლებშიც მუხტის მუდმივობას ვაკვირდებით.

### 88. ელექტროსტატიკის ძირითადი კანონი — კულონის კანონი

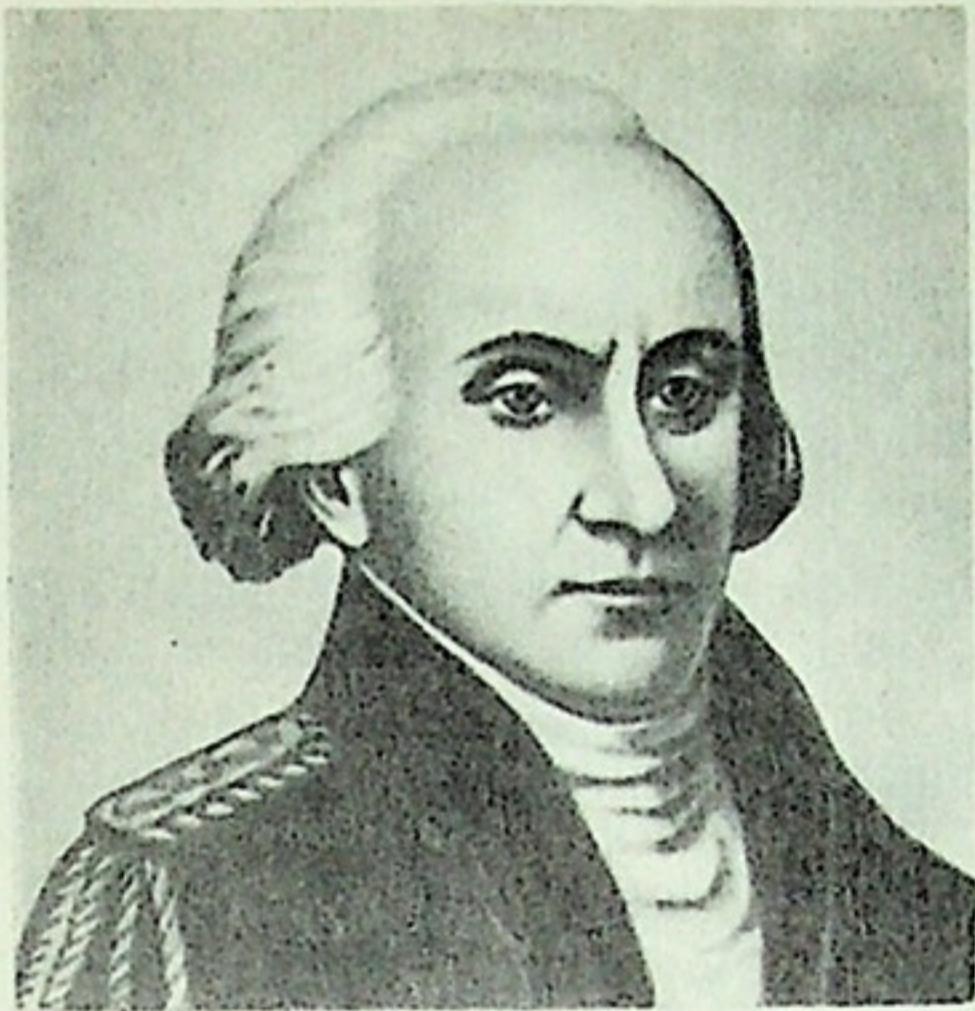
შევუდგეთ ელექტრომაგნიტურ ურთიერთქმედებათა რაოდენობრივი კანონების შესწავლას. ჯერ განვიხილოთ ყველაზე მარტივი შემთხვევა, როცა ელექტრულად დამუხტული სხეულები უძრავია. ელექტროდინამიკის ნაწილს, რომელიც უძრავ ელექტრულ მუხტებს სწავლობს, ელექტროსტატიკა ეწოდება. ელექტროსტატიკის ძირითადი კანონი, რომელიც ორი უძრავი წერტილოვანი დამუხტული სხეულის ან ნაწილაკის ურთიერთქმედებას ეხება, ექსპერიმენტულად დაადგინა ფრანგმა ფიზიკოსმა შ. კულონმა 1785 წ. ეს კანონი მის სახელს ატარებს<sup>1</sup>.

წერტილოვანი დამუხტული სხეულები არ არსებობს. მაგრამ თუ სხეულთა შორის არსებული მანძილი ბევრად მეტია მათ ზომებზე, მაშინ დამუხტულ სხეულთა არც ფორმა და არც ზომები არსებით გავლენას არ ახდენს მათ ურთიერთქმედებაზე. ამ შემთხვევაში სხეულები წერტილოვნად შეიძლება ჩაითვალოს. გავიხსენოთ, რომ მსოფლიო მიზიდულობის კანონიც წერტილოვანი სხეულებისთვის იქნა ჩამოყალიბებული<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> ეს კანონი პირველად დაადგინა ინგლისელმა მეცნიერმა ქავენდიშმა. მაგრამ თავისი შრომები არ გამოუქვეყნებია. დაახლოებით ასი წლის განმავლობაში მისი ხელნაწერები ინახებოდა ქავენდიშის ოჯახის არქივში, სანამ არ გადაეცა მაქსველს და აბეჭდად. ეს მოხდა მრავალი წლის შემდეგ, რაც კულონმა მუხტების ურთიერთქმედების კანონი დაადგინა.

<sup>2</sup> წერტილოვანი დამუხტული სხეულების ურთიერთქმედების კანონის ცოდნა საშუალებას გვაძლევს გამოვთვალოთ ნებისმიერ დამუხტულ სხეულთა ურთიერთქმედების ძალა. ამისათვის ჩვენს წარმოდგენაში სხეულები ისეთ მცირე ელემენტებად უნდა დავყოთ, რომ თითოეული მათგანი წერტილოვნად ჩაითვალოს. ამ

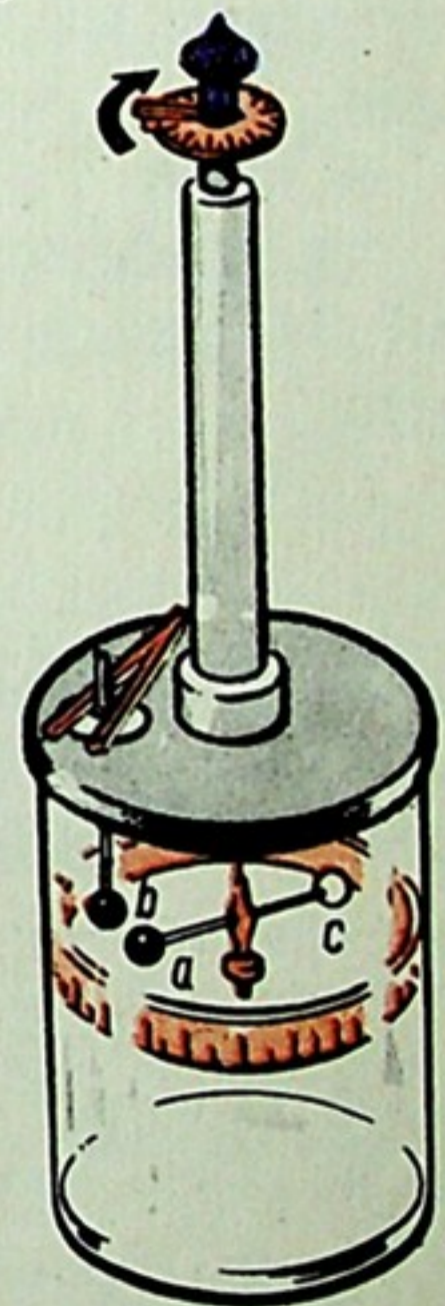




შარლ ავგუსტენ კულონი (1736—1806) ფრანგი მეცნიერია. ცნობილია შრომებით ელექტრობასა და მაგნიტიზმში. იგი იკვლევდა ხახუნის ძალებსაც. დამუხტულ სხეულთა ურთიერთქმედებასთან ერთად მან შეისწავლა გრძელი მაგნიტების პოლუსთა ურთიერთქმედება.

დამუხტულ სხეულთა ურთიერთქმედების ძალა დამოკიდებულია ამ სხეულებს შორის არსებულ გარემოს თვისებებზე. ჯერ ჩავთვალოთ, რომ ურთიერთქმედება ხდება ვაკუუმში, თუმცა, ცდა გვიჩვენებს, რომ ჰაერი უმნიშვნელოდ მოქმედებს ურთიერთქმედების ძალაზე. ეს ძალა თითქმის იგივეა, რაც ვაკუუმში.

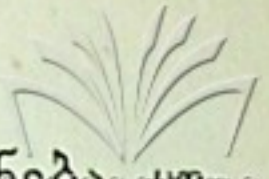
**კულონის ცდები.** ელექტრული მუხტების ურთიერთქმედების კანონის აღმოჩენა გააადვილა იმ გარემოებამ, რომ ეს ძალები დიდია. აქ საჭირო არ იყო განსაკუთრებით მგრძნობიარე აპარატურა, რაც აუცილებელი გახდა მსოფლიო მიზიდულობის კანონის შემოწმებისათვის ლაბორატორიულ პირობებში. გრეხითი სასწორის საშუალებით მოხერხდა იმის დადგენა, თუ როგორ ურთიერთქმედებენ უძრავი დამუხტული სხეულები. გრეხითი სასწორი შედგება მინის ღეროსაგან, რომელიც დაკიდებულია წვრილ დრეკად მავთულზე (სურ. 88). ღეროს ერთ ბოლოზე დამაგრებულია ლითონის პატარა *a* ბურთულა, მეორეზე კი — *C* სპირწონე. კიდევ ერთი ლითონის მცირე *b* ბურთულა უძრავადაა დამაგრებული სასწორის სახურავზე. როცა ბურთულებს მიანიჭებენ ერთსახელიან მუხტებს, ისინი ერთმანეთს განიზიდავენ. იმისათვის, რომ ბურთულები ფიქსირებულ მანძილზე შევა-



სურ. 88.

ელემენტების ურთიერთქმედებათა ძალების შეკრებით გავიგებთ სხეულთა ურთიერთქმედების ჯამურ ძალას.





კავით, საჭიროა დრეკადი მავთულის რაღაც კუთხით მობრუნება თხის მიხედვით განსაზღვრავენ ბურთულების ურთიერთქმედების ძალას. გრეხითი სასწორის საშუალებით შეისწავლეს დამუხტული ბურთულების ურთიერთქმედების ძალის დამოკიდებულება მუხტებზე და მათ შორის მანძილზე. იმ დროს ძალისა და მანძილის გაზომვა იცოდნენ. ერთადერთი სიძნელე დაკავშირებული იყო მუხტთან, რომლის გასაზომად ერთეულიც კი არ არსებობდა. კულონმა მიაგნო მარტივ ხერხს, რომლის მიხედვითაც ერთ-ერთი ბურთულას მუხტი იცვლებოდა 2-ჯერ, 4-ჯერ, და ა. შ. დამუხტულ ბურთულას აერთებდა ასეთივე უმუხტო ბურთულასთან. ამ დროს მუხტი ტოლად ნაწილდებოდა ბურთულებს შორის, რაც საკვლევ მუხტს ცნობილი თანათარღობით ამცირებდა. ძალის ახალი მნიშვნელობა ახალი მუხტების დროს ექსპერიმენტულად განისაზღვრებოდა.

**კულონის კანონი.** ცდების შედეგად კულონმა დაადგინა კანონი, რომელიც საოცრად მოგვაგონებს მსოფლიო მიზიდულობის კანონს. ვაკუუმში ორი წერტილოვანი უძრავი დამუხტული სხეულის ურთიერთქმედების ძალა პირდაპირპროპორციულია მუხტების მოდულთა ნამრავლისა და უკუპროპორციულია მათ შორის მანძილის კვადრატისა.

ამ ძალას კულონურ ძალას უწოდებენ.

თუ მუხტების მოდულებს  $|q_1|$ -ით და  $|q_2|$ -ით აღვნიშნავთ, მათ შორის მანძილს კი  $r$ -ით, კულონის კანონი შემდეგი სახით დაიწერება:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}, \quad (8.2)$$



სადაც  $k$  პროპორციულობის კოეფიციენტია.  $k$  რიცხობრივად ტოლია ერთეული მუხტების ურთიერთქმედების ძალისა, როცა მუხტებს შორის მანძილი სიგრძის ერთეულის ტოლია. მისი მნიშვნელობა დამოკიდებულია ერთეულთა სისტემის შერჩევაზე.

ასეთივე (8.2) სახე აქვს მსოფლიო მიზიდულობის კანონს: მუხტების ნაცვლად მის ფორმულაში შედის მასები,  $k$  კოეფიციენტის როლს კი გრავიტაციული მუდმივა ასრულებს.

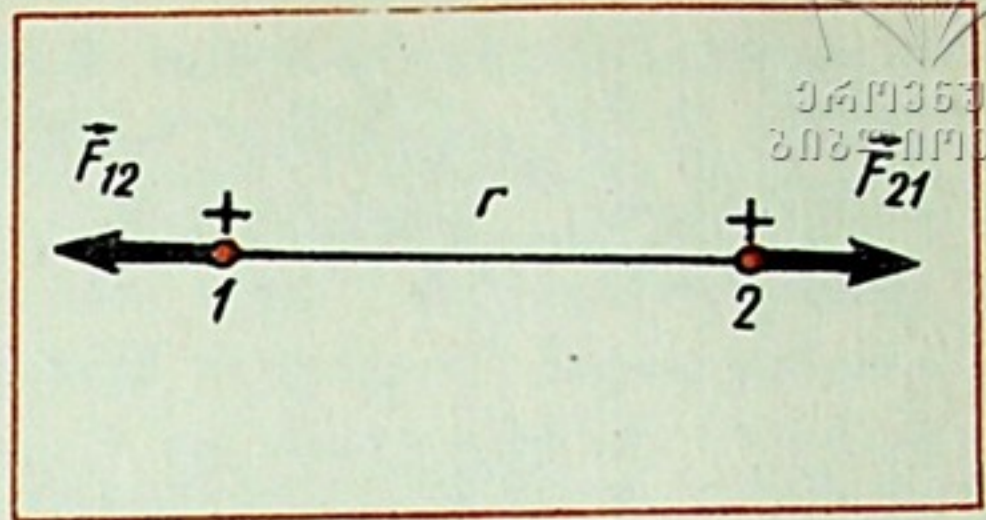
ადვილი შესამჩნევია, რომ ძაფებზე დაკიდებული ორი დამუხტული ბურთულა ან მიიზიდავს ან განიზიდავს ერთმანეთს. აქედან გამომდინარეობს, რომ ორი წერტილოვანი დამუხტული სხეულის ურთიერთქმედების ძალა მიმართულია ამ სხეულების შემაერთებელი წრფის გასწვრივ (სურ. 89). მსგავს ძალებს ცენტრული ძალები ეწოდება. ნიუტონის მესამე კანონის თანახმად,

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}.$$





კულონის კანონის აღმოჩენა პირველი კონკრეტული ნაბიჯია ელექტრული მუხტის თვისებათა შესასწავლად. სხეულებს ან ელემენტარულ ნაწილაკებს აქვს ელექტრული მუხტი — ეს ნიშნავს, რომ ისინი ურთიერთქმედებენ კულონის კანონის მიხედვით.



სურ. 89.

### 39. ელექტრული მუხტის ერთეული

ელექტრული მუხტის ერთეულის შერჩევა ისევე, როგორც სხვა ფიზიკური სიდიდეების ერთეულებისა, ნებისმიერად შეიძლება. საქმე აქ ამა თუ იმ შერჩევის მიზანშეწონილობას ეხება.

მუხტის გარდუვალი კარგვის გამო, შეუძლებელია შევქმნათ ელექტრული მუხტის ერთეულის მაკროსკოპული ეტალონი — მსგავსი სიგრძის ეტალონის — მეტრისა. ბუნებრივი იქნებოდა მუხტის ერთეულად მიეღოთ ელექტრონის მუხტი (ასეცაა ახლა ატომის ფიზიკაში). ელექტრონის მუხტი მეტისმეტად მცირეა და ამიტომ მუხტის ერთეულად მისი გამოყენება ყოველთვის როდი იქნება მოხერხებული.

მუხტის ერთეული — კულონი. ერთეულთა საერთაშორისო სისტემაში (SI) მუხტის ერთეული წარმოებულია და არა ძირითადი. ამიტომ მისთვის ეტალონი არ შემოაქვთ. მეტრის, წამისა და კილოგრამის გვერდით, ელექტრული სიდიდეების გასაზომად SI სისტემაში შემოაქვთ კიდევ ერთი ძირითადი ერთეული სახელდობრ, დენის ძალის ერთეული — ამპერი. ამპერის ეტალონური მნიშვნელობა დადგინდა დენების მაგნიტური ურთიერთქმედების საშუალებით. ამის შესახებ ნათქვამი იყო ფიზიკის VIII კლასის სახელმძღვანელოში.

SI სისტემაში მუხტის ერთეული კულონი დადგენილია დენის ძალის ერთეულის საშუალებით. 1 კულონი (კ) არის მუხტი, რომელიც ერთ წამში გადის გამტარის განივკვეთში 1 ამპერი დენის დროს.

თუ კულონის კანონს SI სისტემის ერთეულებით დავწერთ,  $k$  კოეფიციენტი ექნება დასახელება  $\frac{6 \cdot 10^9}{\text{კ}^2}$ . მართლაც, (8,2) ფორმულის თანახმად,

$$k = \frac{Fr^2}{|q_1| \cdot |q_2|}, \quad (8.3)$$



ძალა იზომება ნიუტონებით, მანძილი — მეტრებით, მუხტი — კულონებით. ამ კოეფიციენტის რიცხვითი მნიშვნელობა შეიძლება ექსპერიმენტულად განისაზღვროს, ამისათვის საკმარისია გავზომოთ ურთიერთქმედების ძალა ორ ცნობილ მუხტს შორის, რომლებიც ერთმანეთიდან მოცემული მანძილით არიან დაშორებული.  $F$ -ის მიღებულ მნიშვნელობას და  $r$ ,  $|q_1|$  და  $|q_2|$  სიდიდეების ცნობილ მნიშვნელობებს შევიტანთ (8.3) ფორმულაში, მივიღებთ  $k$ -ს შემდეგ მნიშვნელობას:

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{ნ} \cdot \text{მ}^2}{\text{კ}^2} \quad (8.4)$$

1 კ მუხტი ძალიან დიდია: ორი ასეთი მუხტი 1 კმ მანძილზე ერთმანეთთან ურთიერთქმედებს ძალით, რომელიც ოდნავ ნაკლებია ძალაზე, რომლითაც დედამიწა იზიდავს 1 ტ მასის სხეულს. ამიტომ შეუძლებელია მცირე ზომის სხეულს (რამდენიმე მეტრამდე) გადავცეთ 1 კ მუხტი. ერთმანეთის განზიდვის გამო დამუხტული ნაწილაკები ვერ შეჩერდება სხეულზე. ბუნებაში არ არსებობს სხვა ძალა, რომელსაც შეეძლო მოცემულ პირობებში გაეწონასწორობინა კულონური განზიდვა. მაგრამ 1 კ ელექტრობის ამოძრავება გამტარში, რომელიც მთლიანობაში ნეიტრალურია, დიდ სიძნელეს არ წარმოადგენს. მართლაც, 100 ვტ სიმძლავრის ჩვეულებრივ ელექტრონათურაში 127 ვ ძაბვისას გადის დენი, რომელიც ცოტათი ნაკლებია ერთ ამპერზე. ამ დროს ყოველ წამს გამტარის განივკვეთში გაივლის თითქმის 1 კ მუხტი.

ბუნებაში არსებული მინიმალური მუხტი ელემენტარულ ნაწილაკთა მუხტია. SI სისტემის ერთეულებში ამ მუხტის მოდული ტოლია:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ კ} \quad (8.5)$$

ელექტრული მუდმივა. მიღებულია  $k$  კოეფიციენტი SI სისტემაში ჩაიწეროს შემდეგი სახით:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (8.6)$$

$\epsilon_0$  სიდიდეს ( $\epsilon$  ბერძნული ასოა; იკითხება „ეპსილონ“) ელექტრული მუდმივა ეწოდება. ის ტოლია:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{კ}^2}{\text{ნ} \cdot \text{მ}^2} \quad (8.7)$$

შემდეგში ფორმულების ჩაწერის სიმარტივისათვის მათში თითქმის ყოველთვის დავტოვებთ  $k$  კოეფიციენტს და არ გამოვიყენებთ მის (8.6) გამოსახულებას.



- 7 1. რა მსგავსება და განსხვავებაა მსოფლიო მიზიდულობის კანონსა და კულონის კანონს შორის? 2. როგორ განისაზღვრება მუხტის ერთეული SI სისტემაში? 3. დაწერეთ კულონის კანონი. 4. რას უდრის  $k$  კოეფიციენტი კულონის კანონში? 5. რას უდრის ელექტრონის მუხტი?

### ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები

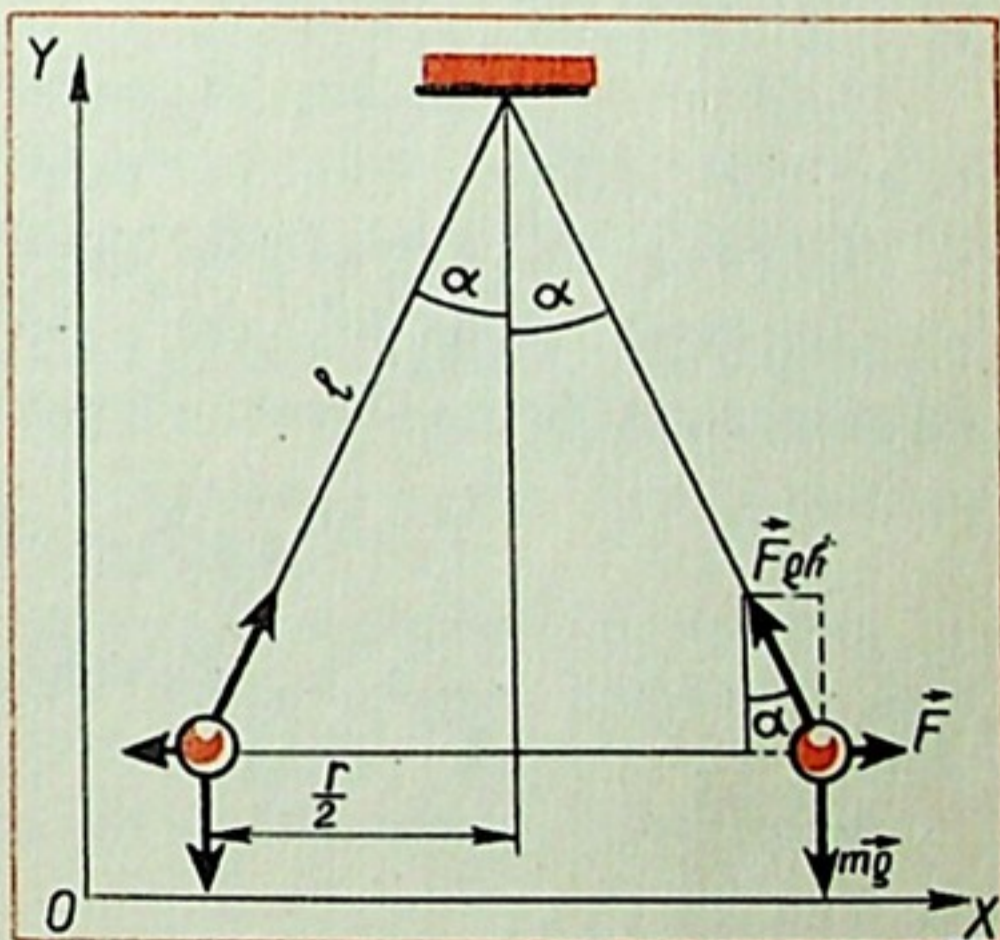
კულონის კანონის შესახებ ამოცანების ამოხსნისას იმავე ხერხებით ვსარგებლობთ, რომლებსაც ვიყენებდით სტატიკის ამოცანების ამოხსნისას IX კლასის მექანიკის კურსში. ოღონდ მხედველობაში უნდა მივიღოთ, რომ კულონური ძალის მიმართულება დასოკიდებულია ურთიერთქმედ სხეულთა მუხტების ნიშნებზე. გარდა ამისა, რიგ ამოცანებში ვიყენებთ მუხტის მუდმივობის კანონს და იმ ფაქტს, რომ ელექტრული მუხტის მინიმალური პორცია — ელემენტარული ნაწილაკის მუხტის მოდული ტოლია  $1,6 \cdot 10^{-19}$  კ-სა.

1. რამდენი ელექტრონია წყლის წვეთში, რომლის მასა  $m=0,08$  გ? წყლის მოლეკულის მასა  $m_0=3 \cdot 10^{-23}$  გ.

ამოხსნა. წყლის მოლეკულა  $H_2O$  10 ელექტრონს შეიცავს. წყლის წვეთში ამის  $\frac{m}{m_0} = 10^{21}$  მოლეკულა და, მაშასადამე,  $10^{22}$  ელექტრონი.

2. ორი ერთნაირი ბურთულა დაკიდებულია ერთ წერტილში მიმაგრებულ ძაფებზე, რომელთა სიგრძე  $l=2$  მ. როცა ბურთულებს გადასცეს ერთნაირი  $q=2 \cdot 10^{-8}$  კ სიდიდის მუხტები, ისინი ერთმანეთს დაშორდნენ  $r=18$  სმ მანძილით. გაიგეთ თითოეული ძაფის დაჭიმულობა.

ამოხსნა. თითოეულ ბურთულაზე მოქმედებს სამი ძალა:  $m\vec{g}$  სიმძიმის ძალა, ძაფის  $\vec{F}$  დრეკადობის ძალა და  $\vec{F}_{კულონური}$  ძალა (სურ. 90). ბურთულა უძრავია; მაშასადამე, ძალთა გეგმილების ჯამი  $Ox$  და  $Oy$  ღერძებზე ნულის ტოლია.  $Ox$  ღერძზე ძალთა გეგმილების ჯამისთვის ამ პირობას შემდეგი სახე აქვს  $F - F_{კულონური} \sin \alpha + mg \cos 90^\circ = 0$ .



სურ. 90.



რადგან

$$\sin \alpha = \frac{r}{2l} \text{ და } F = k \frac{q^2}{r^2}, \text{ ამიტომ } F_{\text{გრ}} = \frac{F}{\sin \alpha} = \frac{F \cdot 2l}{r} = k \frac{q^2 \cdot 2l}{r^3},$$

$$F_{\text{გრ}} \approx 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ ნ.}$$

ძაფი დაჭიმულია დაახლოებით  $3,5 \cdot 10^{-3}$  ნ ძალით.

8. პატარა დამუხტული სხეულები განლაგებულია ერთ წრფეზე.  $q_2 = 1,0 \cdot 10^{-8}$  კ მუხტის სხეული მოთავსებულია ორ დამუხტულ სხეულს შორის: ერთის მუხტი  $q_1 = -8,0 \cdot 10^{-8}$  კ (მისგან დაშორებულია  $r_{12} = 0,4$  მ-ით), მეორისა კი  $q_3 = 5,0 \cdot 10^{-8}$  კ (მისგან დაშორებულია  $r_{23} = 0,6$  მ მანძილით).

ვიპოვოთ თითოეულ სხეულზე მოდებულ კოლონურ ძალთა ტოლქმედი.

ამოხსნა. კულონის კანონის თანახმად, პირველი და მეორე სხეული ერთმანეთს იზიდავს ძალით:

$$F_{12} = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r_{12}^2}$$

მეორე და მესამე სხეული ერთმანეთს განიზიდავს ძალით, რომლის მოდული ტოლია:

$$F_{23} = k \frac{|q_2| \cdot |q_3|}{r_{23}^2}$$

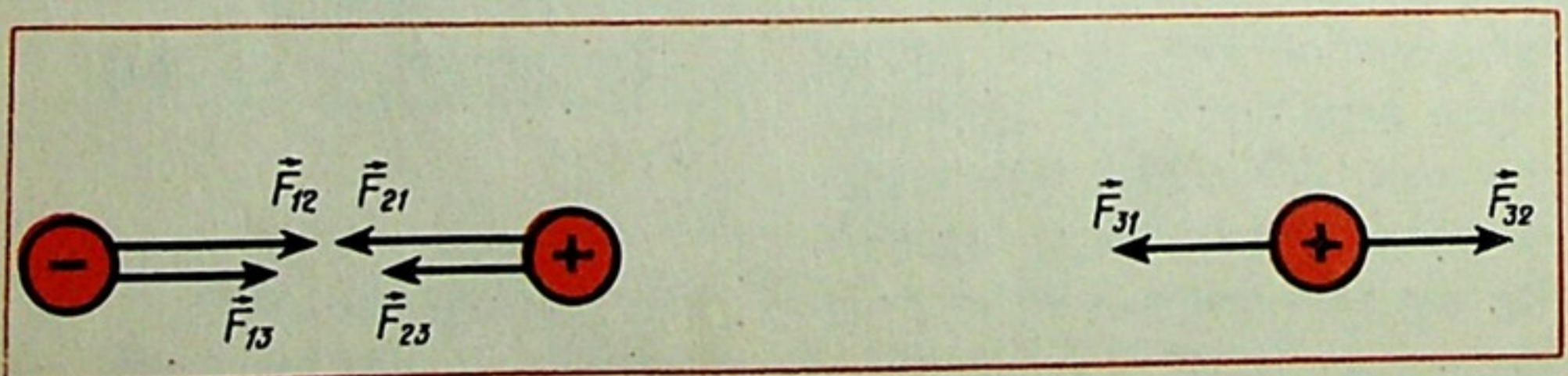
პირველი და მესამე სხეული ერთმანეთს იზიდავს ძალით, რომლის მოდული ტოლია

$$F_{31} = k \frac{|q_1| \cdot |q_3|}{(r_{12} + r_{23})^2}$$

განვიხილოთ კულონური ძალები, რომლებიც მოქმედებენ პირველ სხეულზე (სურ 91). ისინი მიმართულია ერთ მხარეს. მაშასადამე, ჯამური ძალა ტოლია მათი მოდულების ჯამისა:

$$F_1 = F_{12} + F_{13} = k|q_1| \left( \frac{|q_2|}{r_{12}^2} + \frac{|q_3|}{r_{13}^2} \right);$$

$$F_1 \approx 30 \cdot 10^{-6} \text{ ნ.}$$



სურ. 91.



მეორე სხეულზე მოდებული კულონური ძალები აგრეთვე ერთ მხარესაა მიმართული (სურ. 91), ამიტომ ჯამური ძალის მოდული ტოლია:

$$F_2 = F_{12} + F_{23} = k|q_2| \left( \frac{|q_1|}{r_{12}^2} + \frac{|q_3|}{r_{23}^2} \right); \quad F_2 \approx 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ ნ.}$$

მესამე სხეულზე მოდებული ძალები საპირისპიროდაა მიმართული (სურ. 97). პირველი სხეულის მხრივ  $F_{31}$  მიზიდვის ძალა მეტია მეორე სხეულის მხრივ  $F_{32}$  განზიდვის ძალაზე. ტოლქმედის მოდული ტოლია ძალთა სხვაობისა. ტოლქმედი ძალა მიმართულია დიდი ძალის მხარეს:

$$F_3 = F_{13} - F_{23} = k|q_3| \left[ \frac{|q_1|}{(r_{12} + r_{23})^2} - \frac{|q_2|}{r_{23}^2} \right] \approx 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ ნ.}$$

### ს ა ვ ა რ ჯ ი შ ო 8

1. ცნობილია, რომ აბრეშუმზე გახახუნებული მინის ჯოხი დადებითად იმუხტება. ცდით განსაზღვრეთ შალზე გახახუნებული პლასტმასის ღეროს მუხტის ნიშანი?

2. სხეულთა დაელექტროება, თუმცა უმნიშვნელო, ხდება სხეულთა მჭიდრო შეხებისას ხახუნის გარეშე. ნიშნავს თუ არა ეს, რომ შეიძლება მივიღოთ ორი დამუხტული სხეული მუშაობის შესრულების გარეშე?

3. გაიგეთ ელექტრონისა და ბირთვის ურთიერთქმედების ძალა წყალბადის ატომში, თუ მათ შორის მანძილია  $0,5 \cdot 10^{-8}$  სმ.

4. რამდენჯერ მეტია წყალბადის ატომში ელექტრონისა და ბირთვის ურთიერთქმედების კულონური ძალა მათი გრავიტაციული ურთიერთქმედების ძალაზე? ელექტრონის მასა  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  კგ, პროტონის მასა კი  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  კგ. გრავიტაციული მუდმივა  $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  ნ. მ<sup>2</sup>/კგ<sup>2</sup>.

5. რა ძალით იმოქმედებს ერთმანეთზე 1 კმ-ით დაშორებული წყლის ორი წვეთი, თუ ერთ-ერთ მათგანს გადავცემთ  $m = 0,03$  გ მასის მეორე წვეთის ელექტრონების 1%-ს?

6. ორი ერთნაირი ბურთულა ერთმანეთიდან დაშორებულია 40 სმ-ით. ერთის მუხტია  $9 \cdot 10^{-9}$  კ, მეორისა —  $2 \cdot 10^{-9}$  კ. ბურთულები ერთმანეთს შეახეს და შემდეგ დააშორეს იმავე მანძილით. ვიპოვოთ მათი ურთიერთქმედების ძალა შეხებამდე და შეხების შემდეგ.

7.  $1,0 \cdot 10^{-8}$  და  $2,0 \cdot 10^{-8}$  კ წერტილოვანი მუხტები დამაგრებულია ვაკუუმში 1 მ-ის დაშორებით. მუხტების შემაერთებელი წრფის შუა წერტილში მოთავსებულია პატარა სხეული, რომელსაც აქვს —  $3 \cdot 10^{-9}$  კ მუხტი. განსაზღვრეთ სხეულზე მოქმედი ძალის მოდული და მიმართულება.

### 40. ახლოქმედება და მანძილზე ქმედება.

**ახლოქმედება.** უძრავი ელექტრული მუხტების ურთიერთქმედების კანონი დადგენილი იყო ექსპერიმენტულად. მაგრამ გადაუჭრელი რჩებოდა საკითხი იმის შესახებ, თუ როგორ ხორციელდება ეს ურთიერთქმედება.



თუ ვაკვირდებით ერთი სხეულის მოქმედებას მეორეზე, რომელიც პირველიდან განსაზღვრულ მანძილზეა მოთავსებული, მაშინ სანამ დავუშვებდეთ, რომ ეს მოქმედება პირდაპირი და უშუალოა, ვცდილობთ გავარკვიოთ, ხომ არ არის სხეულებს შორის რაიმე მატერიალური კავშირი: ძაფები, ღეროები და სხვ. თუ მსგავსი კავშირი არის, მაშინ ერთი სხეულის მოქმედებას მეორეზე ვხსნით ამ უშუალოდური რგოლების მეშვეობით. მაგალითად, როცა ძველებური ავტობუსის მძღოლი კარის გასაღებ სახელურს აბრუნებს, შემაერთებელი ღეროს თანმიმდევრული უბნები იკუმშება, შემდეგ ამოძრავდება, სანამ კარი არ გაიღება. თანამედროვე ავტობუსებში მძღოლი კარს აღებს სულ სხვანაირად: მიღებით ის შეკუმშულ ჰაერს უშვებს ცილინდრში, რომელიც კარის მექანიზმს მართავს. ძნელი არაა აგრეთვე ამ მიზნით მოეწყოს წრედში ჩართული ელექტრომაგნიტი.

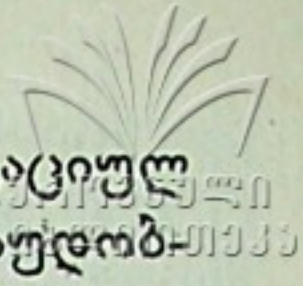
კარის გაღების სამივე ხერხში არის ერთი რამ საერთო: მძღოლსა და კარს შორის არის უწყვეტი შემაერთებელი ხაზი, რომლის თითოეულ წერტილში სრულდება გარკვეული ფიზიკური პროცესი. ამ პროცესის საშუალებით, რომელიც წერტილიდან წერტილამდე ვრცელდება, მოქმედება გადაეცემა, ამასთან არა მეყსეულად, არამედ ამა თუ იმ სიჩქარით.

ამრიგად, სხეულებს შორის მანძილზე მოქმედება ხშირ შემთხვევაში შეიძლება ავხსნათ მოქმედების გადამცემი უშუალოდური რგოლების არსებობით. გონივრული ხომ არ იქნებოდა, რომ იმ შემთხვევებშიც, როცა ვერავითარ გარემოს და უშუამავალს ვერ ვხედავთ ურთიერთქმედ სხეულებს შორის, დავუშვათ რაღაც უშუალოდური რგოლების არსებობა? წინააღმდეგ შემთხვევაში უნდა ჩავთვალოთ, რომ სხეული მოქმედებს იქ, სადაც ის არ არის.

ვინც არ იცნობს ჰაერის თვისებებს, მას შეუძლია იფიქროს, რომ მოსაუბრის პირი თუ ხმის იოგები უშუალოდ მოქმედებს მის ყურზე და უხილავი გარემოთი ბგერის გადაცემა ჩათვალოს რაღაც სრულ გაუგებრობად. მაგრამ შეგვიძლია საფუძვლიანად დავაკვირდეთ ბგერითი ტალღების გავრცელების მთელ პროცესს და გამოვთვალოთ მათი სიჩქარე.

ვარაუდო იმის შესახებ, რომ ერთმანეთის აგან დაშორებულ სხეულებს შორის ურთიერთქმედება ყოველთვის ხორციელდება უშუალოდური რგოლების (ანუ გარემოს) მეშვეობით, რომელიც ურთიერთქმედებას გადასცემს წერტილიდან წერტილამდე, ახლოქმედების თეორიის არსს შეადგენს.

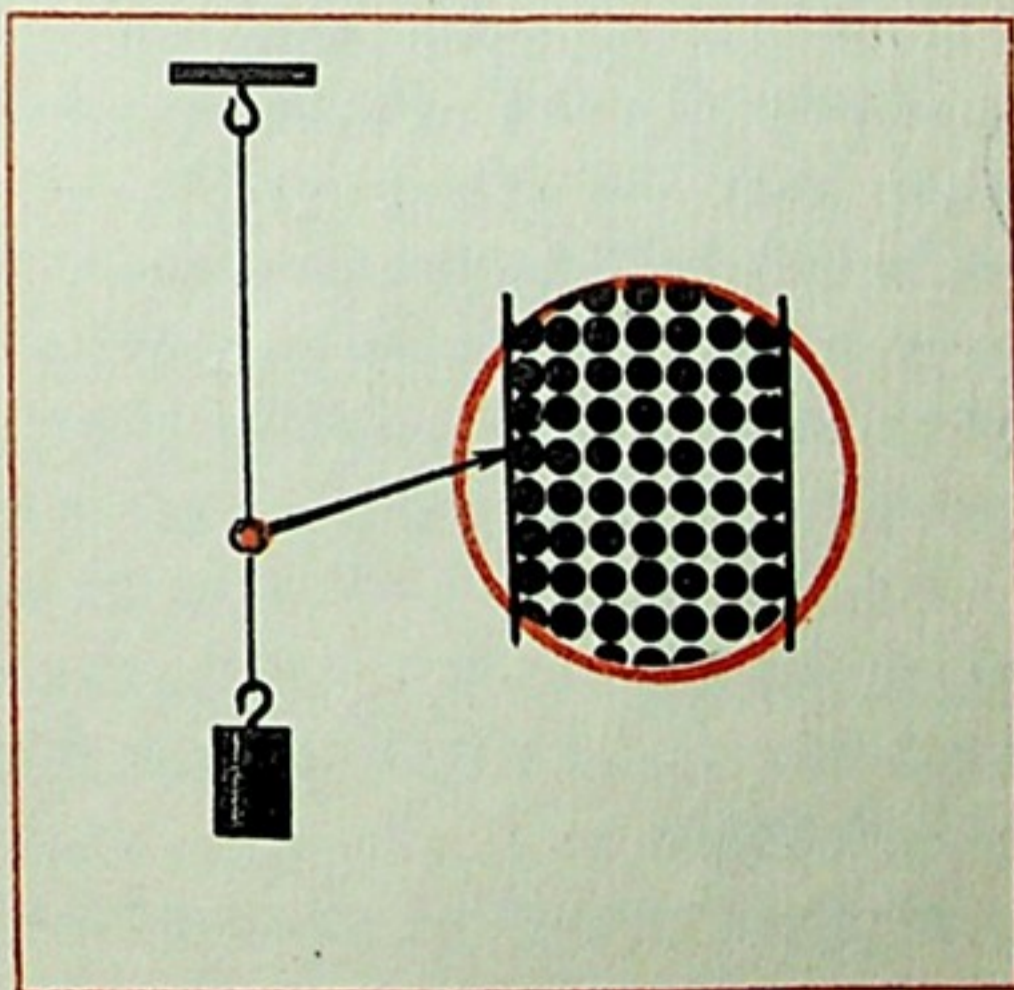




ახლოქმედების თეორიის მომხრე ბევრი მეცნიერი გრავიტაციულ და ელექტრომაგნიტურ ძალთა წარმოშობის ასახსნელად ვარაუდობდა, რომ არსებობს პლანეტებისა და მაგნიტების გარემომცველი უხილავი დინებანი და უხილავი ატმოსფერო დამუხტულ სხეულთა ირგვლივ. ეს ფიქრები ზოგჯერ ფრიად გონებამახვილური იყო, მაგრამ არაფერს აძლევდნენ მეცნიერებას.

**მანძილზე ქმედება.** ასე გრძელდებოდა მანამ, სანამ ნიუტონმა არ დაადგინა მსოფლიო მიზიდულობის კანონი, რომლის მოქმედების ასახსნელად მას არავითარი მოსაზრება არ გამოუთქვამს. აქედან გამომდინარე მიღწევებმა მზის სისტემის კვლევაში იმდენად გაიტაცა ბევრი მეცნიერი, რომ მათ სრულიად აღარ ჩათვალეს საჭიროდ ეძებნათ ერთი სხეულიდან მეორეზე ურთიერთქმედების გადაძვნილი რაიმე შუამავალი.

შეიქმნა თეორია იმის შესახებ, რომ მანძილზე ხდება პირდაპირი ქმედება უშუალოდ სივარცელში. ამ თეორიის თანახმად, ქმედება მეყსეულად გადაეცემა ნებისმიერ დიდ მანძილებზე. სხეულებს აქვს უნარი „იგრძნონ“ ერთმანეთი მათ შორის არსებული სხვა გარემოს გარეშე. მის მომხრეებს არ აშფოთებდა აზრი იმის შესახებ, რომ სხეული მოქმედებს იქ, სადაც თვითონ არ არის. ისინი ამბობდნენ: „განა ჩვენ არ ვხედავთ, თუ როგორ იზიდავს სივარცელში სხეულებს მაგნიტი ან დაელექტროებული ჯოხი? და ამავე დროს მიზიდვის ძალა, მაგალითად, მაგნიტისა, შესამჩნევად არ იცვლება, როცა მაგნიტს ქაღალდში შევახვევთ ან ჩავდებთ ხის ყუთში. უფრო მეტიც, მაშინაც კი, როცა ჩვენ იგვეჩვენება, რომ ურთიერთქმედება გამოწვეულია უშუალო შეხებით, სინამდვილეში ასე არ არის. თვით მჭიდრო კონტაქტის დროსაც სხეულებს ან ერთი სხეულის ნაწილებს შორის რჩება მცირე უშუალო. მაგალითად, ხომ არ წყვეტს ძაფს მასზე დაკიდებული ტვირთი, მიუხედავად იმისა, რომ ძაფის შემადგენელ ატომებს შორის სივარცელა (სურ. 92). მანძილზე ქმედება ერთადერთი ხერხია მოქმედებისა, რომელიც ყველგან გვხვდება.



სურ. 92.

მოსაზრებანი ახლოქმედების თეორიის წინააღმდეგ საკ-



მაოდ ძლიერი იყო. მითუმეტეს რომ მათ განამტკიცებდა მიღწევები მანძილზე ქმედების ურყევი მომხრეებისა — კულონისა და ამპერის, რომლებმაც აღმოაჩინეს ელექტრული მუხტებისა და ელექტრული დენების ურთიერთქმედების კანონები.

მეცნიერების განვითარება რომ წრფივად ხდებოდეს, მაშინ ალბათ მანძილზე ქმედების თეორიის გამარჯვება უზრუნველყოფილი იქნებოდა. მაგრამ სინამდვილეში მეცნიერების განვითარება უფრო ხრახნწირს მოგვაგონებს. ერთი ხვეულას გავლის შემდეგ მეცნიერება კვლავ უზრუნდება იმავე წარმოდგენებს, მაგრამ უკვე უფრო მაღალ დონეზე. სწორედ ასე მოხდა მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის განვითარებისას. დემოკრიტეს ატომური ჰიპოთეზა ერთ დროს უკუაგდო მეცნიერთა უმრავლესობამ. შემდეგ ის განახლდა მკაცრი მათემატიკური ფორმით და დამტკიცდა ექსპერიმენტულად. იგივე მოხდა ახლოქმედების თეორიის განვითარებაშიც.

ელექტრული მუხტებისა და დენების ურთიერთქმედების კანონთა აღმოჩენაში მიღწევები სრულიადაც არ იყო განუყრელად დაკავშირებული მანძილზე ქმედების წარმოდგენებთან. მართლაც, თვით ძალთა ცდისეული კვლევა არ გულისხმობს განსაზღვრულ წარმოდგენებს იმის შესახებ, თუ როგორ გადაეცემა ეს ძალები. პირველ რიგში საჭირო იყო ძალთა მათემატიკური გამოსახულების მონახვა. მათი ბუნების გარკვევა კი შემდეგაც შეიძლებოდა.

## 41. ელექტრული ველი

**ფარადეის იდეები.** გადამწყვეტი შემობრუნება ახლოქმედების წარმოდგენებისაკენ დაიწყო დიდმა ინგლისელმა მეცნიერმა მაიკლ ფარადეიმ, საბოლოოდ კი დაასრულა მაქსველმა.

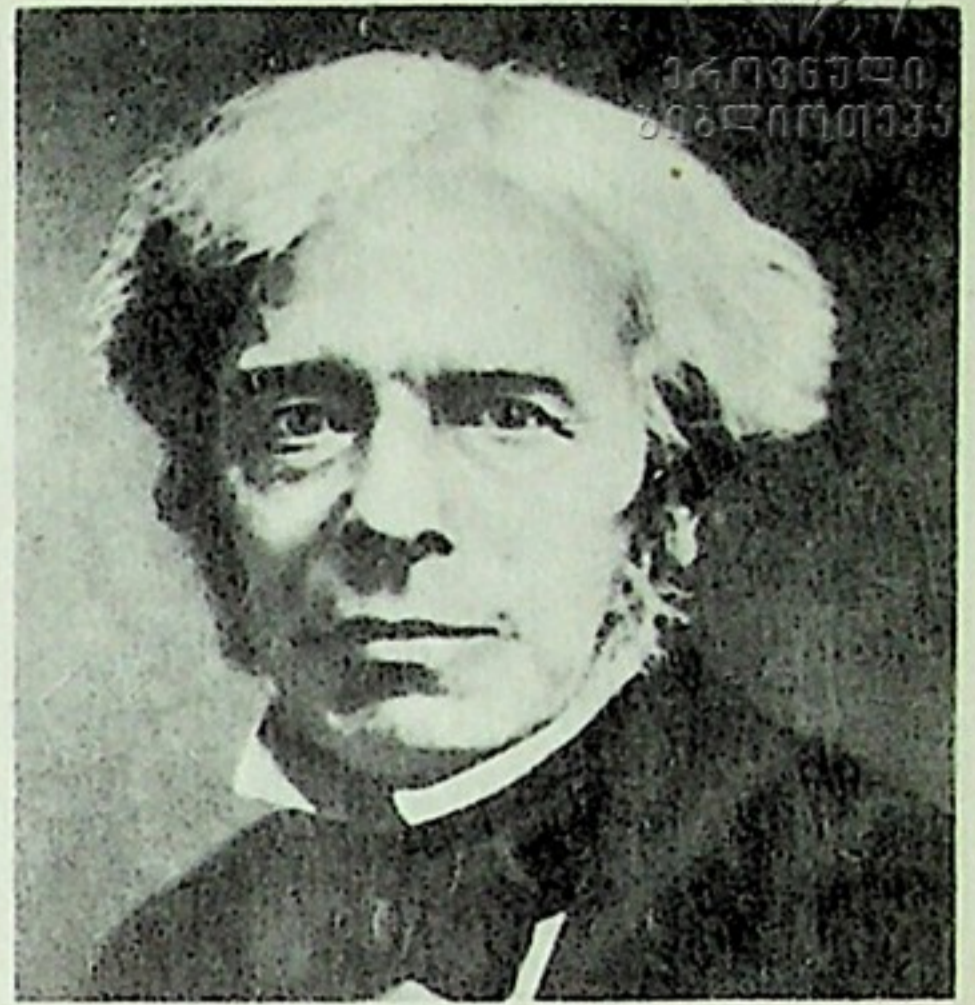
მანძილზე ქმედების თეორიის მიხედვით ერთი მუხტი უშუალოდ „გრძნობს“ მეორის არსებობას. ერთ-ერთი მუხტის (A) გადაადგილებისას (სურ. 93) მეორე მუხტზე (B) მოქმედი ძალა მეყსეულად იცვლის თავის მნიშვნელობას. ამასთან არც B მუხტი და არც გარემომცველი სივრცე არავითარ ცვლილებას არ განიცდის.

ფარადეის იდეის თანახმად, ელექტრული მუხტები უშუალოდ არ მოქმედებენ ერთმანეთზე. თითოეული მათგანი გარემომცველ სივრცეში ქმნის ელექტრულ ველს. ერთი მუხტის ველი მოქმედებს მეორეზე და პირიქით. მუხტიდან დაშორების მიხედვით ველი სუსტდება.

თავდაპირველად ეს იდეა გამოხატავდა მხოლოდ ფარადეის რწმენას, რომ ერთი სხეულის მოქმედება მეორეზე შეუძლებელია სიცარი-

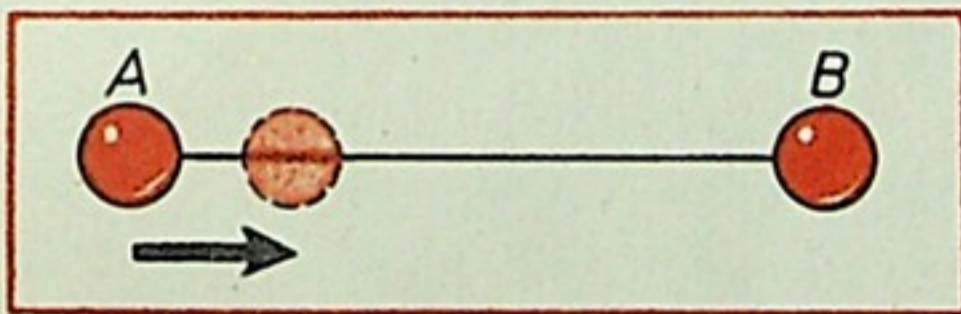


მაიკლ ფარადეი (1791—1867) დიდი ინგლისელი მეცნიერია. მან შექმნა ელექტრომაგნიტური მოვლენების ზოგადი თეორია, რომლის მიხედვითაც ყველა ეს მოვლენა ერთიანი თვალსაზრისით განიხილება. ფარადეიმ პირველმა შემუშავა წარმოდგენა ელექტრული და მაგნიტური ველების შესახებ, „სადაც მათემატიკოსები მანძილზე მოქმედ ძალთა ძაბვის ცენტრებს ხედავდნენ, ფარადეიმ შუალედური „აგენტი“ დაინახა, სადაც ისინი არაფერს ხედავდნენ, გარდა მანძილისა და კმაყოფილდებოდნენ იმით, რომ პოულობდნენ ელექტრულ ფლიუიდებზე (ე. ი. მუხტებზე თანამედროვე გაგებით) მოქმედ ძალთა განაწილების კანონს, ფარადეი ეძებდა გარემოში მიმდინარე რეალური მოვლენების არსს“ (ჯ. მაქსველი.)



ელის მეშვეობით. ველის არსებობას ის ვერ ამტკიცებდა ამას ვერც დაამტკიცებდა მართო უძრავი მუხტების ურთიერთქმედების გამოკვლევით. წარმატება ახლოქმედების თეორიაში მოჰყვა მოძრავი მუხტების ელექტრომაგნიტურ ურთიერთქმედებათა შესწავლას. ჯერ დამტკიცდა დროით ცვლადი ველების არსებობა, მხოლოდ ამის შემდეგ დაასკვნეს, რომ უძრავი მუხტის ელექტრული ველი ნამდვილად არსებობს.

ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედების გავრცელების სიჩქარე ფარადეის იდეების საფუძველზე მაქსველმა თეორიულად დაამტკიცა, რომ ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედებანი სივრცეში სასრული სიჩქარით ვრცელდება.



ეს ნიშნავს, რომ, თუ ოდნავ გადავაადგილებთ  $A$  მუხტს (სურ. 93),  $B$  მუხტზე მოქმედი ძალა შეიცვლება, მაგრამ არა მეყსეულად, არამედ  $t$  დროის შემდეგ:

$$t = |AB|/c, \tag{8. 8}$$

სადაც  $AB$  მუხტებს შორის მანძილია,  $c$  კი — ელექტრომაგნიტურ ურთიერთქმედებათა გავრცელების სიჩქარე. მაქსველმა გამოარკვია, რომ ის ტოლია სინათლის სიჩქარისა ვაკუუმში, ე. ი. 300 000 კმ/წმ-სა.  $A$  მუხტის გადაადგილებისას  $B$  მუხტის გარშემო ელექტრული ველი შეიცვლება  $t$  დროის შემდეგ.

სურ. 93.



ეს ნიშნავს, რომ მუხტებს შორის ვაკუუმში მიმდინარეობს რა-  
ღაც პროცესი, რომლის შედეგადაც ურთიერთქმედება მათ შორის  
სასრული სიჩქარით ვრცელდება.

მთავარი, რაც ახლოქმედების თეორიას ასხ-  
ვავებს მანძილზე ქმედების თეორიისაგან, შემ-  
დეგია: ურთიერთქმედ სხეულებს შორის სივრ-  
ცეში არსებობს განსაზღვრული პროცესი, რომ-  
ელიც სასრულ დროში მომდინარეობს. ყველა სხვა  
არგუმენტი ამა თუ იმ თეორიის სასარგებლოდ გადამწყვეტი არაა.  
მართალია (8.8) ტოლობის შესამოწმებელი ექსპერიმენტი მუხტების  
გადაადგილებისას ძნელი ჩასატარებელია  $c$  სიჩქარის დიდი რიცხვი-  
თი მნიშვნელობის გამო, მაგრამ რადიოს გამოგონების შემდეგ ეს  
ალარცაა საჭირო.

**რადიოტალღები.** ელექტრომაგნიტური ტალღების საშუალებით  
ინფორმაციის გადაცემას რადიოკავშირი ეწოდება. ამჟამად შეგვიძ-  
ლია უბრალოდ წავიკითხოთ გაზეთში, რომ კოსმოსური სადგურიდან,  
რომელიც ვენერას უახლოვდება, დედამიწაზე მოსვლას რადიოტალ-  
ღები ოთხ წუთზე ცოტა მეტ დროს ანდომებს. სადგური შეიძლება  
დაიწვას პლანეტის ატმოსფეროში, მაგრამ მის მიერ გამოგზავნილი  
რადიოტალღები კიდევ დიდხანს „იხეტიალებს“ სივრცეში, ამრიგად,  
ელექტრომაგნიტური ველი ისევე მუდავნდება, როგორც ყოველი რე-  
ალურად არსებული რამ.

**რა არის ელექტრული ველი?** ვიცით, რომ ელექტრული ველი  
რეალურად არსებობს. შეგვიძლია მისი თვისებები ცდით გამოვიკვ-  
ლიოთ, მაგრამ არ შეგვიძლია ვთქვათ, თუ რისგან შედგება ველი.  
ველის შესახებ მეცნიერებაში ჭერჭერობით მეტი არაფერია ცნო-  
ბილი.

სახლი შედგება აგურებისაგან, ფილებისაგან და ა. შ. ესენი თავის  
მხრივ მოლეკულებისაგან, მოლეკულა—ატომებისაგან, ატომი — ელე-  
მენტარული ნაწილაკებისაგან. ელემენტარულ ნაწილაკებზე უფრო  
მარტივი წარმონაქმნები კი არ ვიცით (ყოველ შემთხვევაში დღეს),  
ამიტომ ელექტრული ველის ბუნებაზე შეიძლება ვთქვათ მხოლოდ  
შემდეგი:

ჯერ ერთი, ველი მატერიალურია: ის არსებობს ჩვენგან დამოუკი-  
დებლად, მის შესახებ ჩვენი ცოდნისაგან დამოუკიდებლად.

მეორეც, მას აქვს განსაზღვრული თვისებები, რომლებიც გვეხმა-  
რება არ ავურიოთ იგი სხვა რამეში. სწორედ ამ თვისებათა საფუძ-  
ველზე ყალიბდება ჩვენი წარმოდგენა იმაზე, თუ რა არის ელექტრუ-  
ლი ველი.

ელექტრული ველის შესწავლის დროს ვხვდებით მატერიის გან-





საკუთრებულ სახეს, რომლის მოძრაობა ნიუტონისეულ მექანიკის კანონებს არ ემორჩილება. ელექტრული ველის აღმოჩენის შემდეგ მეცნიერების მთელ ისტორიაში პირველად დაიბადა შემდეგი ღრმა იდეა: არსებობს მატერიის სხვადასხვა სახე და თითოეულ მათგანს თავისი კანონები ახასიათებს.



**ელექტრული ველის ძირითადი თვისებები.** ელექტრული ველის მთავარი თვისებაა იმოქმედოს ელექტრულ მუხტებზე რაღაც ძალით. მუხტზე მოქმედების მიხედვით ადგენენ ველის არსებობას, მის განაწილებას სივრცეში, სწავლობენ მის მახასიათებლებს.

უძრავი მუხტების ელექტრულ ველს ელექტროსტატიკური ეწოდება. ის არ იცვლება დროის მიხედვით. ელექტროსტატიკურ ველს ქმნის მხოლოდ ელექტრული მუხტები. ის არსებობს სივრცეში, რომელიც გარს არტყია მუხტს და განუყრელადაა მასთან დაკავშირებული.

ელექტროდინამიკის შესწავლის დროს გავეცნობით ველის ახალ თვისებებს. გავეცნობით დროის მიხედვით ცვლად ელექტრულ ველსაც, რომელიც უკვე აღარაა მუხტებთან განუყრელად დაკავშირებული. სტატიკური და ცვლადი ველების ბევრი თვისება ერთნაირია, მაგრამ მათ შორის არსებითი განსხვავებაცაა. როცა ვლაპარაკობთ ველის თვისებებზე, მას ვუწოდებთ უბრალოდ ელექტრულს, თუ მოცემული თვისება თანაბრად შეეხება როგორც სტატიკურს, ისე ცვლად ველს.

**42. ელექტრული ველის დაძაბულობა. ველის სუპერპოზიციის პრინციპი**

**ელექტრული ველის დაძაბულობა.** ელექტრული ველი მუდამდება მუხტზე მოქმედი ძალის საშუალებით. შეიძლება ვთქვათ, რომ ველის შესახებ ვიცით ყველაფერი, რაც საჭიროა, თუ გვეცოდინება ძალა, რომელიც ამა თუ იმ წერტილში მოთავსებულ ნებისმიერ მუხტზე მოქმედებს.

ამიტომ საჭიროა შემოვიღოთ ველის ისეთი მახასიათებელი, რომლის ცოდნითაც შევძლებთ განვსაზღვროთ ეს ძალა.

თუ ველის ერთსა და იმავე წერტილში მორიგეობით შევიტანთ დამუხტულ პატარა სხეულებს და ძალებს გავზომავთ, გამოირკვევა, რომ ველის მხრივ მუხტზე მოქმედი ძალა ამ მუხტის პროპორციულია. მართლაც, ვთქვათ, ველი იქმნება  $q_1$  წერტილოვანი მუხტით. კულონის კანონის (8.9) თანახმად,  $q_2$  მუხტზე მოქმედებს ძალა, რომ-





მელიც პროპორციულია  $q_2$  მუხტისა. ამიტომ ველის მთავარი წერტილში მოთავსებულ მუხტზე მოქმედი ძალის შეფარდება ამ მუხტის სიდიდესთან დამოკიდებული არ არის მუხტის სიდიდეზე და შეიძლება მივიჩნიოთ ველის მახასიათებლად. ამ მახასიათებელს ელექტრული ველის დაძაბულობა ეწოდება. ძალის მსგავსად, ველის დაძაბულობა ვექტორული სიდიდეა. ის აღინიშნება  $E$  ასოთი. თუ ველში მოთავსებულ მუხტს  $q_2$ -ის ნაცვლად  $q$ -თი აღვნიშნავთ, მაშინ განსაზღვრის თანახმად, დაძაბულობა ტოლია:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (8.9)$$

ველის დაძაბულობა ტოლია წერტილოვან მუხტზე ველის მხრივ მოქმედი ძალის შეფარდებისა ამ მუხტთან.

აქედან ელექტრული ველის მხრივ  $q$  მუხტზე მოქმედი ძალა ტოლია:

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (8.10)$$

$\vec{E}$  ვექტორის მიმართულება ემთხვევა დადებით მუხტზე მოქმედი ძალის მიმართულებას და საპირისპიროა უარყოფით მუხტზე მოქმედი ძალის მიმართულებისა.

(8.9) ფორმულის თანახმად, ველის დაძაბულობა SI სისტემის ერთეულებში გამოისახება ნიუტონებით კულონზე (ნ/კ).

**წერტილოვანი მუხტის ველის დაძაბულობა.** ვიპოვოთ  $q_0$  წერტილოვანი მუხტის მიერ შექმნილი ელექტრული ველის დაძაბულობა. კულონის კანონის თანახმად, ეს მუხტი მეორე  $q$  მუხტზე იმოქმედებს ძალით, რომელიც ტოლია:

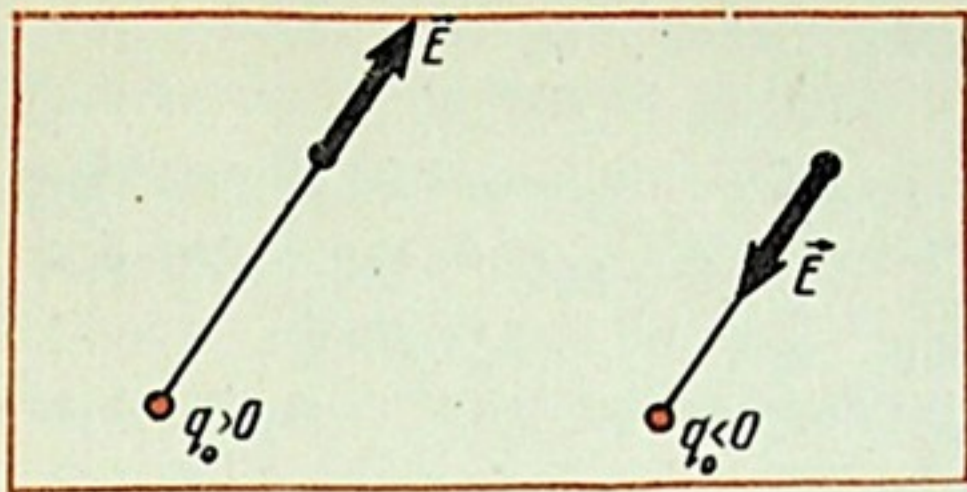
$$F = k \frac{|q| \cdot |q_0|}{r^2}$$

$q_0$  წერტილოვანი მუხტის ველის დაძაბულობის მოდული მისგან  $r$  მანძილზე ტოლია:

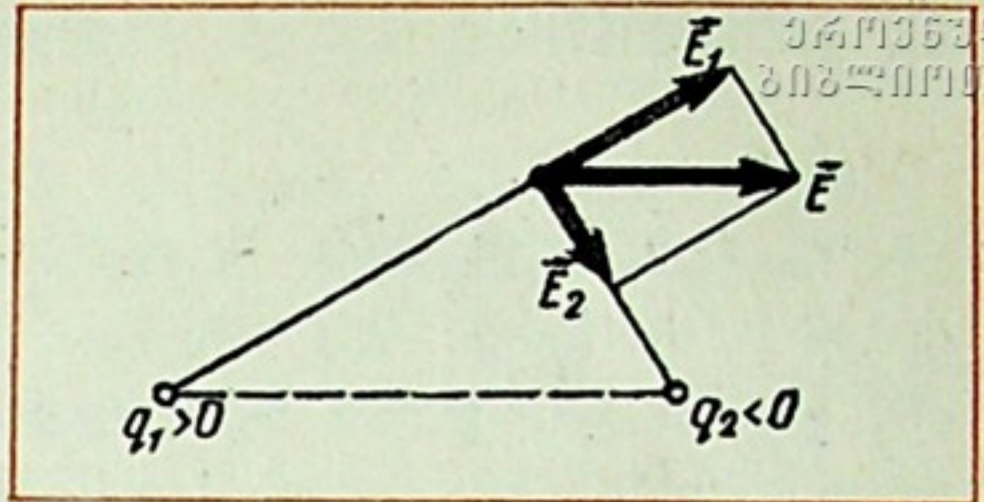
$$F = \frac{E}{|q|} = k \frac{|q_0|}{r^2} \quad ; \quad E = \frac{F}{q} = k \frac{q_0}{r^2} \quad (8.11)$$

ელექტრული ველის ნებისმიერ წერტილში დაძაბულობის ვექტორი მიმართულია წერტილისა და მუხტის შემაერთებელი წრფის გასწვრივ მუხტიდან, თუ  $q_0 > 0$ , და მუხტისაკენ თუ  $q_0 < 0$  (სურ. 94).





სურ. 94.



სურ. 95.

ველების სუპერპოზიციის პრინციპი<sup>1</sup> თუ სხეულზე რამდენიმე ძალა მოქმედებს, მაშინ, მექანიკის კანონების მიხედვით, ტოლქმედი უდრის ძალთა გეომეტრიულ ჯამს:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots$$

ელექტრულ მუხტებზე ძალები მოქმედებს ელექტრული ველის მხრივ. თუ რამდენიმე მუხტის ველთა ზედდებისას ეს ველები გავლენას არ ახდენს ერთმანეთზე, ყველა ელექტრული ველის ჯამური ძალა ტოლი უნდა იყოს იმ ძალთა გეომეტრიული ჯამისა, რომლითაც ცალკეული ველები მოქმედებს მუხტზე. ასეც არის სინამდვილეში. ეს ნიშნავს, რომ ველთა დაძაბულობები გეომეტრიულად იკრიბება.

ეს არის ველების სუპერპოზიციის პრინციპი<sup>1</sup>. სუპერპოზიციის პრინციპი ასე ყალიბდება: თუ სივრცის მოცემულ წერტილში დამუხტული ნაწილაკები ქმნიან ელექტრულ ველებს, რომელთა დაძაბულობებია  $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3$  და ა. შ., მაშინ ველის ჯამური დაძაბულობა ამ წერტილში ტოლია:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots \quad (8.12)$$

სუპერპოზიციის პრინციპის მეშვეობით, დამუხტულ ნაწილაკთა სისტემის ველის დაძაბულობის გასაგებად საკმარისია ვიცოდეთ (8.11) გამოსახულება წერტილოვანი მუხტის ველის დაძაბულობისათვის, 95-ე სურათზე ნაჩვენებია, თუ როგორ მოინახება  $\vec{E}$  დაძაბულობა ველისა, რომელიც შექმნილია  $q_1$  და  $q_2$  წერტილოვანი მუხტებით.

ელექტრული ველის ცნება საშუალებას გვაძლევს, დამუხტულ ნაწილაკთა ურთიერთქმედების ძალების გამოთვლა დავყოთ ორ ეტაპად. ჯერ გამოვთვალოთ მუხტებით შექმნილი ველის დაძაბულობა, შემდეგ კი, დაძაბულობის მიხედვით — ძალა. ეს ხერხი აადვილებს ძალების გამოთვლას.

<sup>1</sup> ქართულად „სუპერპოზიცია“ „ზედდებას“ ნიშნავს.



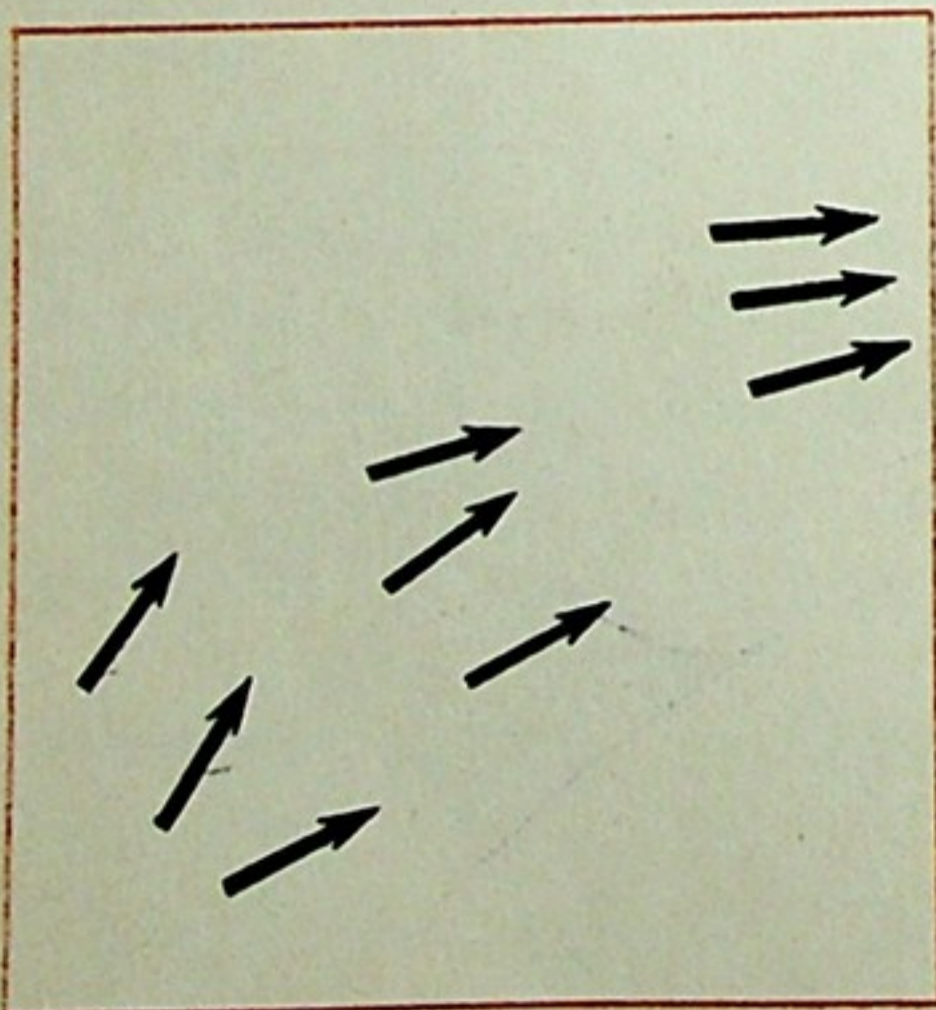
## 48. ელექტრული ველის ძალწირები

ჩვენ მივიღებთ ერთგვარ წარმოდგენას ველის განაწილებაზე, თუ სივრცის რამდენიმე წერტილში დავხაზავთ ველის დაძაბულობის ვექტორებს (სურ. 96) სურათი კიდევ უფრო თვალსაჩინოდ იქნება, თუ დავხაზავთ ველის წერტილებზე გამავალ უწყვეტ წირებს, რომელთა მხები მის ყოველ წერტილში დაძაბულობის ვექტორს ემთხვევა. ამ წირებს ელექტრული ველის ძალწირები ანუ დაძაბულობის წირები ვწოდება (სურ. 97).

არ უნდა ვიფიქროთ, რომ დაძაბულობის წირები — რეალურად არსებული წარმონაქმნია გაჭიმული დრეკადი ძაფებისა ან ზონრების მსგავსად, როგორც ამას თვით ფარადეი ვარაუდობდა. ისინი გვეხმარება თვალსაჩინოდ წარმოვიდგინოთ სივრცეში ველის განაწილება და სრულიადაც არაა უფრო რეალური, ვიდრე მერიდიანები და პარალელები დედამიწაზე.

მაგრამ ძალწირები შეიძლება გავხადოთ „ხილული“. თუ იზოლატორის (მაგალითად, ქინაქინის — მალარიის წამლის) მოგრძო პატარა კრისტალებს კარგად ავურევთ ბლანტ სითხეში (მაგალითად, აბუსალათინის ზეთში) და მასში მოვათავსებთ დამუხტულ სხეულებს, მაშინ ამ სხეულთა მახლობლად კრისტალები ჯაჭვისებურად განლაგდება დაძაბულობის წირების გასწვრივ.

სურათებზე მოცემულია დაძაბულობის წირთა მაგალითები იმ შემთხვევებისათვის, როცა გვაქვს: დადებითად დამუხტული ბურთულა (სურ. 98), ორი საპირისპირო ნიშნით დამუხტული ბურთულა (სურ. 99), ორი ერთსახელიანი მუხტის მქონე ბურთულა (სურ. 100), ორი ტოლად და საპირისპიროდ დამუხტული ფირფიტა (სურ. 101).



სურ. 96.



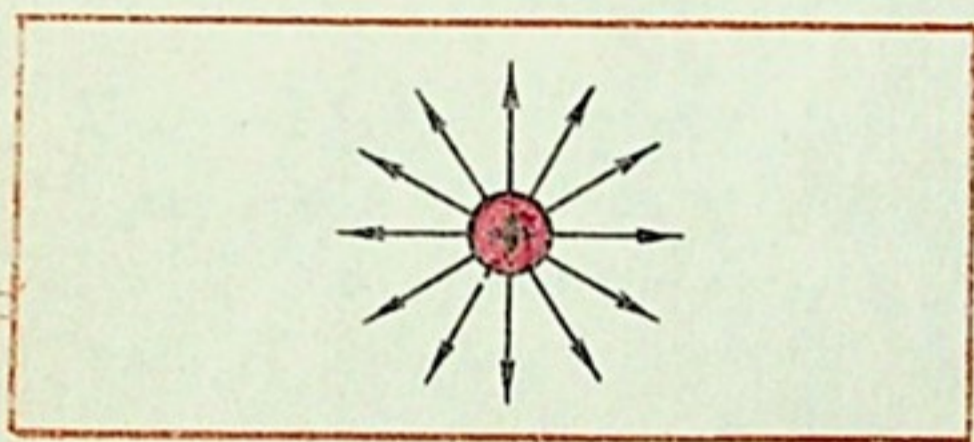
სურ. 97.



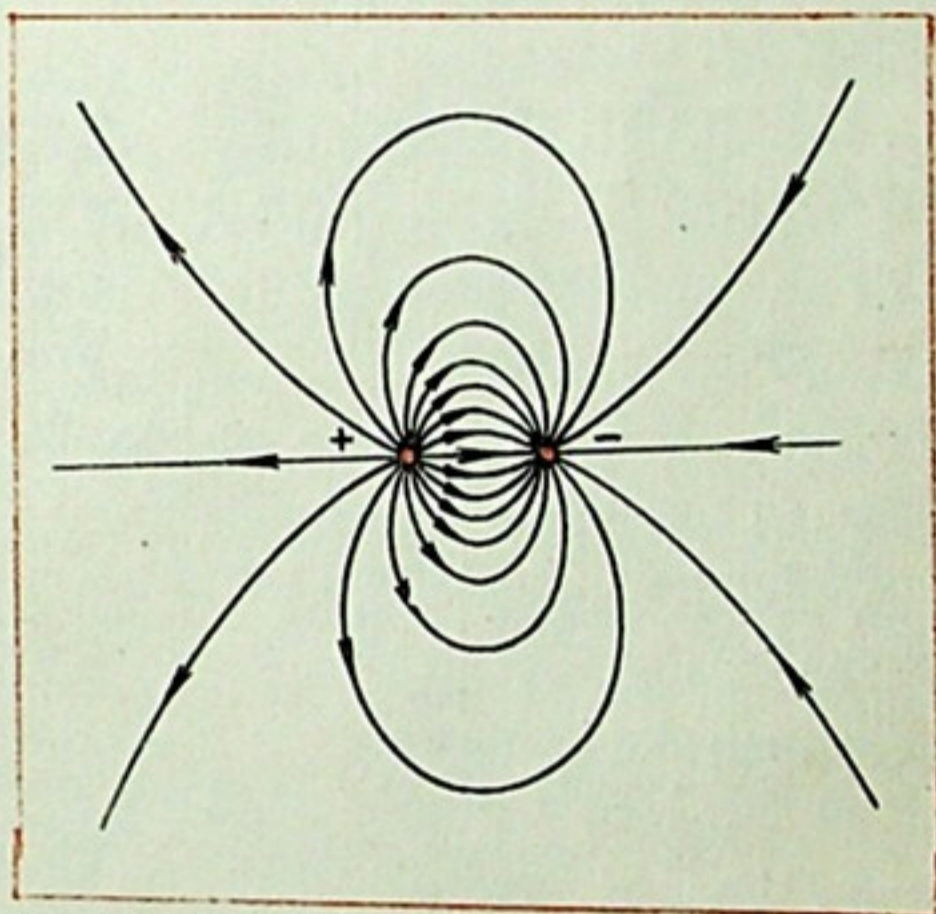
განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია უკანასკნელი მაგალითი. 101-ე სურათზე ჩანს, რომ ფირფიტებს შორის ნაპირებიდან მოშორებით ძალწირები პარალელურია: ელექტრული ველი აქ სივრცის ყველა წერტილში ერთნაირია.

ელექტრულ ველს, რომლის დაძაბულობა სივრცის ყველა წერტილში ერთნაირია, ერთგვაროვანი ეწოდება. სივრცის განსაზღვრულ არეში ელექტრული ველი მიახლოებით ერთგვაროვნად შეიძლება ჩავთვალოთ, თუ ველის დაძაბულობა ამ არეში უმნიშვნელოდ იცვლება.

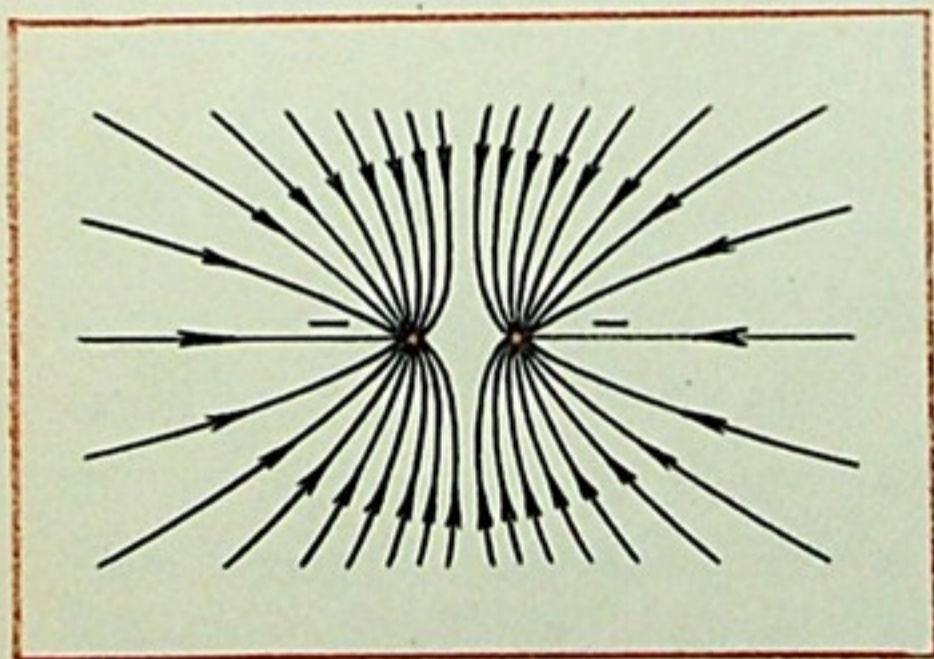
ელექტრული ველის ძალწირები შეკრული არაა, ისინი იწყება დადებითი მუხტებიდან და თავდება უარყოფითზე<sup>1</sup>. წირები უწყვეტია და ერთმანეთს არ კვეთენ (გადაკვეთა იმის მაჩვენებელი იქნებოდა, რომ ელექტრული ველის დაძაბულობას განსაზღვრული მიმართულება არა აქვს გადაკვეთის წერტილში). რადგან ძალწირები იწყება ან თავდება დამუხტულ სხეულებზე, შემდეგ კი იშლება სხვადასხვა



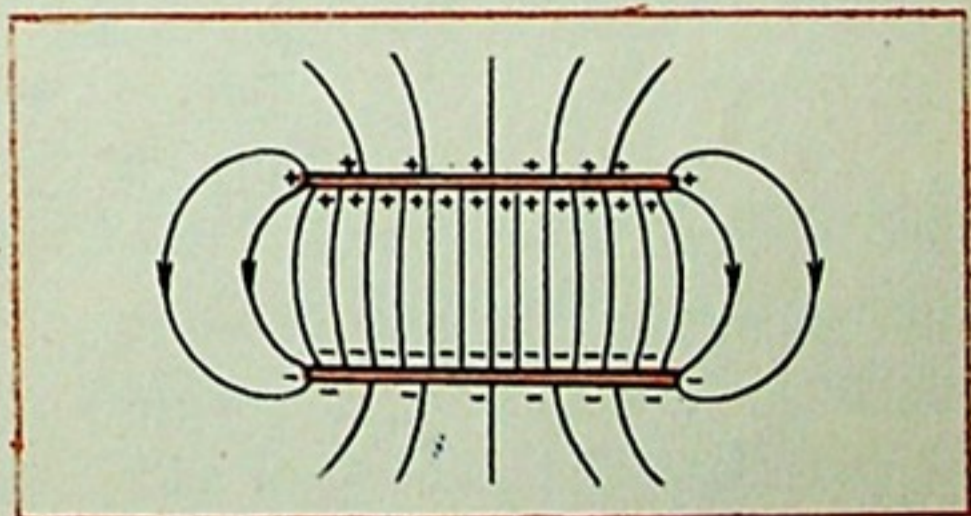
სურ. 98.



სურ. 99.



სურ. 100.

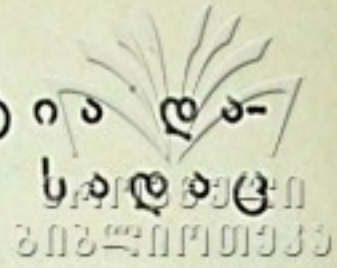


სურ. 101.

<sup>1</sup> 98-ე სურათზე გამოსახული ძალწირები აგრეთვე ბოლოვდება უარყოფით მუხტებზე, რომლებიც სადღაც შორსაა.



მხარეს (სურ. 98), ამიტომ წირების სიხშირე მეტია და-  
 მუხტული სხეულების მახლობლობაში, სადაც  
 მეტია აგრეთვე ველის დაძაბულობა.

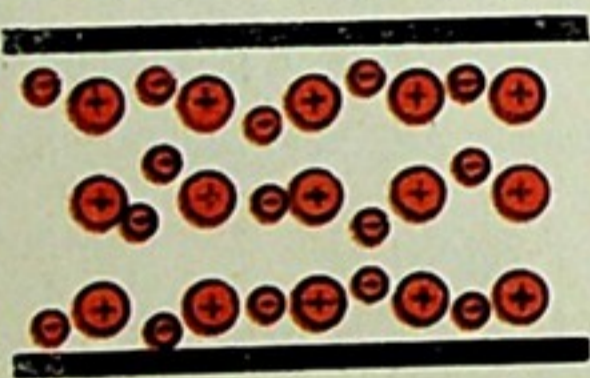


- 9 1. რით განსხვავდება ახლოქმედების თეორია მანძილზე ქმედების თეორი-  
 ისაგან? 2. ჩამოთვალეთ ელექტროსტატიკური ველის ძირითადი თვისე-  
 ბები. 3. რას ეწოდება ელექტრული ველის დაძაბულობა? 4. რას უდრის  
 წერტილოვანი მუხტის ველის დაძაბულობა? 5. გამოთქვით სუპერპოზიციის  
 პრინციპი 6. რას ეწოდება ელექტრული ველის ძალწირები 7. დახაზეთ ერთ-  
 გვაროვანი ელექტრული ველის ძალწირები.

#### 44. გამტარი ელექტროსტატიკურ ველში

**თავისუფალი მუხტები.** გამტარებში, რომელსაც პირველ რიგში  
 ეკუთვნის ლითონები, არის დამუხტული ნაწილაკები. გამტარში მათ  
 თავისუფალი გადაადგილება შეუძლია ელექტრული ველის გავლენ-  
 ით. ამის გამო ამ ნაწილაკთა მუხტს თავისუფალი მუხტი  
 ეწოდება.

ლითონში თავისუფალი მუხტის მატარებელს ელექტრონები  
 წარმოადგენს. ნეიტრალური ატომებისაგან ლითონის წარმოქმნისას  
 ატომები ურთიერთქმედებას იწყებენ. ამ ურთიერთქმედების შედე-  
 გად ატომთა გარე შრის ელექტრონები სრულიად კარგავს კავშირს  
 „თავის“ ატომებთან და ხდება მთელი გამტარის „საკუთრება“. ამის  
 გამო დადებითად დამუხტული იონები აღმოჩნდება უარყოფითად  
 დამუხტული „აირის“ (რომელსაც ქმნის კოლექტივიზებული ელექ-  
 ტრონები) გარემოცვაში (სურ. 102).



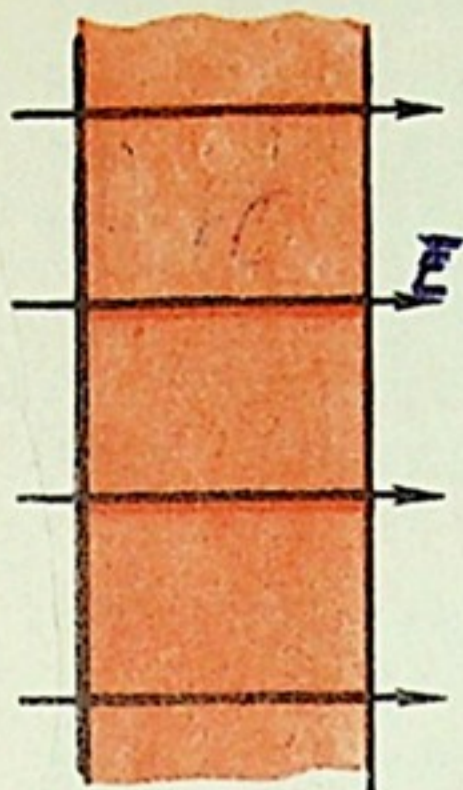
სურ. 102.

თავისუფალი ელექტრონები, მსგავსად აი-  
 რის მოლეკულებისა, მონაწილეობენ სითბურ  
 მოძრაობაში და ნებისმიერი მიმართულებით  
 გადაადგილდებიან ლითონში.

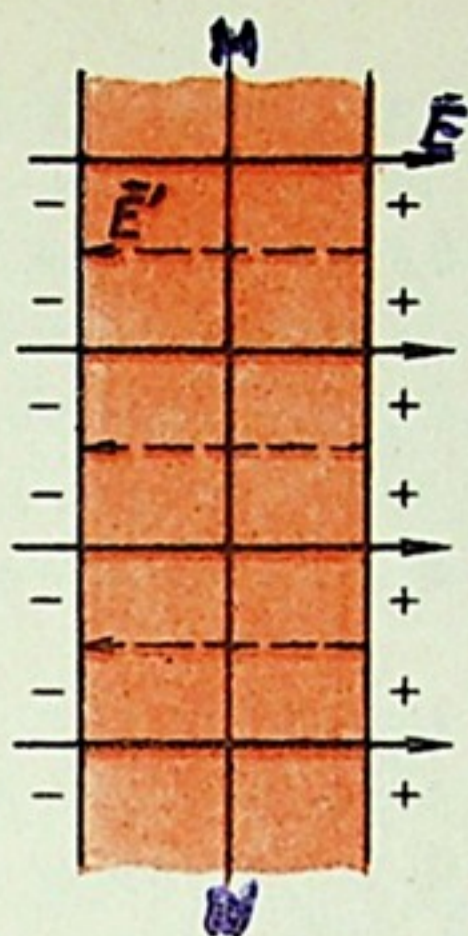
**ელექტროსტატიკური ველი გამტარში.** გამ-  
 ტარში თავისუფალი მუხტების არსებობა  
 იწვევს გამტარის შიგნით ელექტროსტატი-  
 კური ველის არარსებობას. ველი რომ ყოფილიყო, მისი გავლენით  
 თავისუფალი მუხტები მიმართულ მოძრაობას დაიწყებდნენ, ე. ი.  
 გამტარში აღიძვრებოდა ელექტრული დენი. გამტარის შიგნით რომ  
 ელექტროსტატიკური ველი არ არის<sup>1</sup>, ეს ერთნაირად ეხება როგორც  
 დამუხტულ გამტარს, ისე უმუხტოს, რომელიც მოთავსებულია გარე  
 ელექტროსტატიკურ ველში.

<sup>1</sup> რა თქმა უნდა, ცალკეული დამუხტული ნაწილაკები — ელექტრონები და  
 იონები — ქმნიან მიკროსკოპულ ველს, მაგრამ ეს ველები ერთმანეთს აბათილებს  
 და დაძაბულობის საშუალო მნიშვნელობა ნულის ტოლია.





სურ. 103.



სურ. 104.



სურ. 105.

ერთგვაროვან ველში შეტანილი უმუხტო ფირფიტის მაგალითით (სურ. 103), გავარკვიოთ თუ რა პროცესის შედეგად უტოლდება ნულს ელექტროსტატიკური ველის დაძაბულობა გამტარის შიგნით. ელექტრული ველის გავლენით ფირფიტის ელექტრონები გადაადგილდებას იწყებენ მარჯვნიდან მარცხნივ. დასაწყისში, ველში გამტარის შეტანისას, აღიძვრება ელექტრული დენი. ფირფიტის მარცხენა ნაწილი იმუხტება უარყოფითად, მარჯვენა კი — დადებითად. ეს არის ელექტროსტატიკური ინდუქციის მოვლენა (თუ ფირფიტას გავჭრით შუაზე  $MN$  წრფის გასწვრივ, ორივე ნაწილი დამუხტული აღმოჩნდება). წარმოქმნილი მუხტები ქმნიან თავის ველს (ამ ველის დაძაბულობის წირები ნაჩვენებია 104-ე სურათზე წყვეტილი წირებით), რომელიც ზედ ედება გარე ველს და აკომპენსირებს მას. ძალიან მცირე დროში მუხტები ისე გადანაწილდება, რომ ჯამური ველის დაძაბულობა ფირფიტაში ნულის ტოლი გახდება და მუხტების მოძრაობა შეწყდება. წინააღმდეგ შემთხვევაში გამტარში უწყვეტად გაივლიდა დენი და სითბო გამოიყოფოდა. მაგრამ ენერჯის მუდმივობის კანონის თანახმად ეს შეუძლებელია.

ამრიგად, გამტარის შიგნით ელექტროსტატიკური ველი არ არის. ამას ემყარება ე. წ. ელექტროსტატიკური დაცვა. იმისათვის, რათა დაიცვან ელექტრული ველისადმი გრძნობიერი ხელსაწყოები, მათ ათავსებენ ლითონის ყუთებში. გამტარის გარეთ ელექტროსტატიკური ველის ძალწირები მართობულია მისი ზედაპირისადმი. წინააღმდეგ შემთხვევაში იარსებებდა ველის დაძაბულობის მდგენელი, რომელიც მიმართული იქნებოდა გამტარის ზედაპირის გასწვრივ და ზედაპირზე გაივლიდა დენი.



**გამტარის ელექტრული მუხტი.** როცა მუხტები წონასწორობაშია, მაშინ გამტარის შიგნით არა მარტო ველის დაძაბულობაა ნულის ტოლი, არამედ მუხტიც. გამტარის მთელი სტატიკური მუხტი თავმოყრილია ზედაპირზე. მართლაც, მუხტი რომ გამტარის შიგნითაც იყოს, მაშინ მუხტის მახლობლობაში იქნებოდა ველიც, მაგრამ გამტარში ელექტროსტატიკური ველი არ არის. მაშასადამე, მუხტები გამტარში მხოლოდ მის ზედაპირზე შეიძლება განაწილდეს.

ეს დასკვნა მართებულია ელექტრულ ველში მოთავსებული როგორც დაუმუხტავი გამტარისათვის ისე დამუხტულისათვის.

გამტარის შიგნით მუხტების არარსებობა მარტივი ცდებით მტკიცდება. ერთ ასეთ ცდაში გამოყენებულია მავთულის ბადისაგან დამზადებული ცილინდრი (სურ. 105). ცილინდრის ზედაპირზე დაწებებულია კალაფირის მსუბუქი ფურცლები. ცილინდრის შიგნით მოძრავ გამტარ ღეროზე დამაგრებულია კიდევ ორი ფურცელი. თუ ცილინდრს გადავცემთ მუხტს, მაგალითად, ელექტროსტატიკური მანქანიდან, ფურცლები გაიშლება რაღაც კუთხით, რადგან მათზე გადასული მუხტი განიზიდება ცილინდრის ან მეზობელი ფურცლის ერთსახელიანი მუხტისაგან. მაგრამ, თუ ღეროზე დამაგრებულ ფურცლებს შევიტანთ ცილინდრის შიგნით, არ გაიშლება, რადგან მუხტი არა აქვს.

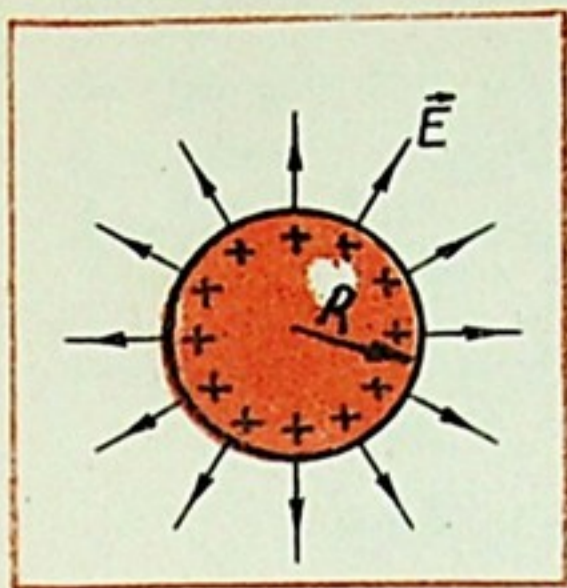
#### **45. თანაბრად დამუხტული გამტარი სფეროსა და უსასრულო სიბრტყის ელექტრული ველის დაძაბულობა**

განვსაზღვროთ მარტივი ფორმის დამუხტული სხეულების: სფეროსა და სიბრტყის ელექტრული ველის დაძაბულობა. მიახლოებით სფერული ფორმა აქვს მრავალ სხეულს ბუნებასა და ტექნიკაში: ატომბირთვებს, წვიმის წვეთებს, პლანეტებს და ა. შ. ბრტყელი ზედაპირებიც არ გვხვდება იშვიათად. გარდა ამისა, ნებისმიერი ზედაპირის მცირე უბანი მიახლოებით ბრტყლად შეიძლება ჩავთვალოთ.

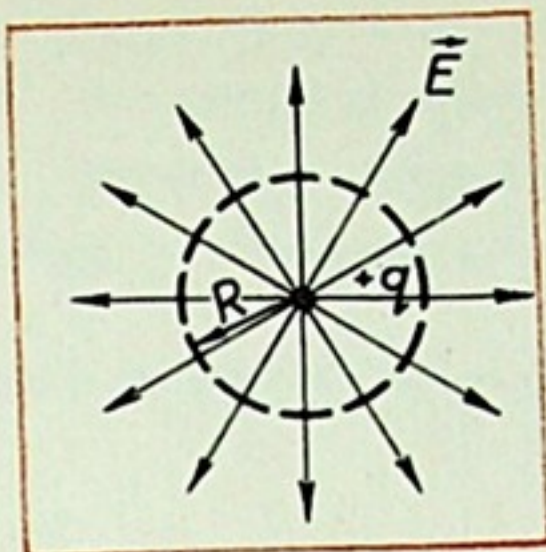
**სფეროს ველი.** ჭანვიხილთ  $R$ -რადიუსიანი დამუხტული გამტარი სფერო.  $q$  მუხტი თანაბრად არის განაწილებული სფეროს ზედაპირზე. ელექტრული ველის ძალწირები, როგორც ეს სიმეტრიულობიდან გამომდინარეობს, მიმართულია სფეროს რადიუსების გაგრძელებათა გასწვრივ (სურ. 106).

მივაქციოთ ყურადღება: სფეროს გარეთ სივრცეში ძალწირები ზუსტად ისევეა განაწილებული, როგორც წერტილოვანი მუხტის ძალწირები (სურ. 107). რაკი ემთხვევა ძალწირთა სურათები, შეიძ-

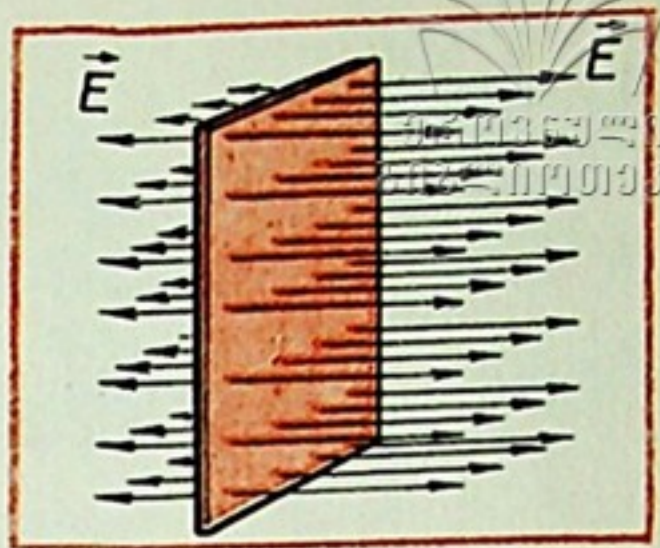




სურ. 106.



სურ. 107.



სურ. 108.

ლება ემთხვეოდეს ველთა დაძაბულობებიც. ამიტომ სფეროს ცენტრიდან  $r \geq R$  მანძილზე ველის დაძაბულობა განისაზღვრება იმავე (8.11) ფორმულით, რომლითაც სფეროს ცენტრში მოთავსებული წერტილოვანი მუხტის ველის დაძაბულობა:

$$E = k \frac{|q|}{r^2} \quad ] \quad (8.13)$$

ამ შედეგამდე მივყავართ ზუსტ გამოთვლებსაც.

გამტარი სფეროს შიგნით ( $r < R$ ) ველის დაძაბულობა ნულის ტოლია.

**სიბრტყის ველი.** დამუხტული სხეულის ზედაპირზე ელექტრული მუხტის განაწილება ხასიათდება განსაკუთრებული სიდიდით — მუხტის ზედაპირული სიმკვრივით ( $\sigma$ ). ზედაპირული სიმკვრივე ეწოდება მუხტის შეფარდებას ზედაპირის ფართობთან, რომელზედაც მუხტია განაწილებული. თუ  $q$  მუხტი თანაბრადაა განაწილებული  $S$  ფართობის ზედაპირზე, მაშინ

$$\sigma = \frac{q}{S} \quad ]$$

მუხტის ზედაპირული სიმკვრივის ერთეულის დასახელებაა კ/მ<sup>2</sup>.

თუ გავითვალისწინებთ სიმეტრიას, ცხადი ხდება, რომ ელექტრული ველის ძალწირები შეუძლებელია დახრილი იყოს სიბრტყისადმი ამა თუ იმ მხარეს: ყველა მიმართულება ტოლუფლებიანია და ასეთი დახრის საფუძველი არ არის. ამიტომ თანაბრად დამუხტული უსასრულო სიბრტყის ელექტრული ველის ძალწირები სიბრტყისადმი მართობული წრფეებია (სურ. 108). უსასრულო სიბრტყის ველი ერთგვაროვანია, ე. ი. სივრცის ყველა წერტილში, სიბრტყემდე მანძილისგან დამოუკიდებლად, ველის დაძაბულობა ერთი და იგივეა. ის განისაზღვრება მუხტის ზედაპირული სიმკვრივით ( $\sigma$ ).



იმისათვის, რომ ვიპოვოთ დამოკიდებულება ველის დაძაბულობასა და მუხტის  $\sigma$  ზედაპირულ სიმკვრივეს შორის, ვისარგებლოთ ფიზიკაში ხშირად გამოყენებული მეთოდით, რომელიც ფიზიკურ სიდიდეთა ერთეულების დასახელების ცოდნას ემყარება. ელექტრული ველის დაძაბულობის ერთეულის დასახელებაა  $\frac{6}{\text{კ}}$  მუხტის

ზედაპირული სიმკვრივის ერთეულისა კი —  $\frac{\text{კ}}{\text{მ}^2}$ .

ველის დაძაბულობის ერთეულის სწორი დასახელების მისაღებად ამ შემთხვევაში, უნდა დავუშვათ, რომ დაძაბულობა პროპორციულია  $k$  კოეფიციენტის ნამრავლისა (იხ. 8.11) მუხტის  $\sigma$  ზედაპირულ სიმკვრივეზე:  $E \sim k\sigma$ .

$k$  კოეფიციენტის დასახელებაა  $\frac{6 \cdot \text{მ}^2}{\text{კ}^2}$ , დაძაბულობის ერთეულის დასახელება იქნება  $\frac{6 \cdot \text{მ}^2}{\text{კ}^2} \cdot \frac{\text{კ}}{\text{მ}^2} = \frac{6}{\text{კ}}$ .

პროპორციულობის კოეფიციენტი შეიძლება მოვინახოთ მხოლოდ გამოთვლებით. ეს გამოთვლები გვაძლევს:

$$E = k \cdot 2\pi|\sigma| \quad (8.14)$$

უსასრულო სიბრტყეები არ არსებობს. მაგრამ თუ სიბრტყის ზომები ძალიან დიდია სიბრტყიდან მოცემული წერტილის დაშორებასთან შედარებით, მაშინ ველის დაძაბულობის სიბრტყისადმი მართობული მდგენელი აღებულ წერტილში პრაქტიკულად ისეთივე იქნება, როგორც უსასრულო სიბრტყის ველის დაძაბულობა.

#### 48. დიელექტრიკი ელექტროსტატიკურ ველში.

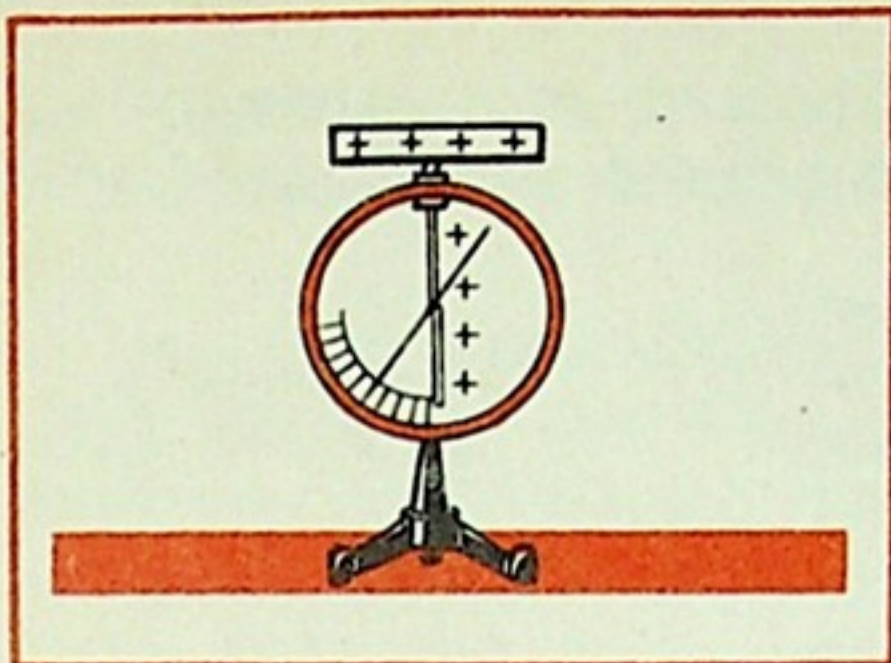
##### ორი სახის დიელექტრიკი

იზოლატორი ანუ დიელექტრიკი<sup>1</sup> შედგება ნეიტრალური ატომებისა და მოლეკულებისაგან. ელექტრული მუხტები (უფრო ზუსტად, ელექტრულად დამუხტული ნაწილაკები: ელექტრონები და ბირთვები) ნეიტრალურ ატომში ურთიერთბეზულია და მათ ველის გავლენით, გამტარის თავისუფალი მუხტებისაგან განსხვავებით, ნივთიერების მთელ მოცულობაში გადაადგილება არ შეუძლიათ.

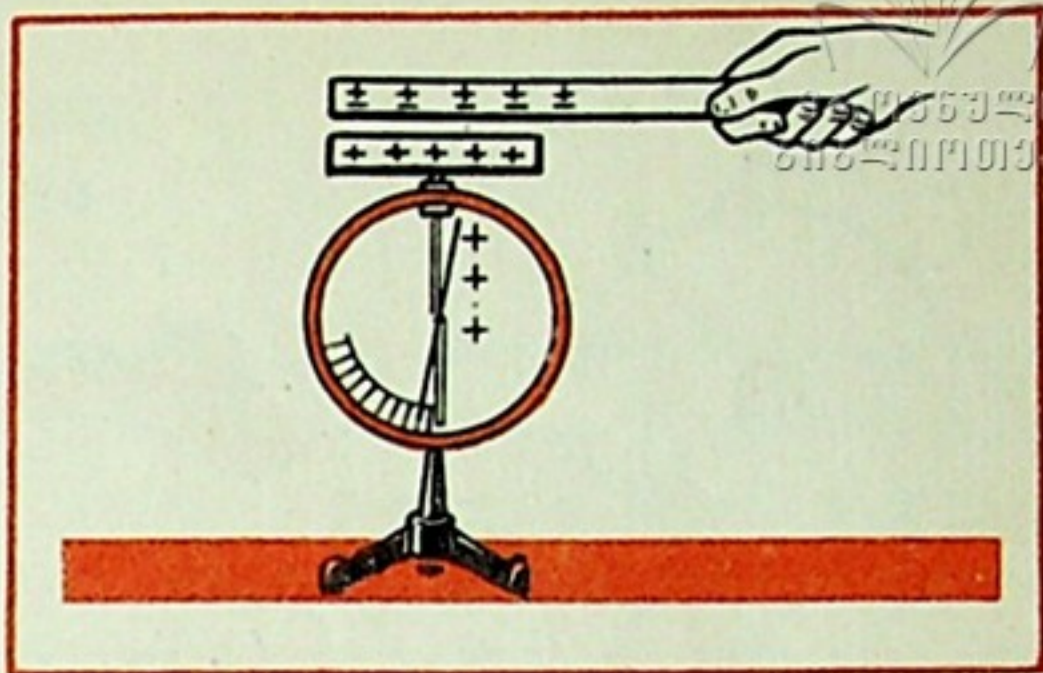
<sup>1</sup> ჩვეულებრივ იზოლატორს ფიზიკაში დიელექტრიკი ეწოდება. ეს ტერმინი აღნიშნავს ნივთიერებას, რომლის საშუალებითაც ელექტრომაგნიტური ურთიერთქმედება გადაიცემა.







სურ. 109.



სურ. 110.

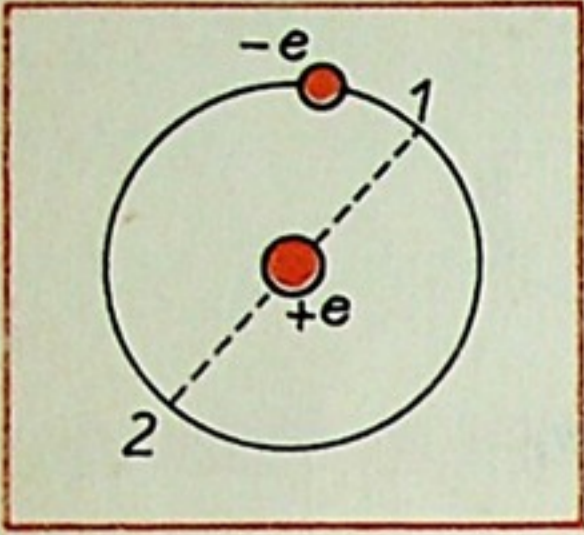
განსხვავებულ აგებულებათა გამო გამტარები და დიელექტრიკები სხვადასხვანაირად იქცევიან ელექტროსტატიკურ ველში. დიელექტრიკში შეიძლება არსებობდეს ელექტროსტატიკური ველი. ამ დროს დიელექტრიკი მასზე განსაზღვრულ გავლენას მოახდენს.

მარტივი ცდით შეიძლება დავრწმუნდეთ, რომ დაუმუხტავ დიელექტრიკს მართლაც შეუძლია ელექტრული ველის შექმნა. 109-ე სურათზე ვხედავთ დამუხტულ ელექტრომეტრს, რომლის ღერო ლითონის დისკოთი ბოლოვდება. თუ ასეთი ელექტრომეტრის დისკოსთან მივიტანთ დაუმუხტავ დიელექტრიკს, მაგალითად, სქელ მინას, მაშინ ელექტრომეტრის ისარი ოდნავ დაეშვება (სურ. 110), ეს მხოლოდ იმ შემთხვევაში მოხდება, თუ დამუხტული დისკოს ელექტრულ ველში მოთავსებული დიელექტრიკი თვით შექმნის ელექტრულ ველს, ეს ველი გავლენას ახდენს მუხტების განაწილებაზე ელექტრომეტრის ღეროში, ამცირებს ისრისა და ღეროს მუხტს და შესაბამისად ადიდება დისკოს მუხტს.

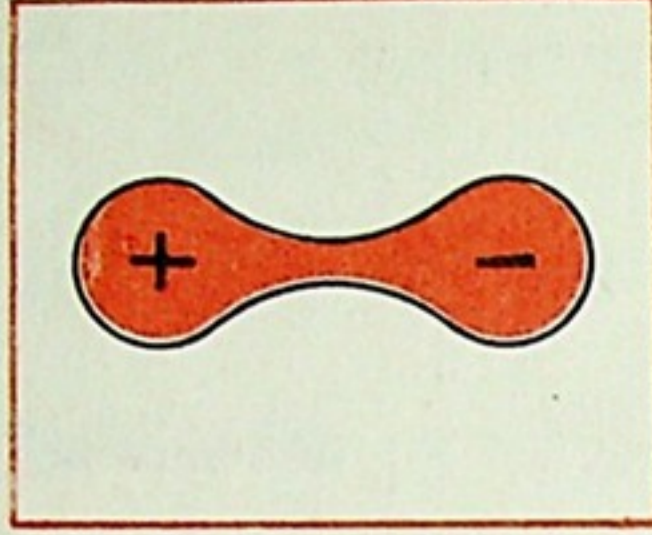
ნეიტრალური ატომებისა და მოლეკულების ელექტრული თვისებები. რომ გავარკვიოთ, თუ როგორ ქმნის ელექტრულ ველს დაუმუხტავი დიელექტრიკი, საჭიროა ჯერ გავეცნოთ ნეიტრალური ატომებისა და მოლეკულების ელექტრულ თვისებებს.

ატომები და მოლეკულები შედგება დადებითად დამუხტული ნაწილაკებისაგან — ბირთვებისაგან და უარყოფითად დამუხტული ნაწილაკებისაგან — ელექტრონებისაგან. 111-ე სურათზე გამოსახულია უმარტივესი ატომის — წყალბადის ატომის სქემა. ატომის დადებითი მუხტი, მისი ბირთვის მუხტი, თავმოყრილია ატომის ცენტრში. ელექტრონი ატომში მოძრაობს დიდი სიჩქარით. ბირთვის გარშემო ერთ ბრუნს ის ასრულებს უმნიშვნელო დროში, რომელიც დაახლოებით  $10^{-15}$  წამის ტოლია. ამიტომ, მაგალითად,  $10^{-9}$  წამში ის ასწრებს მილიონი ბრუნის შესრულებას, ე. ი. მილიონჯერ ყოფნას ორ ნებისმიერ (1) და (2) წერტილში, რომლებიც სიმეტრიულად არიან განლა-

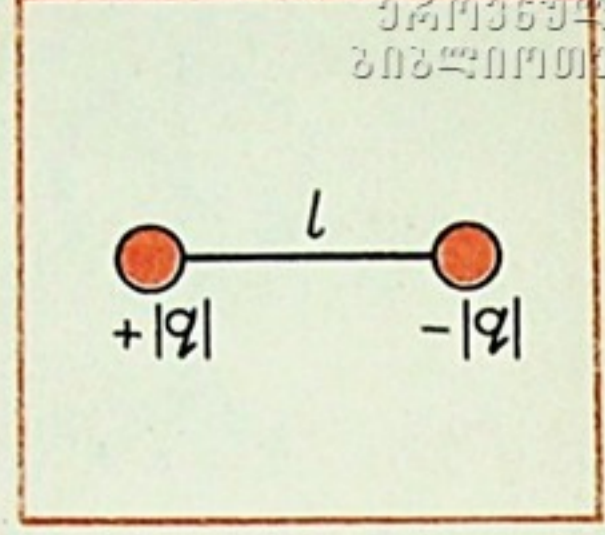




სურ. 111.



სურ. 112.



სურ. 113.

გებული ბირთვის მიმართ. ამიტომ შეგვიძლია ჩავთვალოთ, რომ საშუალოდ (დროის მიხედვით) უარყოფითი მუხტის განაწილების ცენტრი ატომის შუაშია, ე. ი. ემთხვევა დადებითად დამუხტულ ბირთვს.

მაგრამ ყოველთვის ასე როდია. განვიხილოთ სუფრის მარილის, NaCl-ის მოლეკულა. ნატრიუმის ატომს გარე შრეში აქვს ერთი სავალენტო ელექტრონი, რომელიც სუსტად არის დაკავშირებული ატომთან; ქლორს აქვს შვიდი სავალენტო ელექტრონი. მოლეკულის წარმოქმნისას ნატრიუმის ერთადერთ სავალენტო ელექტრონს მიიერთებს ქლორი. ორივე ნეიტრალური ატომი გადაიქცევა ორი საპირისპიროდ დამუხტული იონის სისტემად (სურ. 112). ახლა დადებითი და უარყოფითი მუხტები არაა სიმეტრიულად განაწილებული მოლეკულის მოცულობაში: დადებითი მუხტის განაწილების ცენტრი ნატრიუმის იონშია, უარყოფითისა კი — ქლორის იონში.

**ელექტრული დიპოლი.** მოლეკულიდან დიდ მანძილზე ის შეიძლება მიახლოებით განვიხილოთ როგორც ისეთი ორი წერტილოვანი მუხტის ერთობლიობა, რომლებიც მოდულით ტოლი, ხოლო ნიშნით საპირისპიროა და ერთმანეთისაგან დაშორებული არიან რაღაც  $l$  მანძილით (სურ. 113). მთლიანობაში მუხტების ასეთ ნეიტრალურ სისტემას ელექტრული დიპოლი ეწოდება.

**ორი სახის დიელექტრიკი.** დიელექტრიკი შეიძლება გავყოთ ორ სახედ: პოლარული დიელექტრიკი — ისეთი მოლეკულებისგან შედგენილი, რომელშიც დადებითი და უარყოფითი მუხტების განაწილებათა ცენტრები ერთმანეთს არ ემთხვევა — და არაპოლარული დიელექტრიკი — ისეთი ატომებისა ან მოლეკულებისაგან შედგენილი, რომელშიც დადებითი და უარყოფითი მუხტების განაწილების ცენტრები ერთმანეთს ემთხვევა.

პოლარული დიელექტრიკია: სპირტი, წყალი და სხვ. არაპოლარულია: ინერტული აირები, ქანგბადი, წყალბადი, ბენზოლი, პოლიეთილენი და სხვ.





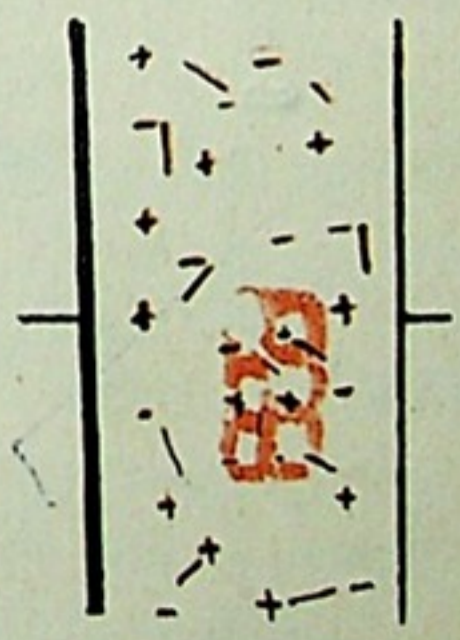
### 47. დიელექტრიკის პოლარიზაცია. დიელექტრიკული შეღწევალობა

პოლარული დიელექტრიკის პოლარიზაცია. პოლარული დიელექტრიკი შედგება ისეთი მოლეკულებისაგან, რომლებიც შეიძლება განვიხილოთ, როგორც ელექტრული დიპოლი. სითბური მოძრაობა დიპოლების ქაოსურ ორიენტაციას იწვევს ერთმანეთის მიმართ (სურ. 114). ამის გამო დიელექტრიკის ზედაპირზე, აგრეთვე მის ნებისმიერ მოცულობაში, რომელიც მოლეკულებს შეიცავს დიდი რაოდენობით (დაშტრიხული მართკუთხედი), ელექტრული მუხტი საშუალოდ ნულის ტოლია. ელექტრული ველის დაძაბულობა დიელექტრიკში საშუალოდ ასევე ნულის ტოლია.

მოვათავსოთ დიელექტრიკი ლითონის ორ პარალელურ ფირფიტას შორის, რომლებიც საპირისპიროდ დაამუხტული. თუ ფირფიტების ზომები ბევრად მეტია მათ შორის მანძილზე, მაშინ ველი ფირფიტებს შორის ერთგვაროვანია (იხ. § 43). ამ ველში თითოეულ ელექტრულ დიპოლზე იმოქმედებს ორი ძალა, რომლებიც მოდულით ტოლი და მიმართულებით ურთიერთსაპირისპიროა (სურ. 115). ისინი ქმნიან ძალის მომენტს, რომელიც ცდილობს დიპოლი შემოაბრუნოს და მისი ღერძი დააყენოს ველის ძალწირების გასწვრივ (სურ. 116). ამ დროს დადებითი მუხტები წაინაცვლებს ელექტრული ველის მიმართულებით, უარყოფითი კი — საპირისპირო მხარეს.

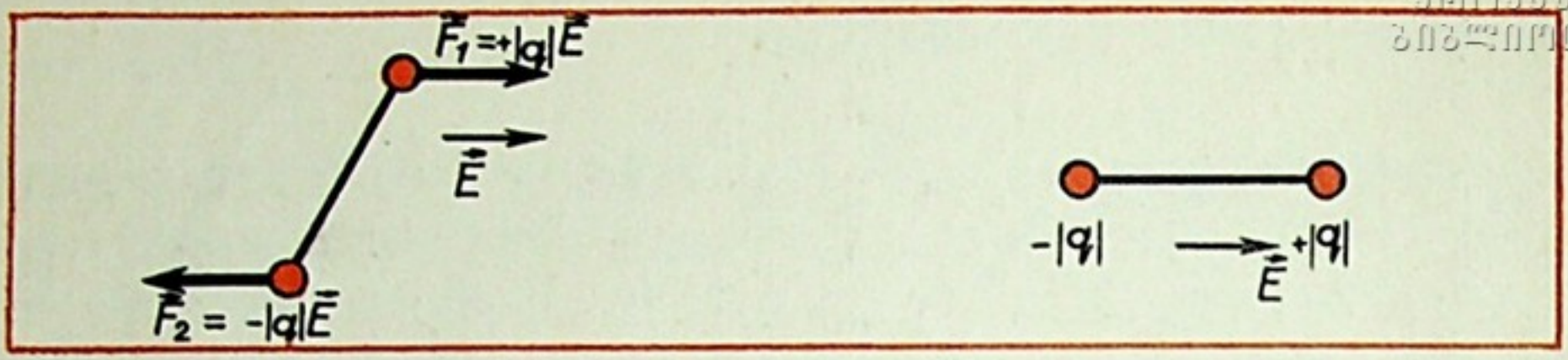
**დიელექტრიკის ბმული დადებითი და უარყოფითი მუხტების საპირისპირო მიმართულებით წანაცვლებას პოლარიზაცია ეწოდება.**

ყველა დიპოლის მოწესრიგებული ორიენტაციის შექმნას ეწინააღმდეგება ქაოსური სითბური მოძრაობა. მხოლოდ აბსოლუტური ნულის ტოლ ტემპერატურაზე განლაგდება დიპოლები ძალწირების გასწვრივ. ამრიგად, ველის გავლენით ელექტრული დიპოლების მხოლოდ ნაწილობრივი ორიენტაცია ხდება. ეს ნიშნავს, რომ საშუალოდ ველის გასწვრივ ორიენტირებული დიპოლების რიცხვი მეტია, ვიდრე ველის წინააღმდეგ ორიენტირებული დიპოლებისა. 117-ე სურათზე ჩანს: დიელექტრიკის ზედაპირზე დადებით ფირფიტასთან უპირატესად დიპოლთა უარყოფითი მუხტები განლაგდება, უარყოფითად დამუხტულ ფირფიტასთან კი — დადებითი. ამის გამო, დიელექტრიკის ზედაპირზე ჩნდება ბმული მუხტი. დიელექტრიკის შიგნით დიპოლთა დადებითი



სურ. 114.



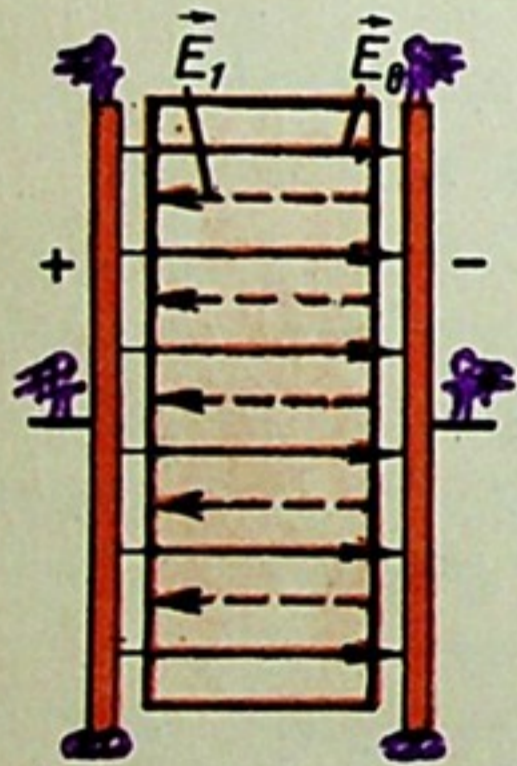
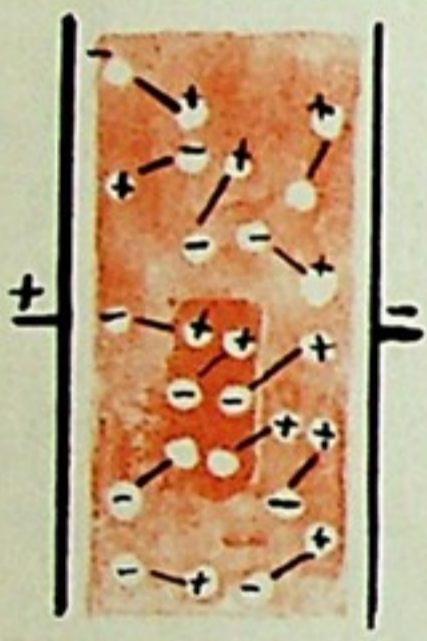


სურ. 115.

სურ. 116.

და უარყოფითი მუხტები ერთმანეთს აკომპენსირებენ და საშუალო ბმული ელექტრული მუხტი ისევ ნულის ტოლია.

სურ. 117.



სურ. 118.

**არაპოლარული დიელექტრიკის პოლარიზაცია.**

არაპოლარული დიელექტრიკიც განიცდის პოლარიზაციას ელექტრულ ველში. ველის გავლენით მოლეკულის დადებითი და უარყოფითი მუხტები წაინაცვლებს საპირისპირო მიმართულებით. ამიტომ დადებითი და უარყოფითი მუხტების განაწილების ცენტრები აღარ დაემთხვევა ერთმანეთს, როგორც ეს პოლარულ მოლეკულაშია. ასეთი დეფორმირებული მოლეკულები შეიძლება განვიხილოთ როგორც ელექტრული დიპოლები, რომელთა ღერძი ველის გასწვრივ არის მიმართული. დიელექტრიკის იმ ზედაპირებზე, რომლებიც დამუხტულ ფირფიტებს ეკვრის, ისევე წარმოიქმნება ბმული მუხტები, როგორც პოლარული დიელექტრიკის პოლარიზაციის დროს.

დიელექტრიკის მეზობელ მოლეკულებს შორის არსებული მიზიდვის ძალა მნიშვნელოვნად სუსტია იმ ძალებზე, რომლებიც საპირისპირო მუხტებს აკავშირებს მოლეკულაში. ამიტომ დიელექტრიკის გაჭრისა თუ გაწყვეტისას მოლეკულები კი არ ირღვევა, არამედ მთლიანად რჩება კრილის ზედაპირებზე. ამის გამო პოლარიზებული დიელექტრიკის ნაწილები ელექტრულად ნეიტრალური იქნება.

**დიელექტრიკული შეღწევადობა.** ბმული მუხტი დიელექტრიკში ქმნის ელექტრულ ველს, რომლის  $E_1$  დაძაბულობა მიმართულია გარე ელექტრული ველის (რომელსაც ქმნის ფირფიტების მუხტები) დაძაბულობის საპირისპიროდ (სურ. 118). ამის გამო დიელექტრიკში ველი სუსტდება. თუ რამდენად შესუსტდება ველი, ეს დამოკიდებულია დიელექტრიკის თვისებებზე.





დიელექტრიკის ელექტრული თვისებების დასახასიათებლად შემოღებულია განსაკუთრებული სიდიდე, რომელსაც დიელექტრიკულ შეღწევადობას უწოდებენ.

გარემოს დიელექტრიკული შეღწევადობა არის ფიზიკური სიდიდე, რომელიც გვიჩვენებს, თუ რამდენჯერ ნაკლებია ელექტრული ველის  $E$  დაძაბულობის მოდული ერთგვაროვან დიელექტრიკში, იმავე თავისუფალი მუხტების მიერ შექმნილ ველის  $E_0$  დაძაბულობის მოდულზე ვაკუუმში.

დიელექტრიკულ შეღწევადობას აღნიშნავენ  $\epsilon$ -ით:

$$\epsilon = \frac{E_0^1}{E}$$

ამის შესაბამისად ერთგვაროვან დიელექტრიკში მოთავსებული წერტილოვანი მუხტის, დამუხტული სფეროსა და სიბრტყის ელექტრული ველების დაძაბულობა  $\epsilon$ -ჯერ ნაკლებია, ვიდრე ვაკუუმში. წერტილოვანი მუხტისა და სფეროსათვის (8.13)-ის ნაცვლად მართებულია ფორმულა:

$$E = k \frac{|q|}{\epsilon r^2} \quad (8.15)$$

დამუხტული სიბრტყისათვის ერთგვაროვან დიელექტრიკში (8.14) ფორმულის ნაცვლად გვექნება

$$E = k \frac{2\pi |\sigma|}{\epsilon} \quad (8.16)$$

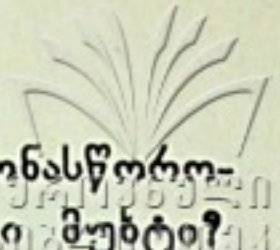
წერტილოვანი მუხტების ურთიერთქმედების ძალა ერთგვაროვან დიელექტრიკში  $\epsilon$ -ჯერ მცირდება ველის დაძაბულობის შემცირების გამო. ერთგვაროვან დიელექტრიკში მოთავსებული მუხტებისათვის კულონის კანონი ასე დაიწერება:

$$E = k \frac{|q_1| |q_2|}{\epsilon r^2}, \quad (8.17)$$

ამრიგად, დამუხტული სხეულების ურთიერთქმედების ძალა, მსოფლიო მიზიდულობის ძალისაგან განსხვავებით, დამოკიდებულია იმ გარემოს თვისებებზე, რომელშიც ისინი იმყოფებიან.

<sup>1</sup> ეს ფორმულა ეხება მხოლოდ ერთგვაროვან გარემოს, რომელიც მთელ სივრცეს ავსებს; იგი მართებულია აგრეთვე განსაკუთრებული სიმეტრიულობის მქონე სხეულისათვის, მაგალითად ერთგვაროვანი ფირფიტისათვის კონდენსატორის შიგნით. ნებისმიერი ფორმის სხეულის შემთხვევაში დამოკიდებულება  $E$ -სა და  $E_0$ -ს შორის გაცილებით რთულია და განისაზღვრება სხეულის ფორმითა და მისი ორიენტაციით  $E_0$ -სადმი.





7. 1. რას უდრის ველის დაძაბულობა დიელექტრიკში მუხტების წონასწორობის დროს? 2. როგორ ნაწილდება გამტარში მასზე გადაცემული მუხტი? 3. რას უდრის დამუხტული გამტარი სფეროს ველის დაძაბულობა? 4. რას უდრის თანაბრად დამუხტული სიბრტყის ველის დაძაბულობა? 5. როგორ დიელექტრიკს ეწოდება პოლარული და როგორს არაპოლარული? 6. რას ეწოდება დიელექტრიკის პოლარიზაცია? 7. რას ეწოდება დიელექტრიკული შეღწევადობა?

**48. დამუხტული სხეულის პოტენციური ენერგია ერთგვაროვან ელექტროსტატიკურ ველში**

**ელექტრული ენერგია.** დამუხტული სხეულები ერთმანეთს მიიზიდავს ან განიზიდავს. დამუხტული სხეულის, მაგალითად, ელექტროსკოპის ფურცლების გადაადგილების დროს მათ შორის მოქმედი ძალა მუშაობას ასრულებს. მექანიკიდან ვიცით, რომ სხეულთა ურთიერთქმედების შედეგად, ამ სხეულების შემცველ სისტემას შეუძლია შესრულოს მუშაობა, მას აქვს პოტენციური ენერგია. მაშასადამე, დამუხტულ სხეულთა სისტემას აქვს პოტენციური ენერგია, რომელსაც ელექტროსტატიკურ ანუ ელექტრულ ენერგიას უწოდებენ.

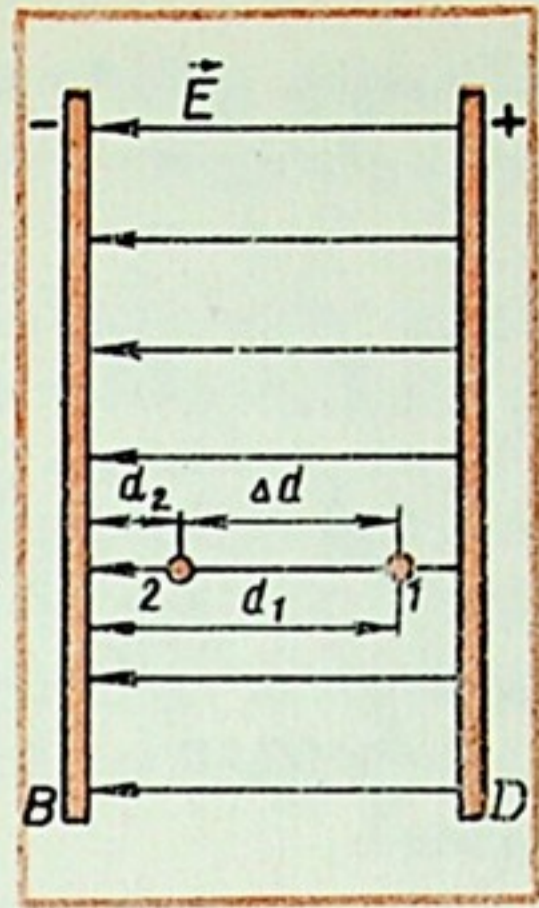
ატომში ელექტრონების ბირთვთან ურთიერთქმედების ენერგია და მოლეკულაში ატომების ურთიერთქმედების ენერგია (ქიმიური ენერგია) ძირითადად ელექტრული ენერგიაა. უზარმაზარი ელექტრული ენერგიის მარაგია ატომბირთვში. სწორედ ამ ენერგიის ხარჯზე გამოიყოფა სითბო ატომური ელექტროსადგურის ბირთვული რეაქტორის მუშაობის დროს.

ახლოქმედების თეორიის თვალსაზრისით მუხტზე უშუალოდ მოქმედებს ელექტრული ველი, რომელიც შექნილია სხვა მუხტების მიერ. მუხტის გადაადგილების დროს ველის მხრივ მასზე მოქმედი ძალა მუშაობას ასრულებს (შემდეგში სიმოკლისათვის ვილაპარაკებთ ველის მუშაობაზე). ამიტომ ვამბობთ, რომ ელექტრულ ველში მოთავსებულ დამუხტულ სხეულს აქვს ენერგია. ვიპოვოთ მუხტის პოტენციური ენერგია ერთგვაროვან ელექტრულ ველში.

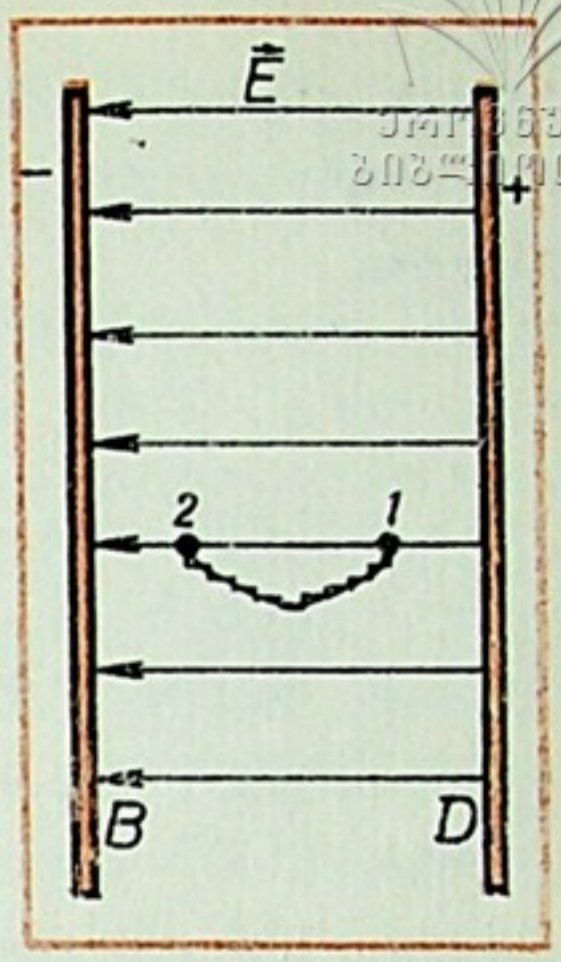
**ერთგვაროვან ველში მუხტის გადაადგილებისას შესრულებული მუშაობა.** ერთგვაროვან ველს ქმნის, მაგალითად, ლითონის დიდი ფირფიტები, რომლებსაც საპირისპირო ნიშნის მუხტები აქვს. ეს ველი  $q$  მუხტზე მოქმედებს  $\vec{E} = q\vec{E}$  მუდმივი ძალით, ისევე, როგორც დედამიწა მოქმედებს ქვაზე თავისი ზედაპირის მახლობლად  $\vec{F} = m\vec{g}$  მუდმივი ძალით. **კვტყვათ,** ფირფიტები მოთავსებულია ვერტიკალურად



(სურ. 119), ამასთან  $B$  ფირფიტა დამუხტულია უარყოფითად,  $D$  კი — დადებითად. გამოვთვალოთ მუშაობა, რომელსაც ველი ასრულებს  $q$  მუხტის გადაადგილებისას ველის (1) წერტილიდან (2) წერტილში. პირველი  $d_1$  მანძილზეა  $B$  ფირფიტიდან, მეორე კი  $d_2 < d_1$  მანძილზე. ეს წერტილები ერთსა და იმავე ძალწირზე მდებარეობს. გზის  $\Delta d = d_1 - d_2$  უბანზე ელექტრული ველი ასრულებს დადებით მუშაობას:



სურ. 119.



სურ. 120.

$$A = qE(d_1 - d_2) = -(qEd_2 - qEd_1). \quad (8.18)$$

ეს მუშაობა დამოკიდებული არაა ტრაექტორიის ფორმაზე, ისევე როგორც სიმძიმის ძალის მუშაობა არ არის დამოკიდებული ტრაექტორიის ფორმაზე. დავამტკიცოთ ეს უშუალო გამოთვლით. გამოვთვალოთ მუშაობა მუხტის გადაადგილებისას ნებისმიერი მრუდის გასწვრივ, რომელიც 1 და 2 წერტილებს აერთებს. მუშაობის გამოთვლის დროს უწყვეტი მრუდის გასწვრივ გადაადგილება შეიძლება შევცვალოთ გადაადგილებით რაგინდ მცირე საფეხურების მქონე ტეხილ წირზე (სურ. 120). როცა გადაადგილება ხდება იმ საფეხურების გასწვრივ, რომლებიც მართობულია  $\vec{E}$  ველის დაძაბულობისა. მუშაობა არ სრულდება.  $\vec{E}$ -ს პარალელურ საფეხურებზე კი სრულდება (8.18) მუშაობა, რადგან პორიზონტული მონაკვეთების სიგრძეთა ჯამი  $\Delta d = d_1 - d_2$ .

პოტენციური ენერჯია.  $\mathcal{E}$  თუ მუშაობა დამოკიდებული არ არის სხეულის ტრაექტორიის ფორმაზე, მაშინ ის ტოლია სხეულის პოტენციური ენერჯიის ცვლილებისა საპირისპირო ნიშნით.

$$A = -(W_{p_2} - W_{p_1}) = -\Delta W_p. \quad (8.19)$$

ამის შესახებ დაწვრილებითაა ლაპარაკი IX კლასის ფიზიკის კურსში. თუ შევადარებთ მიღებულ (8.18) გამოსახულებას პოტენ-



ციური ენერჯიის (8.19). ზოგად განსაზღვრას, დავინახავთ, რომ მუხტის პოტენციური ენერჯია ერთგვაროვან ელექტროსტატიკურ ველში ტოლია:

$$W_p = qEd. \quad (8.20)$$

(8.20) გამოსახულება მსგავსია დედამიწის ზედაპირიდან რაღაც სიმალღეზე არსებული სხეულის პოტენციური ენერჯიის  $W_p = mgh$  ფორმულისა. მაგრამ  $q$  მუხტი მასისგან განსხვავებით შეიძლება იყოს როგორც დადებითი, ისე უარყოფითი. თუ  $q < 0$ , მაშინ პოტენციური ენერჯია (8.19) უარყოფითია.

თუ ველი დადებით მუშაობას ასრულებს, მაშინ დამუხტული სხეულის პოტენციური ენერჯია ველში კლებულობს:  $\Delta W_p < 0$ . ენერჯიის მუდმივობის კანონის თანახმად, ერთდროულად იზრდება მისი კინეტიკური ენერჯია. ამაზეა დამყარებული ელექტრონთა აჩქარება ელექტრული ველით ელექტრონულ მილაკებში სატელევიზიო მილაკებში და ა. შ. პირიქით, თუ მუშაობა უარყოფითია (მაგალითად, დადებითად დამუხტული ნაწილაკების  $\vec{E}$  დაძაბულობის საპირისპირო მიმართულებით მოძრაობისას; ეს მოძრაობა მსგავსია ზემოთ ასროლილი ქვის მოძრაობისა), მაშინ  $\Delta W_p > 0$ . პოტენციური ენერჯია მატულობს, კინეტიკური ენერჯია კლებულობს: ნაწილაკი მუხრუჭდება.

ჩაკეტილ ტრაექტორიაზე, როცა მუხტი (1) საწყის წერტილში ბრუნდება, ველის მუშაობა ნულის ტოლია:

$$A = -\Delta W_p = -(W_{p_2} - W_{p_1}) = 0.$$

პოტენციური ენერჯიის ნულოვანი დონე. პოტენციური ენერჯია (8.20)  $B$  ფირფიტის ზედაპირზე ნულის ტოლია. ეს ნიშნავს, რომ პოტენციური ენერჯიის ნულოვანი დონე  $B$  ფირფიტას ემთხვევა. მაგრამ პოტენციური ენერჯიის ნულოვანი დონე, როგორც ეს მიზიდულობის ძალთა შემთხვევაშია, ნებისმიერად შეირჩევა. შეიძლება ჩავთვალოთ რომ  $B$  ფირფიტიდან  $d_2$  მანძილზე  $W_p = 0$ . მაშინ

$$W_p = qEd - qEd_2,$$

ფიზიკური აზრი აქვს არა თვით პოტენციურ ენერჯიას, არამედ მის მნიშვნელობათა სხვაობას, რომელიც ველის მუშაობით განისაზღვრება მუხტის საწყისიდან საბოლოო მდებარეობაში გადაადგილებისას.



## 49. ელექტროსტატიკური ველის პოტენციალი და პოტენციალთა სხვაობა

**პოტენციალური ველი.** ნებისმიერი ელექტროსტატიკური ველის მუშაობა დამუხტული სხეულის გადაადგილების დროს (ერთი წერტილიდან მეორეში), ისევე, როგორც ერთგვაროვანი ველის მუშაობა, დამოკიდებული არაა ტრაექტორიის ფორმაზე. ელექტროსტატიკური ველის მუშაობა ჩაკეტილ ტრაექტორიაზე ყოველთვის ნულია. ველს, რომელსაც ასეთი თვისება აქვს, პოტენციალური ეწოდება. პოტენციალური ხასიათისაა, კერძოდ, წერტილოვანი მუხტის ელექტროსტატიკური ველი.

პოტენციალური ველის მუშაობა შეიძლება გამოვსახოთ პოტენციური ენერგიის ცვლილებით.  $A = -(W_{32} - W_{31})$  ფორმულა მართებულია ნებისმიერი ელექტროსტატიკური ველისათვის. მხოლოდ იმ კერძო შემთხვევაში, როცა ველი ერთგვაროვანია პოტენციური ენერგია გამოისახება (8.20) ფორმულით.

**პოტენციალი.** ელექტროსტატიკურ ველში მუხტის პოტენციური ენერგია პროპორციულია მუხტისა. ეს მართებულია როგორც ერთგვაროვანი ველისათვის (იხ. 8.20 ფორმულა), ისე ნებისმიერისათვის. ამრიგად, პოტენციური ენერგიის შეფარდება მუხტთან დამოკიდებული არ არის ველში მოთავსებულ მუხტზე.

ეს საშუალებას გვაძლევს შემოვიტანოთ ველის ახალი რაოდენობრივი მახასიათებელი — პოტენციალი. რომელიც დამოკიდებული არ არის ველში მოთავსებულ მუხტზე. ელექტროსტატიკური ველის პოტენციალი ეწოდება ველში მოთავსებული მუხტის პოტენციური ენერგიის შეფარდებას ამ მუხტთან. სხვა სიტყვებით, პოტენციალი რიცხობრივად ტოლია ერთეული მუხტის ენერგიისა ველში.

ამ განსაზღვრის მიხედვით პოტენციალი ტოლია:

$$\varphi = \frac{W_3}{q} \quad (8.21)$$

ველის  $\vec{E}$  დაძაბულობა ვექტორია და ველის ძალურ მახასიათებელს წარმოადგენს. ის განსაზღვრავს ძალას, რომელიც  $q$  მუხტზე მოქმედებს ველის მოცემულ წერტილში.  $\varphi$  პოტენციალი სკალარია. იგი ველის ენერგეტიკული მახასიათებელია და განსაზღვრავს  $q$  მუხტის პოტენციურ ენერგიას ველის მოცემულ წერტილში.

თუ პოტენციური ენერგიის და, მაშასადამე, პოტენციალის ნულოვან დონედ უარყოფითად დამუხტულ ფირფიტას მივიღებთ





(სურ. 120), მაშინ (8.20) და (8.21) ფორმულების თანახმად, პოტენცი-  
ალი ერთგვაროვან ველში იქნება:

$$\varphi = \frac{W_a}{q} = Ed \cdot \rho \quad (8.22)$$

**პოტენციალთა სხვაობა.** პოტენციური ენერჯიის მსგავსად, პოტენციალის მნიშვნელობა მოცემულ წერტილში დამოკიდებულია იმაზე, თუ რას ავირჩევთ ნულოვან დონედ მისი ათვლისათვის. პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს არა თვით პოტენციალს წერტილში, არამედ პოტენციალის ცვლილებას, რაც დამოკიდებული არ არის პოტენციალისათვის ნულოვანი დონის არჩევაზე.

რადგან პოტენციური ენერჯია  $W_a = q\varphi$ , ამიტომ მუშაობა

$$A = -(W_{a_2} - W_{a_1}) = -q(\varphi_2 - \varphi_1) = -q\Delta\varphi \quad (8.23)$$

შემდგომ, ნაცვლად პოტენციალის ცვლილებისა ( $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ ), რომელიც წარმოადგენს ტრაექტორიის ბოლო და საწყისი წერტილების პოტენციალის მნიშვნელობათა სხვაობას, გამოვიყენებთ პოტენციალთა სხვაობას. პოტენციალთა სხვაობა ეწოდება ტრაექტორიის საწყისი და ბოლო წერტილების პოტენციალის მნიშვნელობათა სხვაობას:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = -\Delta\varphi \quad (8.24)$$

ხშირად პოტენციალთა სხვაობას ეწოდება აგრეთვე ძაბვა. უფრო მოხერხებულია გამოვიყენოთ პოტენციალთა სხვაობა ანუ  $U$  ძაბვა, ვიდრე პოტენციალის ცვლილება  $\Delta\varphi$ , განსაკუთრებით ელექტრული დენის შესწავლის დროს.

(8.23) და (8.24) ფორმულების თანახმად, პოტენციალთა სხვაობა ტოლია:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = -\Delta\varphi = \frac{A}{q} \quad (8.25)$$

ორ წერტილს შორის პოტენციალთა სხვაობა (ძაბვა) ტოლია საწყისი წერტილიდან ბოლო წერტილში მუხტის გადაადგილებისას ველის მიერ შესრულებული მუშაობის ფარდობისა ამ მუხტთან.

თუ ვიცით ძაბვა განათების ქსელში, გვეცოდინება მუშაობა, რომელიც ელექტრულ ველს შეუძლია შეასრულოს ერთეული მუხტის გადატანისას როზეტის ერთი კონტაქტიდან მეორეში ნებისმიერი ელექტრული წრედის შემთხვევაში.

**პოტენციალთა სხვაობის ერთეული.** პოტენციალთა სხვაობის ერთეულს ადგენენ (8.25) ფორმულის მიხედვით. ერთეულთა საერ-



თაშორისო სისტემაში მუშაობას გამოსახვენ ჯოულებით, მუხტს კი — კულონებით. ამიტომ ორ წერტილს შორის პოტენციალთა სხვაობა ტოლია ერთეულისა, თუ 1 კ მუხტის გადატანისას ერთი წერტილიდან მეორეში ელექტრული ველი ასრულებს 1 ჯ მუშაობას. ამ ერთეულს ვოლტი (ვ) ეწოდება.

$$1 \text{ ვ} = \frac{1 \text{ ჯ}}{1 \text{ კ}}$$



- 9 1. როგორ ველს ეწოდება პოტენციალური? 2. როგორ არის დაკავშირებული პოტენციური ენერჯიის ცვლილება მუშაობასთან? 3. რას უდრის დამუხტული ნაწილაკის პოტენციური ენერჯია ერთგვაროვან ელექტრულ ველში? 4. განსაზღვრეთ პოტენციალი. 5. რას უდრის პოტენციალთა სხვაობა ველის ორ წერტილს შორის?

### 50. წერტილოვანი მუხტის ელექტროსტატიკური ველის პოტენციალი (წასაკითხი მასალა)

$q$  წერტილოვანი მუხტის ელექტროსტატიკური ველის პოტენციალის  $r$  მანძილზე დამოკიდებულების ფორმულის გამოყვანა საკმაოდ რთულია. წერტილოვანი მუხტის ველის დაძაბულობა მანძილის შიხედვით მცირდება და პოტენციალის გასაგებად საჭიროა გამოვთვალოთ ცვლადი კულონური ძალის მუშაობა.

წერტილოვანი მუხტის ველის პოტენციალის ფორმულა ასეთია:

$$\varphi = k \frac{q}{\epsilon r}$$

(8.26)

იმისათვის, რომ დავასაბუთოთ (8.26) ფორმულის მართებულობა, ამოვხსნათ შებრუნებული ამოცანა. დავამტკიცოთ, რომ თუ წერტილოვანი მუხტის პოტენციალს (8.26) ფორმულით გამოვსახავთ, მივიღებთ კულონის კანონს.

გამოვთვალოთ მუშაობა, რომელმაც სრულდება  $q$  დადებითი წერტილოვანი მუხტის ველში  $q_0$  დადებითი მუხტის  $\Delta r = r_2 - r_1$  მცირე მანძილით გადაადგილებაზე (სურ. 121). რაკი  $\Delta r$  მცირეა,  $q_0$  და  $q$  მუხტების ურთიერთქმედების ძალა შეიძლება ჩავთვალოთ მუდმივ სიდიდედ და მუშაობა ტოლი იქნება:

$$A = F \Delta r = -q_0 (\varphi_2 - \varphi_1).$$

სურ. 121.

ეს გამოსახულება მიიღება (8.23) ფორმულიდან, თუ ველში გადაადგილებულ მუხტს  $q$ -ს ნაცვლად  $q_0$ -ით აღვნიშნავთ. ბოლო გამოსახულებაში ჩავსვათ (8.26)





ფორმულიდან მიღებული (1) და (2) წერტილების პოტენციალთა მნიშვნელობები

$$F\Delta r = -q_0 \left( k \frac{q}{\epsilon r_2} - k \frac{q}{\epsilon r_1} \right) = k \frac{q_0 q}{\epsilon} \cdot \frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2}$$

თუ  $\Delta r \ll r_2$  და  $\Delta r \ll r_1$ , მაშინ მიახლოებით  $r_1 r_2 \approx r^2$  და  $F\Delta r = k \frac{q_0 q}{\epsilon} \cdot \frac{\Delta r}{r^2}$ .

აქედან

$$F = k \frac{q_0 q}{\epsilon r^2}$$

იმის დაშვებით, რომ ელექტროსტატიკური ველის პოტენციალს აქვს (8.26) სახე, ჩვენ მავედით კულონური ძალის სწორ გამოსახულებამდე. ეს ამტკიცებს (8.26) ფორმულის მართებულობას წერტილოვანი მუხტის პოტენციალისთვის.

დადებითი მუხტის ( $q > 0$ ) ველის წერტილთა პოტენციალი აგრეთვე დადებითია ( $\varphi > 0$ ), უარყოფითისა ( $q < 0$ ) უარყოფითია ( $\varphi < 0$ ).

(8.26) ფორმულა გამოიყენება განსაზღვრული ნულოვანი პოტენციალის შერჩევის შემთხვევაში. მიღებულია რომ მუხტიდან უსასრულოდ დაშორებულ წერტილში ველის პოტენციალი ნულის ტოლია: როცა  $r \rightarrow \infty$ , მაშინ  $\varphi \rightarrow 0$ . ნულოვანი დონის ასეთი შერჩევა მოხერხებულია, მაგრამ არაა სავალდებულო. შეიძლება (8.26) პოტენციალს მივუმატოთ ნებისმიერი მუდმივი სიდიდე, ამით ველის ორ ნებისმიერ წერტილს შორის პოტენციალთა სხვაობა არ შეიცვლება, პრაქტიკული მნიშვნელობა კი სწორედ ამას აქვს.

თუ დავუშვებთ, რომ უსასრულოდ დაშორებულ წერტილთა პოტენციალი ნულია, მაშინ წერტილოვანი მუხტის ველის პოტენციალს მარტივი ფიზიკური აზრი ექნება. (8.25) ფორმულაში ჩავსვით  $\varphi_2 = 0$  მნიშვნელობა, მივიღებთ:

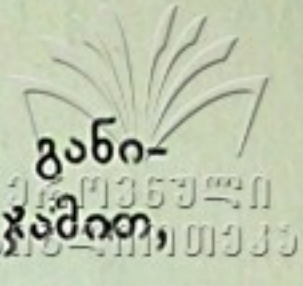
$$\varphi_1 = \varphi(r) = \frac{A}{q}$$

ამრიგად, წერტილოვანი მუხტიდან  $r$  მანძილზე ელექტროსტატიკური ველის პოტენციალი ტოლია სივრცის მოცემული წერტილიდან უსასრულობაში ერთეული დადებითი მუხტის გადაადგილებისას ველის მიერ შესრულებული მუშაობისა.

(8.26) ფორმულა მართებულია აგრეთვე თანაბრად დამუხტული სფეროს ველის პოტენციალისათვის მისი რადიუსის ტოლ ან მასზე მეტ მანძილზე, რადგან თანაბრად დამუხტული სფეროს ველი მის გარეთ და მის ზედაპირზე ემთხვევა სფეროს ცენტრში მოთავსებული წერტილოვანი მუხტის ველს.

ჩვენ განვიხილეთ წერტილოვანი მუხტის ველის პოტენციალი. ნებისმიერი სხეულის მუხტი აზრით შეიძლება დავყოთ იმდენად მცირე ელემენტებად, რომ თითოეული მათგანი მიჩნეულ იქნეს წერტილო-





ვან მუხტად. მაშინ ნებისმიერ წერტილში ველის პოტენციალი განისაზღვრება იმ  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  და ა. შ. პოტენციალთა ალგებრული ჯამით, რომლებიც შექმნილია ცალკეული წერტილოვანი მუხტებით:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots \quad (8.27)$$

ეს დამოკიდებულება ველთა სუპერპოზიციის პრინციპის შედეგია.

ორი წერტილოვანი მუხტის ურთიერთქმედების პოტენციური ენერგია. რაკი ვიცით, როგორ გამოისახება წერტილოვანი მუხტის ველის პოტენციალი, შეგვიძლია გამოვთვალოთ ორი წერტილოვანი მუხტის ურთიერთქმედების პოტენციური ენერგია. კერძოდ, ეს შეიძლება იყოს ელექტრონისა და ატომბირთვის ურთიერთქმედების ენერგია.

$q_1$  წერტილოვანი მუხტის ელექტრულ ველში  $q_2$  მუხტის პოტენციური ენერგია ტოლია  $q_2$  მუხტისა და  $q_1$  მუხტის ველის პოტენციალის ნამრავლისა:

$$W_3 = q_2 \varphi.$$

თუ გამოვიყენებთ (8.26) ფორმულას და  $q$  აღნიშვნას შევცვლით  $q_1$ -ით, მივიღებთ:

$$W_3 = q_2 \varphi = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r}.$$

თუ  $q_1$  და  $q_2$  მუხტები ერთნაირი ნიშნისაა, მათი ურთიერთქმედების პოტენციური ენერგია დადებითია. ის მით უფრო მეტია, რაც ნაკლებია მუხტებს შორის მანძილი, რადგან ამ შემთხვევაში მეტია მუხტების ურთიერთგანზიდვისას კულონური ძალების მიერ შესრულებული მუშაობა. თუ მუხტებს საპირისპირო ნიშნები აქვს, მაშინ ენერგია უარყოფითია და მისი მაქსიმალური მნიშვნელობა, რომელიც ნულის ტოლია, მიიღება, როცა  $r \rightarrow \infty$ . რაც მეტია  $r$ , მით მეტ მუშაობას შეასრულებს მიზიდვის ძალები მუხტების ურთიერთმიახლოებისას.

### 51. კავშირი ელექტრული ველის დაძაბულობასა და პოტენციალთა სხვაობას შორის. ეკვიპოტენციალური ზედაპირები

ელექტრული ველის დაძაბულობასა და პოტენციალთა სხვაობას შორის განსაზღვრული კავშირია. ვთქვათ,  $q$  მუხტი გადაადგილდა ერთგვაროვანი ველის  $\vec{E}$  დაძაბულობის მიმართულებით 1 წერტილიდან 2 წერტილში, რომელთა შორის მანძილი არის  $\Delta d$  (სურ. 122). ამ დროს ელექტრული ველი ასრულებს მუშაობას:

$$A = qE\Delta d,$$



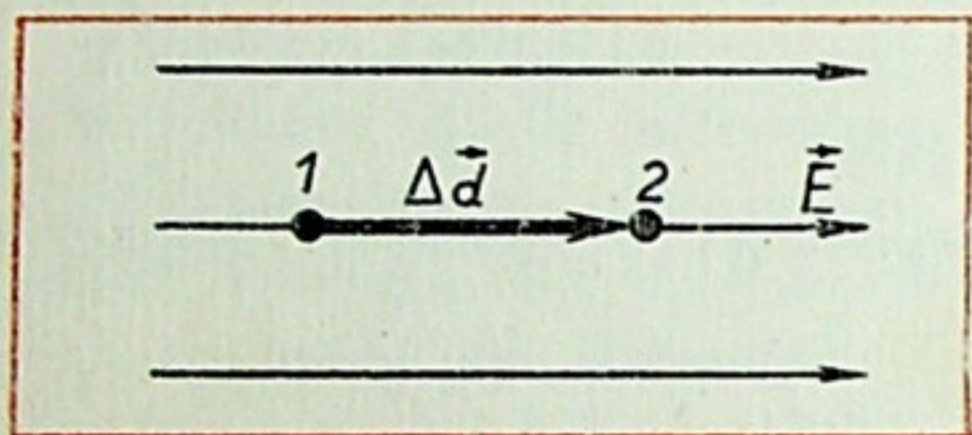
(8.25) ფორმულის თანახმად, ეს მუშაობა გამოისახება 1 და 2 წერტილების პოტენციალთა სხვაობით

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU. \quad (8.28)$$

მუშაობის ამ გამოსახულებათა გატოლებით ვიპოვიტ ველის დაძაბულობის ვექტორის მოდულს:

$$E = \frac{U}{\Delta d} \quad (8.29)$$

ამ ფორმულაში  $U$  არის პოტენციალთა სხვაობა 1 და 2 წერტილებს შორის, რომლებიც დაკავშირებულია გადაადგილების  $\Delta d$  ვექტორით (მისი მიმართულება ემთხვევა  $\vec{E}$  ვექტორის მიმართულებას (სურ. 122).



სურ. 122.

(8.29) ფორმულა გვიჩვენებს, რაც უფრო ნაკლებად იცვლება პოტენციალი  $\Delta d$  მანძილზე, მით ნაკლებია ელექტროსტატიკური ველის დაძაბულობა. თუ პოტენციალი სრულიად არ იცვლება, მაშინ ველის დაძაბულობა ნულის ტოლია.

რადგან  $E$  ვექტორის მიმართულებით დადებითი მუხტის

გადაადგილებისას ელექტრული ველი  $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$  დადებით მუშაობას ასრულებს, ამიტომ  $\varphi_1$  პოტენციალი მეტია  $\varphi_2$  პოტენციალზე. მაშასადამე, ელექტრული ველის დაძაბულობა მიმართულია პოტენციალის ვარდნის მიმართულებით.

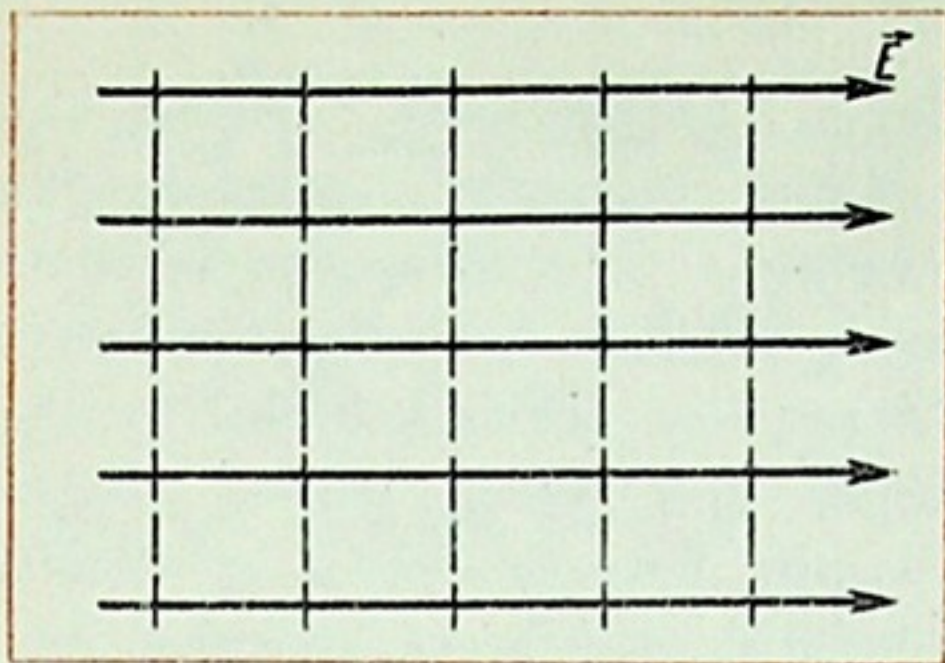
ნებისმიერი ელექტროსტატიკური ველი სივრცის მცირე ნაწილში შეიძლება ერთგვაროვნად ჩაითვალოს. ამიტომ (8.29) ფორმულა მართებულია ნებისმიერი ელექტროსტატიკური ველისათვის, თუკი  $\Delta d$  მანძილი იმდენად მცირეა, რომ მასზე ველის დაძაბულობის ცვლილება შეიძლება უგულებელვყოთ.

**ელექტრული ველის დაძაბულობის ერთეული.** ერთეულთა SI სისტემაში ელექტრული ველის დაძაბულობის ერთეულს ადგენენ პოტენციალთა სხვაობის ერთეულის საფუძველზე (8.28) ფორმულის მიხედვით. ველის დაძაბულობა ერთეულის ტოლია, თუ ერთგვაროვან ველში ერთიმეორისაგან 1 მ-ით დაშორებული ორი წერტილის პოტენციალთა სხვაობა 1 ვ-ია. ამ ერთეულს ეწოდება ვოლტი მეტრზე (ვ/მ).

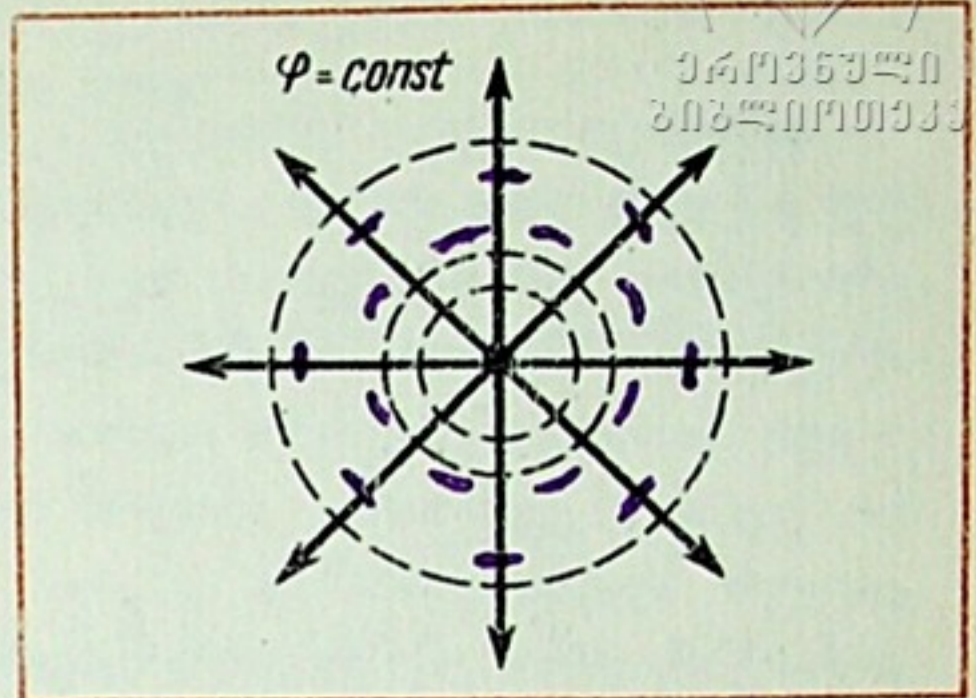
როგორც ვთქვით, დაძაბულობა შეიძლება აგრეთვე გამოვსახოთ ნიუტონებით კულონზე, მართლაც.

$$1 \frac{\text{ვ}}{\text{მ}} = 1 \frac{\text{ჯ}}{\text{კ}} \cdot \frac{1}{\text{მ}} = 1 \frac{\text{მ} \cdot \text{ნ}}{\text{კ}} \cdot \frac{1}{\text{მ}} = 1 \frac{\text{ნ}}{\text{კ}}$$





სურ. 123.



სურ. 124.

ეკვიპოტენციალური ზედაპირები. ძალწირებისადმი მუხტის  $90^\circ$ -იანი კუთხით გადაადგილების დროს ველი მუშაობას არ შეასრულებს, რადგან ძალა გადაადგილების მართობია. ე. ი. თუ თითოეულ წერტილში გავავლებთ ძალწირების მართობ ზედაპირს, მის გასწვრივ მუხტის გადაადგილებისას მუშაობა არ სრულდება. ეს კი ნიშნავს, რომ ძალწირების მართობი ზედაპირის ყველა წერტილს ერთი და იგივე პოტენციალი აქვს. ტოლი პოტენციალის ზედაპირებს ეკვიპოტენციალური ზედაპირები ეწოდება.

ერთგვაროვანი ველის ეკვიპოტენციალური ზედაპირები სიბრტყეებია (სურ. 123), წერტილოვანი მუხტისა კი — კონცენტრული სფეროები (სურ. 124).

ძალწირების მსგავსად, ეკვიპოტენციალური ზედაპირები თვისებრივად ახასიათებს ველის განაწილებას სივრცეში. დაძაბულობის ვექტორი მართობულია ეკვიპოტენციალური ზედაპირისა და მიმართულია პოტენციალის დაცემის მხარეს. მაგალითად, წერტილოვანი დადებითი მუხტის ველის პოტენციალი კლებულობს მუხტიდან დაშორების მიხედვით, ველის დაძაბულობაც მიმართულია მუხტიდან კონცენტრული სფეროების რადიუსების გასწვრივ (სურ. 124).

ნებისმიერი გამტარის ზედაპირი ეკვიპოტენციალურია ელექტროსტატიკურ ველში, რადგან ველის ძალწირები გამტარის ზედაპირის მართობულია. ამავე დროს, არა მარტო ზედაპირს, არამედ ყველა წერტილს გამტარის შიგნით ერთი და იგივე პოტენციალი აქვს. ველის დაძაბულობა გამტარის შიგნით ნულის ტოლია, ე. ი. ნულია პოტენციალთა სხვაობაც გამტარის ნებისმიერ ორ წერტილს შორის.



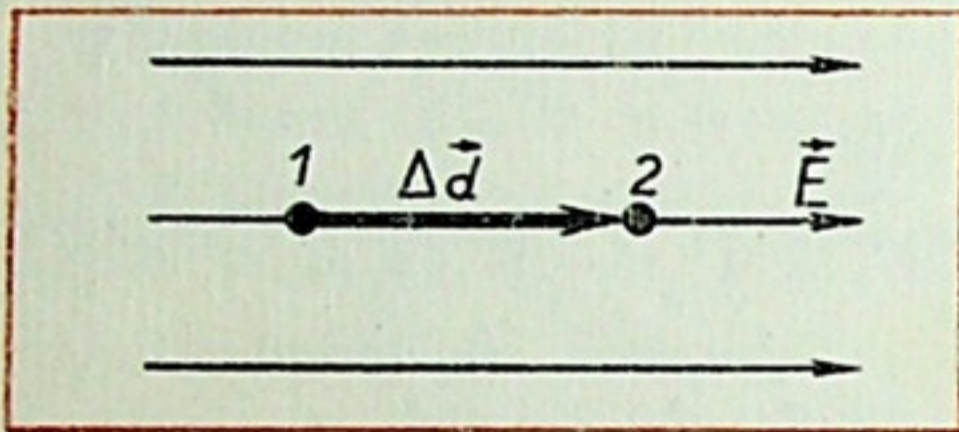
(8.25) ფორმულის თანახმად, ეს მუშაობა გამოისახება 1 და 2 წერტილების პოტენციალთა სხვაობით

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU. \quad (8.28)$$

მუშაობის ამ გამოსახულებათა გატოლებით ვიპოვიტ ველის დაძაბულობის ვექტორის მოდულს:

$$E = \frac{U}{\Delta d} \quad (8.29)$$

ამ ფორმულაში  $U$  არის პოტენციალთა სხვაობა 1 და 2 წერტილებს შორის, რომლებიც დაკავშირებულია გადაადგილების  $\Delta d$  ვექტორით (მისი მიმართულება ემთხვევა  $\vec{E}$  ვექტორის მიმართულებას (სურ. 122).



სურ. 122.

(8.29) ფორმულა გვიჩვენებს, რაც უფრო ნაკლებად იცვლება პოტენციალი  $\Delta d$  მანძილზე, მით ნაკლებია ელექტროსტატიკური ველის დაძაბულობა. თუ პოტენციალი სრულიად არ იცვლება, მაშინ ველის დაძაბულობა ნულის ტოლია.

რადგან  $E$  ვექტორის მიმართულებით დადებითი მუხტის

გადაადგილებისას ელექტრული ველი  $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$  დადებით მუშაობას ასრულებს, ამიტომ  $\varphi_1$  პოტენციალი მეტია  $\varphi_2$  პოტენციალზე. მაშასადამე, ელექტრული ველის დაძაბულობა მიმართულია პოტენციალის ვარდნის მიმართულებით.

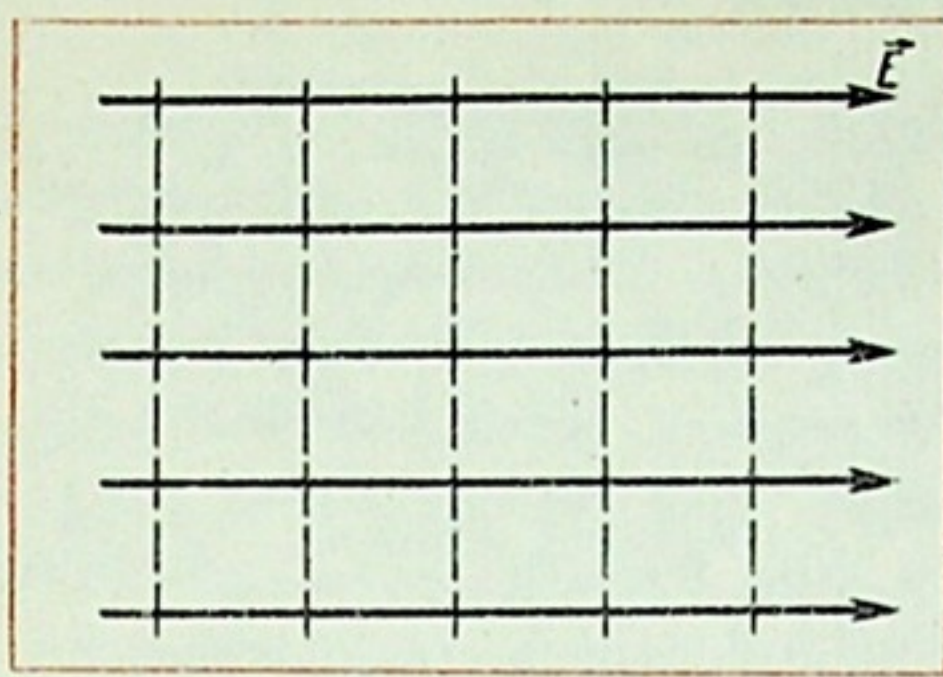
ნებისმიერი ელექტროსტატიკური ველი სივრცის მცირე ნაწილში შეიძლება ერთგვაროვნად ჩაითვალოს. ამიტომ (8.29) ფორმულა მართებულია ნებისმიერი ელექტროსტატიკური ველისათვის, თუკი  $\Delta d$  მანძილი იმდენად მცირეა, რომ მასზე ველის დაძაბულობის ცვლილება შეიძლება უგულებელვყოთ.

**ელექტრული ველის დაძაბულობის ერთეული.** ერთეულთა SI სისტემაში ელექტრული ველის დაძაბულობის ერთეულს ადგენენ პოტენციალთა სხვაობის ერთეულის საფუძველზე (8.28) ფორმულის მიხედვით. ველის დაძაბულობა ერთეულის ტოლია, თუ ერთგვაროვან ველში ერთიმეორისაგან 1 მ-ით დაშორებული ორი წერტილის პოტენციალთა სხვაობა 1 ვ-ია. ამ ერთეულს ეწოდება ვოლტი მეტრზე (ვ/მ).

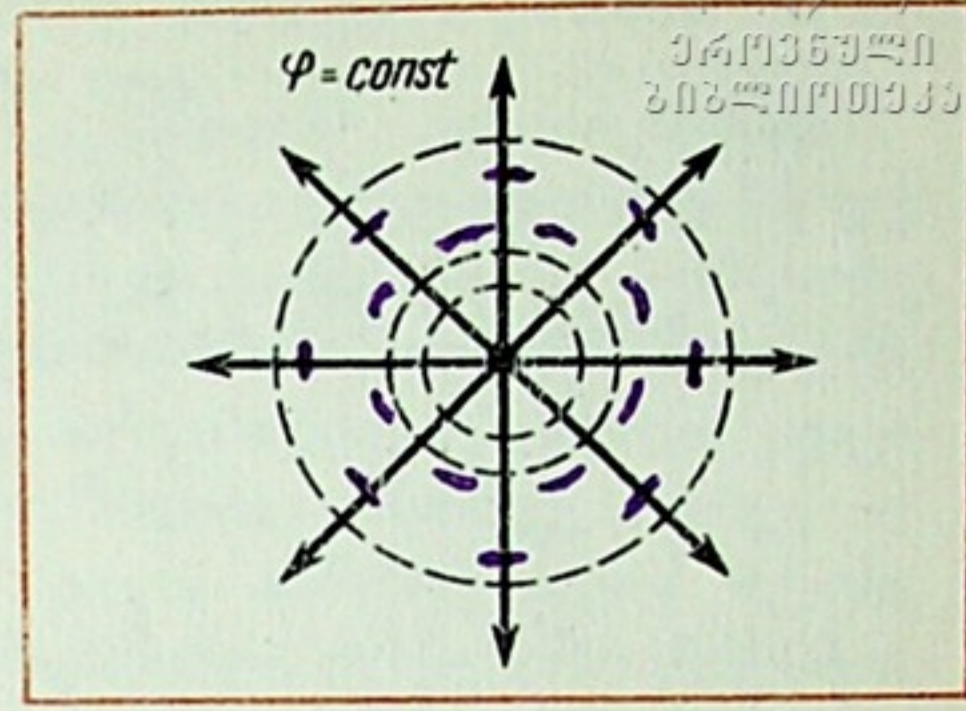
როგორც ვთქვით, დაძაბულობა შეიძლება აგრეთვე გამოვსახოთ ნიუტონებით კულონზე, მართლაც.

$$1 \frac{\text{ვ}}{\text{მ}} = 1 \frac{\text{ჯ}}{\text{კ}} \cdot \frac{1}{\text{მ}} = 1 \frac{\text{მ} \cdot \text{ნ}}{\text{კ}} \cdot \frac{1}{\text{მ}} = 1 \frac{\text{ნ}}{\text{კ}} \quad \checkmark$$





სურ. 123.



სურ. 124.

ეკვიპოტენციალური ზედაპირებია. ძალწირებისადმი მუხტის  $90^\circ$ -იანი კუთხით გადაადგილების დროს ველი მუშაობას არ შეასრულებს, რადგან ძალა გადაადგილების მართობია. ე. ი. თუ თითოეულ წერტილში გავავლებთ ძალწირების მართობ ზედაპირს, მის გასწვრივ მუხტის გადაადგილებისას მუშაობა არ სრულდება. ეს კი ნიშნავს, რომ ძალწირების მართობი ზედაპირის ყველა წერტილს ერთი და იგივე პოტენციალი აქვს. ტოლი პოტენციალის ზედაპირებს ეკვიპოტენციალური ზედაპირები ეწოდება.

ერთგვაროვანი ველის ეკვიპოტენციალური ზედაპირები სიბრტყეებია (სურ. 123), წერტილოვანი მუხტისა კი — კონცენტრული სფეროები (სურ. 124).

ძალწირების მსგავსად, ეკვიპოტენციალური ზედაპირები თვისებრივად ახასიათებს ველის განაწილებას სივრცეში. დაძაბულობის ვექტორი მართობულია ეკვიპოტენციალური ზედაპირისა და მიმართულია პოტენციალის დაცემის მხარეს. მაგალითად, წერტილოვანი დადებითი მუხტის ველის პოტენციალი კლებულობს მუხტიდან დაშორების მიხედვით, ველის დაძაბულობაც მიმართულია მუხტიდან კონცენტრული სფეროების რადიუსების გასწვრივ (სურ. 124).

ნებისმიერი გამტარის ზედაპირი ეკვიპოტენციალურია ელექტროსტატიკურ ველში, რადგან ველის ძალწირები გამტარის ზედაპირის მართობულია. ამავ დროს, არა მარტო ზედაპირს, არამედ ყველა წერტილს გამტარის შიგნით ერთი და იგივე პოტენციალი აქვს. ველის დაძაბულობა გამტარის შიგნით ნულის ტოლია, ე. ი. ნულია პოტენციალთა სხვაობაც გამტარის ნებისმიერ ორ წერტილს შორის.



## 52. პოტენციალთა სხვაობის გაზომვა



ეროვნული  
ბიბლიოთეკა

პოტენციალთა სხვაობას ზომავენ ხელსაწყოთი, რომელსაც ელექტრომეტრი ეწოდება. 125-ე სურათზე გამოსახულია ერთ-ერთი უმარტივესი ელექტრომეტრი. მისი მთავარი ნაწილია ალუმინის მსუბუქი ისარი, რომელიც ლითონის ღეროზეა მიმაგრებული ჰორიზონტალური ღერძის საშუალებით. ისრის სიმძიმის ცენტრი ღერძის ქვემოთაა, ამიტომ გაზომვის დაწყებამდე ისარი ვერტიკალურ მდებარეობაშია, ღერო ისრიანად მოთავსებულია ლითონის კორპუსში, რომელიც ღეროსაგან ებონიტის საცობითაა იზოლირებული. ისარს ვაკვირდებით საჭვრეტი სარკმლიდან. ელექტრომეტრი მოგვაგონებს ელექტროსკოპს, მაგრამ მისგან განსხვავებით აქვს ლითონის კორპუსი.

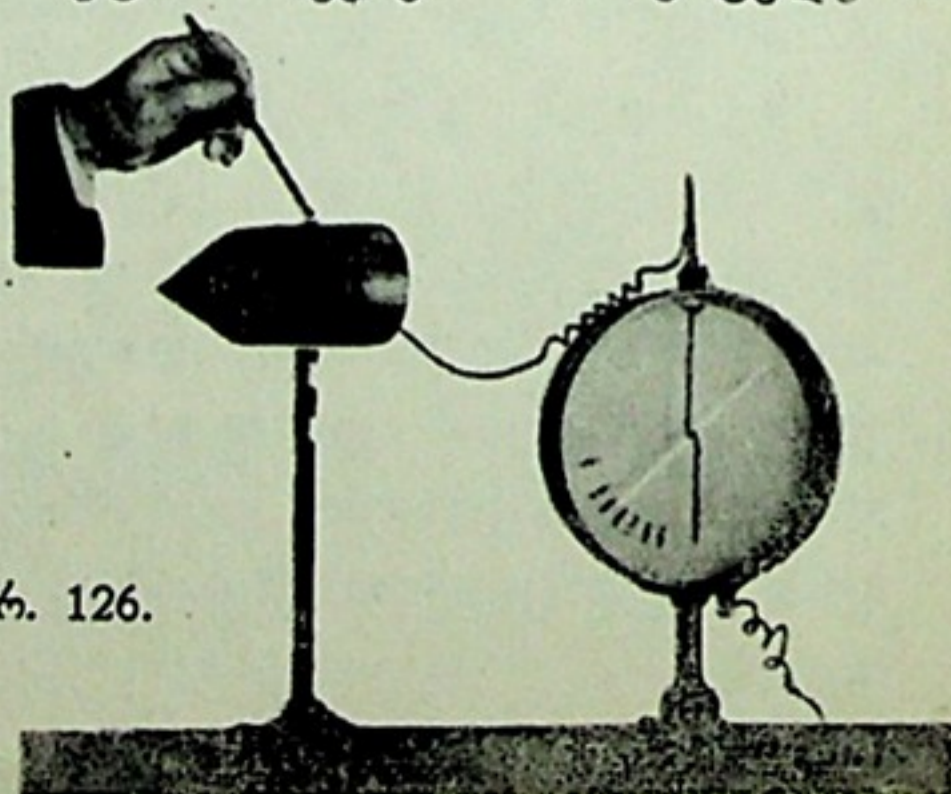
ორ გამტარს შორის პოტენციალთა სხვაობის გასაზომად ერთ მათგანს უერთებენ ელექტრომეტრის ღეროს, მეორეს კი — მის კორპუსს (როცა პოტენციალს დედამიწის მიმართ ზომავენ, ღეროს სხეულთან აერთებენ, კორპუსს კი ჩაამიწებენ). ღეროსა და კორპუსს შორის მყარდება გასაზომი პოტენციალთა სხვაობა. ელექტრომეტრის შიგნით ელექტრული ველი მხოლოდ ამ პოტენციალთა სხვაობაზეა დამოკიდებული, რადგან დამუხტულ ან პოლარიზებულ სხეულთა გარე ელექტროსტატიკური ველი ხელსაწყოს ლითონის კორპუსში ვერ შეაღწევს (ელექტროსტატიკური დაცვა). ელექტრომეტრის შიგნით ველის განაწილება კი ცალსახად განსაზღვრავს ისარზე მოქმედ ძალებს. ისრის მდებარეობის მიხედვით რომ პოტენციალთა სხვაობა გავზომოთ, საჭიროა ხელსაწყო დავაგრადუიროთ. ამისათვის უნდა დადგინდეს თუ ისრის გადახრის რა კუთხეები შეესაბამება დამუხტულ გამტარებს შორის ძაბვის ცნობილ მნიშვნელობებს.

ელექტრომეტრის საშუალებით ადვილად დავრწმუნდებით, რომ გამტარის ყველა წერტილს დედამიწის მიმართ ერთნაირი პოტენციალი აქვს. ამისათვის გამტარის სხვადასხვა უბანი მორიგეობით შევაერთოთ ელექტრომეტრის ღეროსთან, ხელსაწყოს კორპუსი კი ჩავამიწოთ (სურ. 126). ამ დროს ელექტრომეტრის ჩვენება არ შეიცვლება.

სურ. 125.



სურ. 126.





7. 1. რას უდრის წერტილოვანი მუხტის ველის პოტენციალი? 2. როგორაა დაკავშირებული პოტენციალთა სხვაობა ელექტრული ველის დაძაბულობასთან? 3. როგორ უნდა გვესმოდეს პოტენციალთა სხვაობის ერთეული — 1 ვოლტი? 4. რას უდრის პოტენციალთა სხვაობა დამუხტული გამტარის ორ წერტილს შორის? 5. რას გამოსახავს ამ წიგნის გარეკანის მარცხენა მხარეს გამოსახული წვრილი თეთრი წირები.

### ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები

ელექტრული ველის დაძაბულობის შესახებ ამოცანების ამოხსნისას, პირველ ყოვლისა უნდა ვიცოდეთ (8.10) და (8.15). ფორმულები. მათი საშუალებით განისაზღვრება ელექტრულ ველში მოთავსებულ მუხტზე მოქმედი ძალა და წერტილოვანი მუხტის ველის დაძაბულობა. თუ ველი შექმნილია რამდენიმე წერტილოვანი მუხტით, მაშინ მისი დაძაბულობა ტოლია ცალკეულ მუხტთა ველების დაძაბულობათა გეომეტრიული ჯამისა.

ველში მუხტზე მოქმედი ძალის მიერ შესრულებული მუშაობა გამოისახება პოტენციურ ენერგიათა სხვაობით ან პოტენციალთა სხვაობით (8.28 ფორმულა). ერთგვაროვანი ველის პოტენციალი (8.22) ფორმულით განისაზღვრება.

ხშირად ამოცანების ამოხსნისას მხედველობაში უნდა მივიღოთ, რომ ელექტროსტატიკურ ველში გამტარის ყველა წერტილს აქვს ერთნაირი პოტენციალი, გამტარის შიგნით დაძაბულობა კი ნულის ტოლია.

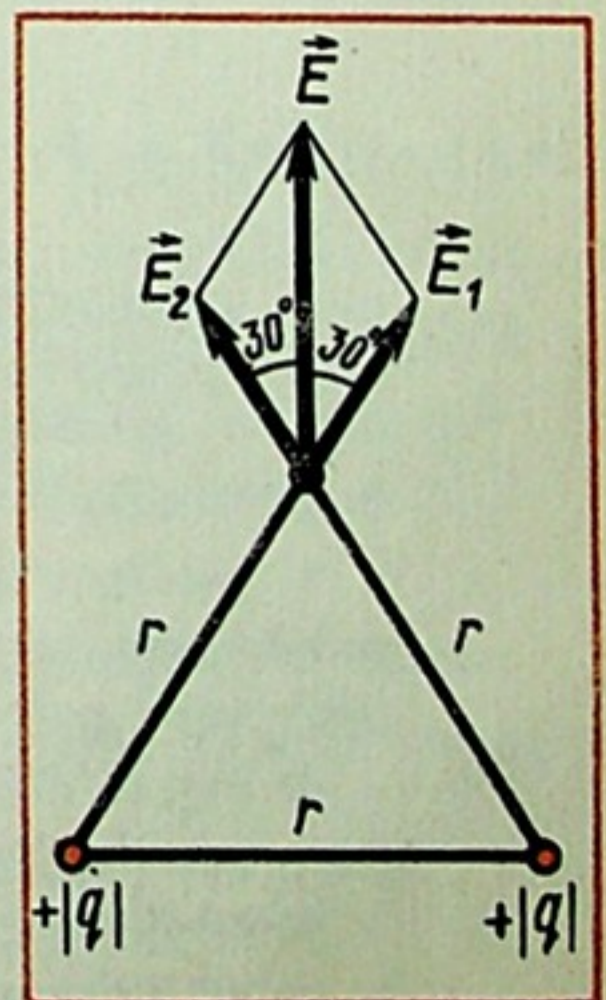
1. ორი ერთნაირი დადებითი წერტილოვანი მუხტი მოთავსებულია ერთმანეთიდან  $r$  მანძილზე ერთგვაროვან გარემოში. რომლის დიელექტრიკული შეღწევადობა არის  $\epsilon$ . ვიპოვოთ ელექტრული ველის დაძაბულობა და პოტენციალი წერტილში, რომელიც ერთნაირ  $r$  მანძილზეა ამ მუხტებიდან.

ამოხსნა. სუპერპოზიციის პრინციპის თანახმად საპოვნია  $\vec{E}$  დაძაბულობა ტოლია ცალკეული მუხტების ველთა დაძაბულობების გეომეტრიული ჯამისა (სურ. 127). მუხტების ველთა დაძაბულობების მოდული ერთი და იგივეა:

$$E_1 = E_2 = k \frac{|q|}{\epsilon r^2}.$$

$\vec{E}_1$  და  $\vec{E}_2$  ვექტორებზე აგებული პარალელოგრამის დიაგონალი არის დაძაბულობა ჯამური ველისა, რომლის მოდული ტოლია:

$$E = 2E_1 \cos 30^\circ = 2k \frac{|q|}{\epsilon r^2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = k \frac{|q| \sqrt{3}}{\epsilon r^2}.$$



სურ. 127.



2.  $r=0,2$  მ რადიუსის გამტარი სფერო დამუხტულია  $q=8 \cdot 10^5$  ვ პოტენციალამდე და მოთავსებულია დიელექტრიკში, რომლის დიელექტრიკული შეღწევადობა  $\epsilon=27$ . განსაზღვრეთ: 1) სფეროს მუხტი; 2) ელექტრული ველის  $E$  დაძაბულობის მოდული სფეროს ზედაპირზე; 3)  $E_1$  დაძაბულობის მოდული ელექტრული ველის იმ წერტილში, რომელიც სფეროს ცენტრიდან დაშორებულია  $r_1=10$  მ მანძილით; 4)  $E_0$  დაძაბულობის მოდული და  $\varphi_0$  პოტენციალი სფეროს ცენტრში.

ამოხსნა. დამუხტული სფეროს ელექტრული ველი სფეროს გარეთ ისეთივეა, როგორიც წერტილოვანი მუხტის ველი. ამიტომ

$$\varphi = k \frac{q}{\epsilon r}; \quad E = k \frac{|q|}{\epsilon r^2} e$$

მაშასადამე,

$$1) q = \frac{1}{k} \epsilon r \varphi \approx 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ კ},$$

$$2) E = k \frac{|q|}{\epsilon r^2} = \frac{\varphi}{r} \approx 1,5 \cdot 10^6 \text{ ვ/მ};$$

$$3) E_1 = k \frac{|q|}{\epsilon r_1^2} = \frac{r \varphi}{r_1^2} \approx 600 \text{ ვ/მ}.$$

4)  $q > 0$  მუხტი თანაბრადაა განაწილებული სფეროს ზედაპირზე. გამტარი სფეროს შიგნით ნებისმიერ წერტილში ველის დაძაბულობა ნულის ტოლია:  $E_0 = 0$ . ამიტომ სფეროს შიგნით ყველა წერტილის პოტენციალი ერთნაირი უნდა იყოს.

$$\varphi_0 = \varphi_0$$

### ს ა ვ ა რ ჭ ი შ ო 9

1. ვერტიკალურად ქვემოთ მიმართულ  $1,3 \cdot 10^5$  ვ/მ დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტრულ ველში მოთავსებული  $2 \cdot 10^{-9}$  გ მასის წვეთი წონასწორობაში აღმოჩნდა. განსაზღვრეთ წვეთის მუხტი და ჭარბი ელექტრონების რიცხვი მასზე.

2. დახაზეთ გრაფიკი, რომელიც გვიჩვენებს, როგორაა დამოკიდებული დამუხტული გამტარი სფეროს ველის დაძაბულობის მოდული სფეროს ცენტრიდან დაშორებაზე.

3. რატომ იზიდავს დამუხტული სავარცხელი ელექტრულად ნეიტრალურ ქაღალდის ნაკუწებს?

4. ელექტრული მუხტი  $q_1 > 0$  გადაადგილეს  $ABCD$  ჩაკეტილ კონტურზე  $q_2 > 0$  წერტილოვანი მუხტის ველში (სურ. 128). რა უბნებზე იყო ველის მუშაობა მუხტის გადატანისას დადებითი? უარყოფითი? ნულის ტოლი?



როგორ იცვლებოდა სისტემის პოტენციური ენერგია? რას უდრის მუხტის გადატანისას შესრულებული სრული მუშაობა?

5. ელექტრულ ველში მოძრაობისას ელექტრონი გადავიდა ერთი წერტილიდან მეორეში, რომლის პოტენციალი 1 ვ-ით უფრო მაღალია. რამდენით შეიცვალა ელექტრონის კინეტიკური ენერგია? პოტენციური?

6.  $q_1 > 0$  და  $q_2 > 0$  წერტილოვანი მუხტები მოთავსებულია ტოლგვერდა სამკუთხედის ორ წვეროში. სამკუთხედის გვერდია  $r$ . იპოვეთ დაძაბულობის ვექტორის მოდული მესამე წვეროში, თუ გარემოს დიელექტრიკული შეღწევადობა არის  $\epsilon$ .

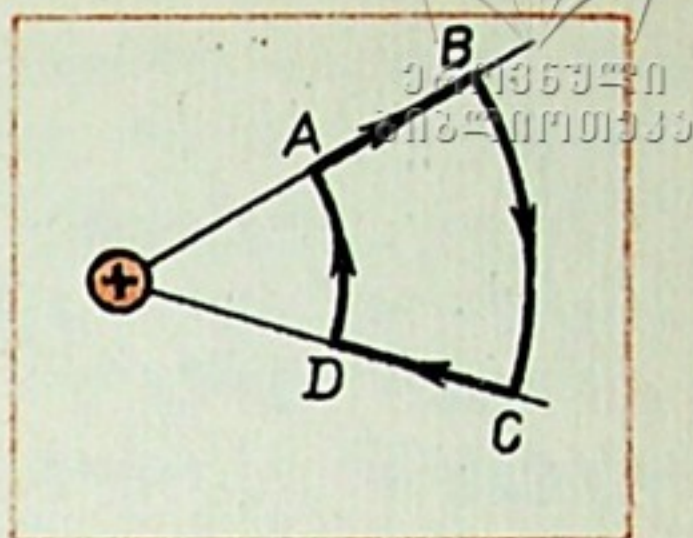
7. ელექტროსტატიკური ველის პოტენციალი იზრდება ქვევიდან ზევით, საითაა მიმართული ველის დაძაბულობის ვექტორი?

8. ერთ ძალწირზე მდებარე ორ წერტილს შორის, რომლებიც ერთმანეთიდან 3 სმ-ით არიან დაშორებული, პოტენციალთა სხვაობაა 120 ვ. იპოვეთ ელექტროსტატიკური ველის დაძაბულობა, თუ ცნობილია, რომ ველი ერთგვაროვანია.

9. გამოსახეთ თანაბრად დამუხტული უსასრულო გამტარი ცილინდრის ეკვიპოტენციალური ზედაპირები.

10. ელექტრულ ველში მოძრაობისას ელექტრონის სიჩქარე გაიზარდა  $v_1 = 1 \cdot 10^7$  მ/წმ-დან  $v_2 = 3 \cdot 10^7$  მ/წმ-დე. იპოვეთ პოტენციალთა სხვაობა ელექტრონის გადაადგილების საწყის და ბოლო წერტილებს შორის. ელექტრონის მუხტის შეფარდება მასასთან ტოლია:

$$\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ კ/კგ.}$$



სურ. 128.

### ნვ. ელექტროტევადობა. ელექტროტევადობის ერთეულები

სხეულის ნებისმიერი ხერხით დამუხტვის დროს — ხახუნის, ელექტროსტატიკური მანქანის, გალვანური ელემენტის, თუ სხვა რაიმე საშუალებით — თავდაპირველად ნეიტრალური სხეული იმუხტება იმის გამო, რომ დამუხტულ ნაწილაკთა რაღაც რაოდენობა გადადის ერთი სხეულიდან მეორეში. ჩვეულებრივ ასეთი ნაწილაკებია ელექტრონები.

გავარკვიოთ პრაქტიკულად მნიშვნელოვანი საკითხი: რა პირობებში შეიძლება გამტარ სხეულზე დიდი ელექტრული მუხტის დაგროვება?

ორი გამტარის დამუხტვის დროს (მაგალითად, ელექტროსტატიკური მანქანით) ერთი მათგანი დებულობს  $+|q|$  მუხტს, მეორე  $-|q|$ -ს. გამტარებს შორის შეიქმნება ელექტრული ველი და აღიძვ-



2.

რება პოტენციალთა სხვაობა (ძაბვა). ძაბვის გადიდებით შორის ელექტრული ველი ძლიერდება.

ძლიერ ელექტრულ ველში (დიდი ძაბვის დროს) დიელექტრიკი (მაგალითად, ჰაერი) გამტარად იქცევა. ხდება დიელექტრიკის ე. წ. „გარღვევა“: გამტარებს შორის გახტება ნაპერწკალი და ისინი განიმუხტებიან.

რაც უფრო ნელა იზრდება ძაბვა გამტარებს შორის მათი მუხტების გადიდებისას, მით მეტი მუხტი შეიძლება დაგროვდეს გამტარებზე.

**ელექტროტევადობა.** [შემოვიღოთ ფიზიკური სიდიდე, რომელიც ორი გამტარის მიერ ელექტრული მუხტის დაგროვების უნარს ახასიათებს. ამ სიდიდეს ელექტროტევადობა ეწოდება.]

ორ გამტარს შორის  $U$  ძაბვა პროპორციულია ელექტრული მუხტისა, რომელიც გამტარებზეა მოთავსებული. (ერთზე  $+|q|$  მეორეზე კი  $-|q|$ ). ეს გამომდინარეობს საპერპოზიციის პრინციპიდან. თუ მუხტებს გავაორკეცებთ, ელექტრული ველის დაძაბულობაც გაორკეცდება. მაშასადამე, ერთეული მუხტის გადაადგილებისას ველის მიერ შესრულებული მუშაობა ორჯერ გაიზრდება, ე. ი. ორჯერ გაიზრდება ძაბვა. ამიტომ ერთ-ერთი გამტარის  $q$  მუხტის (მეორეზე იმავე მოდულის მუხტია) შეფარდება ამ გამტარსა და მეზობელ გამტარს შორის არსებულ პოტენციალთა სხვაობასთან დამოკიდებული არაა მუხტზე. ის განისაზღვრება მხოლოდ გამტართა გეომეტრიული ზომებით, მათი ფორმითა და ურთიერთგანლაგებით, აგრეთვე გარემოს ელექტრული თვისებებით (ε დიელექტრიკული შეღწევადობით). ეს საშუალებას გვაძლევს შემოვიღოთ ორი გამტარის ელექტროტევადობის ცნება.

[ორი გამტარის ელექტროტევადობა ეწოდება ერთ-ერთი გამტარის მუხტის შეფარდებას ამ გამტარსა და მეზობელ გამტარს შორის არსებულ პოტენციალთა სხვაობაზე:

$$C = \frac{q}{U}$$



(8.30)

რაც უფრო ნაკლებ  $U$  ძაბვას იძლევა გამტარზე  $+|q|$  და  $-|q|$  მუხტების გადაცემა, მით მეტია გამტართა ელექტროტევადობა. გამტარებზე შეიძლება დავაგროვოთ დიდი მუხტები ისე, რომ არ გამოიწვიოს დიელექტრიკის გარღვევა. მაგრამ თვით ელექტროტევადობა დამოკიდებული არ არის არც იმაზე, თუ რა სიდიდის მუხტები გადავეციტ გამტარებს და არც აღძრულ ძაბვაზე.





ზოგჯერ ვლამარაკობთ ერთი გამტარის ელექტროტევადობის შესახებ. ამას აზრი აქვს მაშინ, როცა გამტარი განცალკევებულია, ე. ი. სხვა გამტარებიდან დაშორებულია ბევრად აღემატება მის ზომებს. მაგალითად, ლამარაკობენ გამტარი სფეროს ელექტროტევადობის შესახებ. ამ დროს გულისხმობენ, რომ მეორე გამტარის როლს ასრულებს სფეროს ირგვლივ მყოფი მისგან დაშორებული საგნები.

ელექტროტევადობის ერთეულები. (8.30) ფორმულა საშუალებას გვაძლევს შემოვიღოთ ელექტროტევადობის ერთეულები.

ორი გამტარის ელექტროტევადობა ერთეულის ტოლია, თუ  $+1$  კ და  $-1$  კ მუხტების გადაცემისას ამ გამტართა შორის  $1$  ვ პოტენციალთა სხვაობა აღიძვრება. ამ ერთეულს ფარადა (ფ) ეწოდება.  $1 \text{ ფ} = 1 \text{ კ}^2/\text{ვ}$ .

იმის გამო, რომ  $1$  კ მუხტი ძალიან დიდია,  $1$  ფ ტევადობა ასევე ძალიან დიდია. ამიტომ პრაქტიკაში ფართოდ სარგებლობენ ამ ერთეულის ნაწილებით:

მიკროფარადა (მკფ)  $10^{-6}$  ფ და პიკოფარადა (პფ)  $10^{-12}$  ფ

#### 54. კონდენსატორი. ბრტყელი კონდენსატორის ელექტროტევადობა

დიდი ელექტროტევადობა აქვს ორი გამტარისგან შემდგარ სისტემას, რომელსაც კონდენსატორი ეწოდება. კონდენსატორი წარმოადგენს ორ გამტარს, რომლებიც ერთმანეთისაგან გამოყოფილია დიელექტრიკის ფენით (ფენის სისქე მცირეა გამტარის ზომებთან შედარებით). გამტარებს ამ შემთხვევაში კონდენსატორის შედგენილობები ეწოდება.

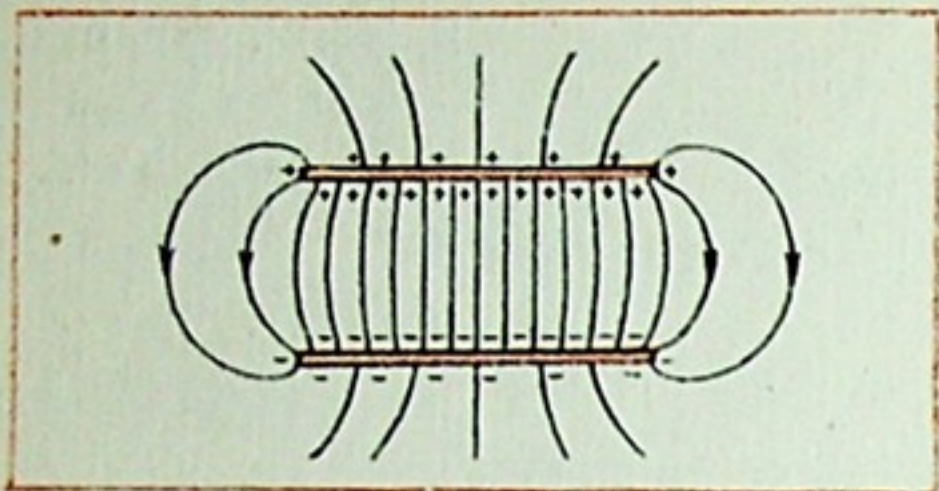
უმარტივესი ბრტყელი კონდენსატორი შედგება ორი ერთნაირი პარალელური ფირფიტისაგან, რომლებიც ერთმანეთთან ახლოს არიან (სურ. 129). თუ ფირფიტების მუხტები მოდულით ერთნაირი და ნიშნით საპირისპიროა, მაშინ ელექტრული ველის ძაღწირები იწყება კონდენსატორის დადებითად დამუხტულ შემონაფენზე და მთავრდება უარყოფითად დამუხტულზე. ამიტომ თითქმის მთელი ელექტრული ველი თავმოყრილია კონდენსატორის შიგნით.

სფერულ კონდენსატორში, რომელიც ორი კონცენტრული სფეროსაგან შედგება, მთელი ველი სფეროებს შორის არის მოქცეული.

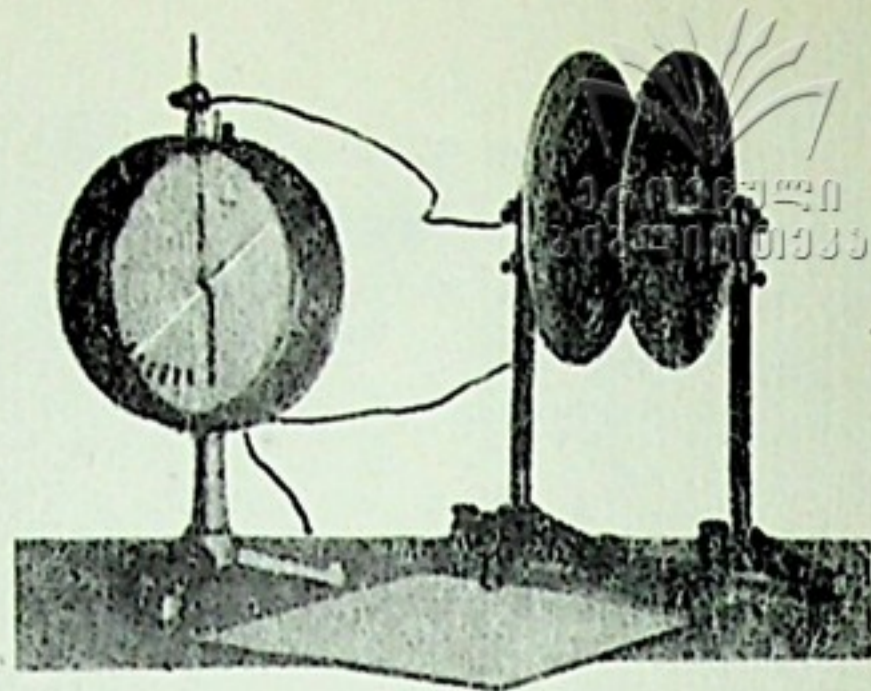
კონდენსატორის დასამუხტავად საჭიროა მისი შემონაფენები შევეერთოთ ძაბვის წყაროს პოლუსებს, მაგალითად, აკუმულატორთა

კონდენსატორი ქართულად ნიშნავს „შემკვრივებელს“, ამ შემთხვევაში „ელექტრული მუხტის შემკვრივებელს“.





სურ. 129.



სურ. 130

ბატარეისას. შეიძლება აგრეთვე ერთი შემონაფენი შევუერთოთ იმ ბატარეის პოლუსს, რომლის მეორე პოლუსი ჩამიწებულა, მეორე შემონაფენი კი ჩავამიწოთ. ამ დროს ჩამიწებულ შემონაფენზე დარჩება მუხტი, რომელიც ნიშნით საპირისპირო და მოდულით ტოლი იქნება მეორე შემონაფენის მუხტისა. მოდულით ასეთივე მუხტი მიწაში გადავა.

ერთ-ერთი შემონაფენის მუხტის აბსოლუტური მნიშვნელობას კონდენსატორის მუხტი ეწოდება.

კონდენსატორის ელექტროტევადობა განისაზღვრება (8.30) ფორმულით:

გარემომცველ სხეულთა ველები თითქმის ვერ აღწევს კონდენსატორის შიგნით და ვერ ახდენს გავლენას შემონაფენებს შორის არსებულ პოტენციალთა სხვაობაზე. ამიტომ კონდენსატორის ტევადობა პრაქტიკულად დამოკიდებული არ არის მის მახლობლად რაიმე სხეულთა არსებობაზე.

პირველი კონდენსატორი, რომელსაც ლეიდენის ქილა უწოდეს შეიქმნა XVIII საუკუნის შუა ხანებში. გამორკვეულ იქნა, რომ ვერცხლისწყლიან მინის ქილაში ჩადგმული ლურსმანი დიდ ელექტრულ მუხტს აგროვებს. ასეთ კონდენსატორში ვერცხლისწყალი ასრულებდა ერთ-ერთი შემონაფენის როლს, ქილის დამჭერი ექსპერიმენტატორის ხელის გული კი — მეორისას. შემდეგში ორივე შემონაფენს ამზადებდნენ თხელი თითბრის ან კალაფირისაგან.

ბრტყელი კონდენსატორის ელექტროტევადობა. გამოვთვალოთ ბრტყელი კონდენსატორის ტევადობა. აღვნიშნოთ თითოეული მისი ფირფიტის ფართობი  $S$ -ით, ფირფიტებს შორის მანძილი კი —  $d$ -ით. (8.30) ფორმულით ტევადობის გამოსათვლელად საჭიროა  $U$  პოტენციალი, სხვაობა გამოვსახოთ  $q$  მუხტით. ეს პოტენციალთა სხვაობა განისაზღვრება ველის  $E$  დაძაბულობით, რომელიც კონდენსატორის შემონაფენთა მუხტებზეა დამოკიდებული.



ერთ-ერთი ფირფიტის მიერ შექმნილი ველის  $E_1$  დაძაბულობა გამოითვლება (8.16) ფორმულით. დადებითად და უარყოფითად დამუხტული ფირფიტების ველების დაძაბულობანი მოდულით ტოლია და კონდენსატორის შიგნით ერთ მხარესაა მიმართული. ამიტომ ჯამური დაძაბულობის მოდული ორი ფირფიტის დაძაბულობათა მოდულების ჯამის ტოლია.

$$E = 2E_1 = k \frac{4\pi|\sigma|}{\epsilon}$$

ტევადობის ფორმულა უფრო კომპაქტურად ჩაიწერება, თუ  $k$ -ს შევცვლით მისი (8.6) გამოსახულებით:  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ , მაშინ მუხტის ზედაპირული სიმკვრივის  $\sigma = \frac{q}{S}$  ფორმულის გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$E = \frac{q}{\epsilon_0 \epsilon S}$$

მაშასადამე,

$$U = Ed = \frac{qd}{\epsilon_0 \epsilon S}$$

თუ ამ გამოსახულებას ჩავსვამთ (8.30)-ში და შევკვეცავთ  $q$ -ზე, მივიღებთ ბრტყელი კონდენსატორის ელექტროტევადობის ფორმულას:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} \quad (8.31)$$

ვხედავთ, რომ კონდენსატორის ელექტროტევადობა დამოკიდებულია გეომეტრიულ ფაქტორებზე — ფირფიტების ფართობსა და მათ შორის მანძილზე, აგრეთვე გარემოს ელექტრულ თვისებებზე. არ არის დამოკიდებული გამტართა მასალაზე: კონდენსატორის შემონაფენები შეიძლება იყოს რკინის, სპილენძის, ალუმინისა და ა. შ.

შევამოწმოთ ცდით (8.31) ფორმულა, რომელიც თეორიულად მივიღეთ. ამისათვის ავიღოთ კონდენსატორი, რომლის ფირფიტებს შორის მანძილი შეიძლება ვცვალოთ, და ელექტრომეტრი ჩამიწებულ კორპუსით (სურ. 130). ელექტრომეტრის კორპუსი და ღერო კონდენსატორის ფირფიტებს მივუერთოთ გამტარებით და დავმუხტოთ კონდენსატორი. ამისათვის საჭიროა დაელექტროებული ჯოხი შევახლოთ კონდენსატორის იმ ფირფიტას, რომელიც ღეროსთან არის შე-





ერთებული. ელექტრომეტრი გვიჩვენებს პოტენციალთა სხვაობას ფირფიტებს შორის.

ფირფიტების დაშორებისას შევნიშნავთ, რომ პოტენციალთა სხვაობა იზრდება. ელექტროტევადობის განმსაზღვრელი (8.30) ფორმულის თანახმად ეს ელექტროტევადობის შემცირებას მიუთითებს. (8.31) ფორმულის შესაბამისად ელექტროტევადობა მართლაც უნდა კლებულობდეს ფირფიტებს შორის მანძილის გადიდებით.

ჩავდგათ კონდენსატორის შემონაფენებს შორის დიელექტრიკის ფირფიტა, მაგალითად, ორგანული მინისა. ვნახავთ, რომ პოტენციალთა სხვაობა შემცირდება. მაშასადამე, კონდენსატორის ელექტროტევადობა გაიზრდება.

ფირფიტებს შორის  $d$  მანძილი შეიძლება იყოს ძალიან მცირე,  $S$  ფართობი და  $\epsilon$  დიელექტრიკული შეღწევადობა კი — შედარებით დიდი. ამიტომ მცირე ზომების კონდენსატორს შეიძლება ჰქონდეს დიდი ელექტროტევადობა.

**დიელექტრიკული შეღწევადობის გაზომვა.** კონდენსატორის ტევადობის დამოკიდებულება მის შემონაფენებს შორის მოთავსებული ნივთიერების ელექტრულ თვისებებზე გამოყენებულია ნივთიერების დიელექტრიკული შეღწევადობის გასაზომად. ამისათვის ცდით უნდა მოვნახოთ კონდენსატორის ორი ტევადობის შეფარდება:  $C_0$ -სი, რომელიც მას აქვს შემონაფენებს შორის, დიელექტრიკის შრის არსებობისას და  $C_1$ -ის, რომელიც კონდენსატორს აქვს მის გარეშე. როგორც (8.31)-დან გამომდინარეობს.

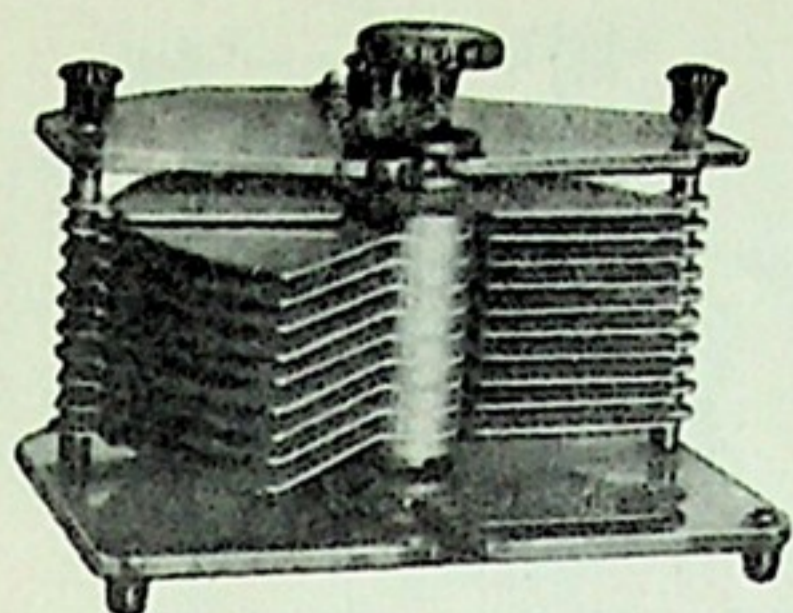
$$\left[ \epsilon = \frac{C}{C_0} \right]$$

**✓ კონდენსატორთა სხვადასხვა ტიპი.** სხვადასხვა დანიშნულების კონდენსატორის მოწყობილობა სხვადასხვაგვარია. ჩვეულებრივი ტექნიკური კონდენსატორი შედგება ალუმინის კილიტის ორი ზოლისაგან, რომლებიც ერთმანეთისა და ლითონის კორპუსისაგან იზოლირებულია პარაფინით გაჟღენთილი ქაღალდით. ალუმინისა და ქაღალდის ზოლები მჭიდროდაა შეხვეული მცირე ზომის პაკეტად.

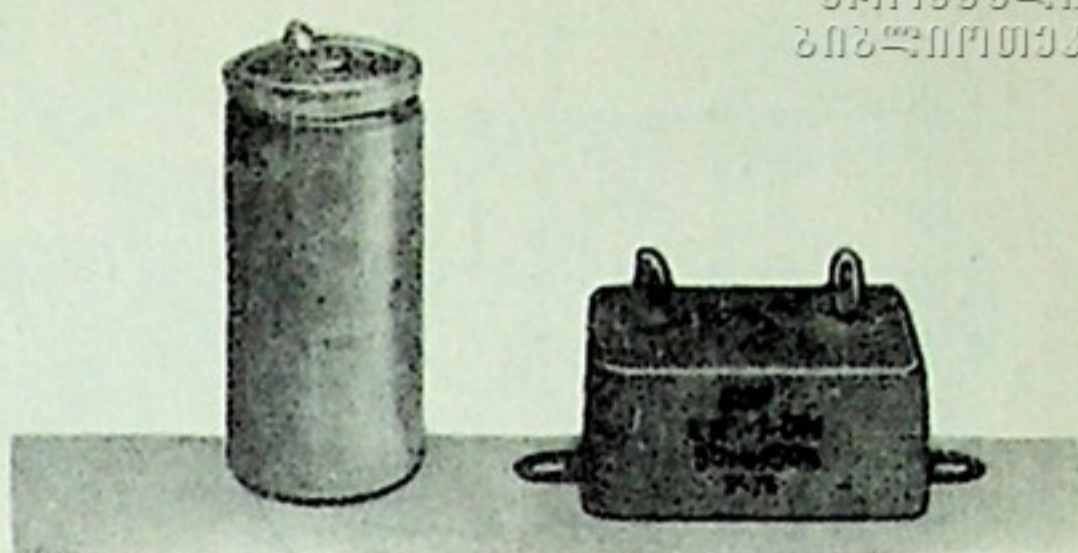
რადიოტექნიკაში ფართოდ იყენებენ ცვლადი ტევადობის კონდენსატორებს (სურ. 131). ასეთი კონდენსატორი შედგება ლითონის ფირფიტების ორი სისტემისაგან, რომლებიც სახელურის ბრუნვით ერთმანეთში შედიან. ამ დროს იცვლება ფირფიტების გადამფარავი ნაწილის ფართობი და, მაშასადამე, მათი ელექტროტევადობა. ამ კონდენსატორებში დიელექტრიკის როლს ჰაერი ასრულებს.

ფირფიტებს შორის მანძილის შემცირებით ტევადობის მნიშვნელოვან გადიდებას აღწევენ ე. წ. ელექტროლიტურ კონდენსატორებ-





სურ. 131.



სურ. 132.

ში (სურ. 132). მათში დიელექტრიკის როლს ასრულებს ქანგეულთა ძალიან თხელი ფენა, რომლითაც დაფარულია ერთ-ერთი შემონაფენი (კილიტას ზოლი). მეორე შემონაფენია სპეციალური ნივთიერების ხსნარით (ელექტროლიტით) გაყვანილი ქაღალდი.

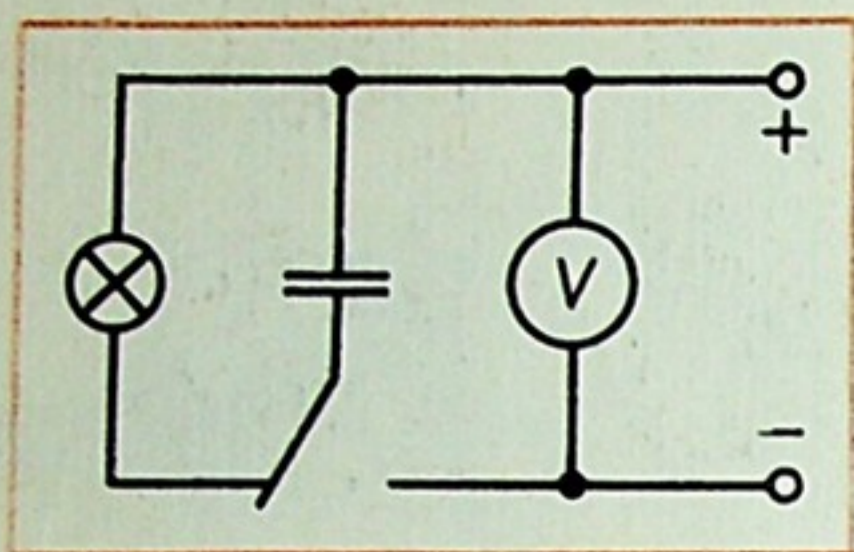
### 55. დამუხტული კონდენსატორის ენერგია. კონდენსატორის გამოყენება

დამუხტული კონდენსატორის ენერგია. კონდენსატორი რომ დამუხტოთ, საჭიროა შევასრულოთ მუშაობა დადებითი და უარყოფითი მუხტების განცალკევებაზე. ენერგიის მუდმივობის კანონის თანახმად, ეს მუშაობა კონდენსატორის ენერგიის ტოლია. ადვილად დავრწმუნდებით იმაში, რომ დამუხტულ კონდენსატორს, ისევე როგორც დამუხტულ სხეულთა ნებისმიერ სისტემას, აქვს ენერგია. ამისათვის განვმუხტოთ კონდენსატორი წრედში, რომელშიც ჩართულია რამდენიმე ვოლტი ძაბვისათვის გაანგარიშებული ვარვარის ნათურა (სურ. 133). კონდენსატორის განმუხტვის დროს ნათურა მყისვე აკაშკაშდება. კონდენსატორის ენერგია გარდაიქმნება შინაგან და სინათლის ენერგიად.

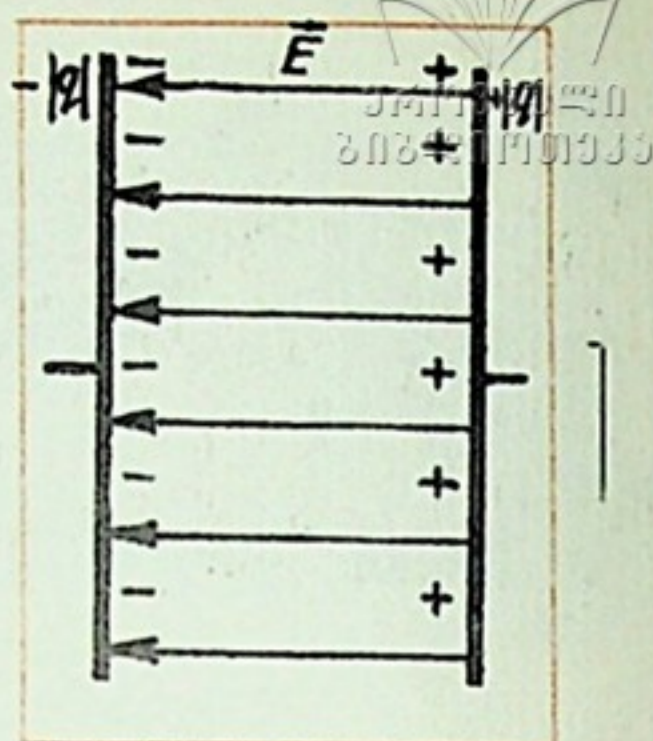
გამოვიყვანოთ ბრტყელი კონდენსატორის ენერგიის ფორმულა. ერთ-ერთი ფირფიტის მუხტის ველის დაძაბულობა  $\frac{E}{2}$ -ის ტოლია, სადაც  $E$  კონდენსატორის ველის დაძაბულობაა (იხ. § 54). ერთი ფირფიტის ერთგვაროვან ველში იმყოფება  $q$  მუხტი, რომელიც მეორე ფირფიტის ზედაპირზეა განაწილებული (სურ. 134). (8.20) ფორმულის თანახმად, რომელიც ერთგვაროვან ველში მოთავსებული მუხტის პოტენციურ ენერგიას ეხება, კონდენსატორის ენერგია ტოლია:

$$W_a = q \frac{E}{2} d, \quad (8.32)$$





სურ. 133.



სურ. 134.

სადაც  $q$  კონდენსატორის მუხტია,  $d$  კი ფირფიტებს შორის<sup>1</sup> მანძილი. რადგან  $Ed$  არის კონდენსატორის შემონაფენებს შორის არსებული  $U$  პოტენციალთა სხვაობა, ამიტომ კონდენსატორის ენერგია ტოლია<sup>2</sup>

$$W_3 = \frac{qU}{2}. \quad (8.33)$$

ეს ენერგია ტოლია მუშაობისა, რომელსაც ელექტრული ველი შეასრულებს ფირფიტების მიახლოებისას.

თუ (8.33) ფორმულაში შევცვლით პოტენციალთა სხვაობას ან მუხტს, კონდენსატორის ელექტროტევადობის (8.30) ფორმულის თანახმად მივიღებთ:

$$W_3 = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}. \quad (8.34)$$

შეიძლება დავამტკიცოთ, რომ ეს ფორმულები მართებულია არა მარტო ბრტყელი, არამედ ნებისმიერი კონდენსატორის ენერგიისათვის.

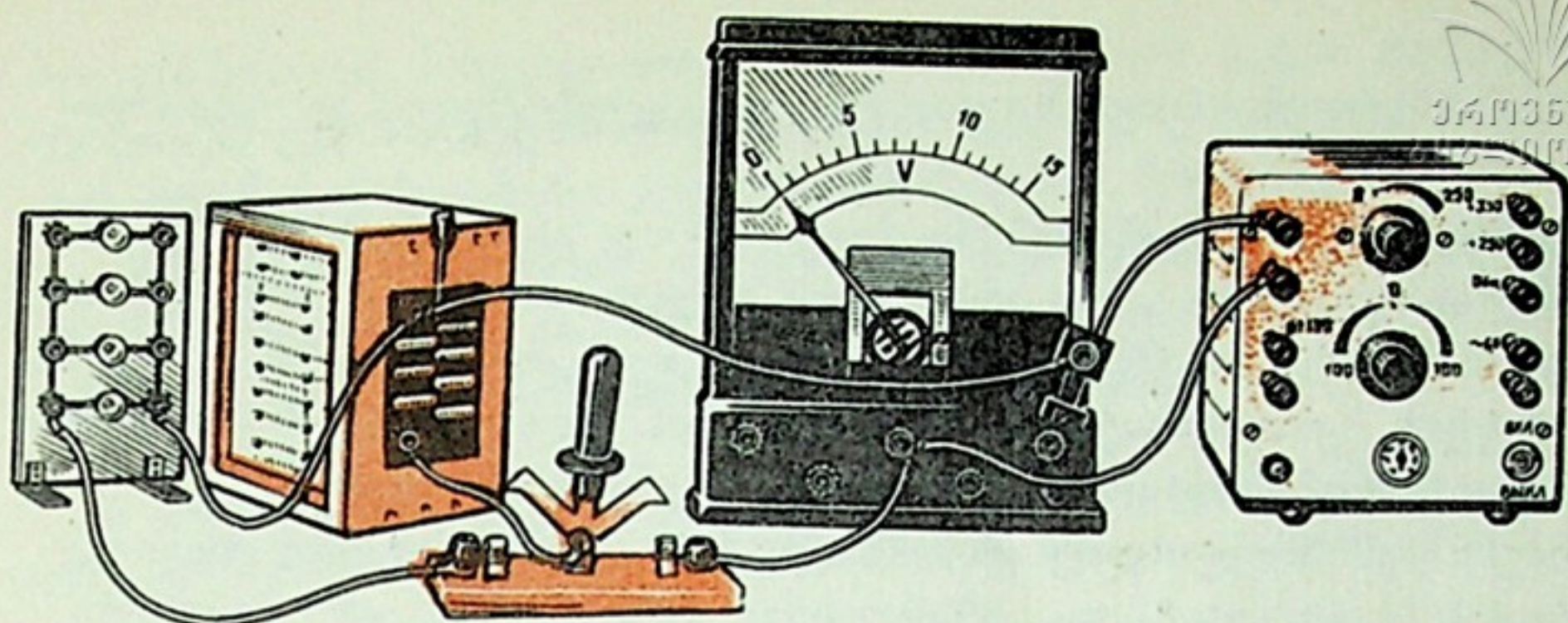
$W_3 = \frac{CU^2}{2}$  ფორმულის მართებულობაში დავრწმუნდებით 135-ე სურათზე გამოსახული დანადგარით. თუ უცვლელი ძაბვის პირობებში კონდენსატორის ტევადობას გავადიდებთ ორჯერ და ერთი ნათურას ნაცვლად ჩავრთავთ პარალელურად შეერთებულ ორ ნათურას, დავინახავთ, რომ კონდენსატორის განმუხტვისას ორი ნათურას ვარვარი

<sup>1</sup> (8.20) ფორმულა მართებულია წერტილოვანი მუხტის ენერგიისათვის ერთგვიროვან ველში. მაგრამ ფირფიტაზე არსებული მუხტი წარმოსახვით შეიძლება დაფიქსირდეს  $\Delta q$  ელემენტებად. თითოეული ელემენტის ენერგია ტოლია:

$$\Delta W_3 = \Delta q \frac{E}{2} d.$$

ამ ენერგიების შეჯამებით მივიღებთ (8.32) ფორმულას.





სურ. 135.

ისეთივე იქნება, როგორც იყო ერთისა კონდენსატორის პირვანდელი ტევადობის ( $W_3 \sim C$ ) შემთხვევაში. ერთი ნათურა კი უფრო საგრძნობლად აკაშკაშდება.

ხოლო, თუ კონდენსატორის დაბვას ორჯერ გავადიდებთ, ტევადობას უცვლელად დავტოვებთ და ოთხ ნათურას ერთად ჩავრთავთ, დავინახავთ, რომ ყველა ისეთივე ძალით აკაშკაშდება, როგორც ერთი ნათურა პირვანდელ დაბვაზე. ეს ნიშნავს, რომ კონდენსატორის ენერგია 4-ჯერ გაიზარდა ( $W_3 \sim U^2$ ).

ელექტრული ველის ენერგია. ახლოქმედების თეორიის თანახმად, დაბუხტულ სხეულთა ურთიერთქმედების მთელი ენერგია თავმოყრილია ამ სხეულთა ელექტრულ ველში. ეს ნიშნავს, რომ ენერგია შეიძლება გამოისახოს ველის ძირითადი მახასიათებლის, დაძაბულობის საშუალებით.

ჩავსვათ (8.34) ფორმულაში ბრტყელი კონდენსატორის ელექტროტევადობის მნიშვნელობა (იხ. 8.31) და გამოვსახოთ პოტენციალთა სხვაობა ველის დაძაბულობით:  $U = Ed$ . მაშინ კონდენსატორის ენერგია იქნება:

$$W_3 = \frac{CU^2}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} \cdot \frac{E^2 d^2}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} Sd. \quad (8.35)$$

გავყოთ (8.35) ველის მიერ დაკავებულ  $Sd$  მოცულობაზე, მივიღებთ ველის ერთეულ მოცულობაში მოქცეულ ენერგიას, ე. ი. ენერგიის სიმკვრივეს:

$$W_3 = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}. \quad (8.36)$$

ეს ფორმულა მართებულია არა მარტო ბრტყელი კონდენსატორის ერთგვაროვანი ველისათვის, არამედ ნებისმიერი სხვა ელექტროსტატიკური ველისთვისაც. უფრო მეტიც, ენერგიის სიმკვრივის მიღებუ-





ლი გამოსახულება. მართებულია ცვლადი ელექტრული ველებისთვისაც.

**კონდენსატორის გამოყენება.** ჩვეულებრივ, კონდენსატორის ენერგია ძალიან დიდი არ არის: არაუმეტეს ასეული ჯოჯოხისა. ამავე დროს ის დიდხანს არ ინახება, მუხტის გარდაუვალი კარგვის გამო. ამიტომ დამუხტულ კონდენსატორს არ შეუძლია შეცვალოს, მაგალითად აკუმულატორები როგორც ელექტრული ენერგიის წყარო.

მაგრამ ეს სრულიადაც არ ნიშნავს, რომ კონდენსატორი როგორც ენერგიის დამგროვებელი, პრაქტიკულ გამოყენებას არ პოულობს. მას ერთი მნიშვნელოვანი თვისება აქვს. კონდენსატორში ენერგიის დაგროვება შეიძლება შედარებით დიდხანს, განმუხტვისას კი მცირე წინააღობის წრედში ის თითქმის მეყსეულად იძლევა ენერგიას. სწორედ ეს თვისებაა პრაქტიკაში გამოყენებული.

მაგალითად, ფოტოგრაფიაში გამოყენებული მფეთქავი ნათურა კონდენსატორის განმუხტვის დენით იკვებება (წინასწარ კონდენსატორი სპეციალური ბატარეით იმუხტება). სინათლის კვანტური წყაროების — ლაზერების — აგზნება ხორციელდება აირგანმუხტვის მილაკით, რომლის ფეთქვა ხდება დიდი ტევადობის კონდენსატორთა ბატარეის განმუხტვის დროს.

კონდენსატორები ძირითადად გამოიყენება რადიოტექნიკაში, სხვადასხვა ელექტრულ წრედში მუხტის ცვლილების საშუალებით ძაბვის შესაცვლელად. თანაც დიდი ელექტროტევადობის კონდენსატორებს შეუძლია დააგროვონ ან გასცენ დიდი მუხტი ძაბვის მნიშვნელოვანი შეცვლის გარეშე.

- 9
1. რა პირობებში შეიძლება, გამტარზე დიდი ელექტრული მუხტის დაგროვება.
  2. რას ეწოდება ორი გამტარის ელექტროტევადობა?
  3. რატომ არ გამოიყენება ელექტროტევადობის ცნება დიელექტრიკებისათვის?
  4. რაზეა დამოკიდებული ელექტროტევადობა?
  5. განვმარტოთ ელექტროტევადობის ერთეული.
  6. რას უდრის ბრტყელი კონდენსატორის ელექტროტევადობა?
  7. რას უდრის კონდენსატორის ენერგია?
  8. ჩამოვთვალოთ კონდენსატორთა ძირითადი გამოყენება.
  9. როგორ შეიძლება კონდენსატორის საშუალებით გაიზომოს ნივთიერების დიელექტრიკული შეღწევადობა?
  10. შეიძლება თუ არა ელექტროტევადობის ცნების გამოყენება ერთი გამტარისათვის?

**ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები**

ელექტროტევადობა — „ელექტროსტატიკის“ განყოფილების უკანასკნელი თემაა. ამ თემის შესახებ ამოცანების ამოხსნის დროს შეიძლება საჭირო გახდეს ელექტროსტატიკაში შესწავლილი ყველა საკითხის გამოყენება: ელექტრული მუხტის მუდმივობა, ველის და-



ძაბულობისა და პოტენციალის ცნებები, გამტარის ქცევა ელექტრო-  
სტატიკურ ველში, ველის დაძაბულობის ცვლა დიელექტრიკში, ენერ-  
გიის მუდმივობის კანონი ელექტროსტატიკური მოვლენების მიმართ.

ამოცანების ამოხსნისას საჭიროა შემდეგი ძირითადი ფორმულები:  
ელექტროტევადობის განსაზღვრა (8.30), ელექტროტევადობის გამო-  
სახულება ბრტყელი კონდენსატორისათვის (8.31).

1. კონდენსატორის ელექტროტევადობა  $C=5$  პფ. რა მუხტი აქვს მის თითო-  
ეულ შემონაფენს, თუ მათ შორის პოტენციალთა სხვაობა  $U=1000$  ვ-ს?

ამოხსნა. (8.30) ფორმულის თანახმად, კონდენსატორის ელექ-  
ტროტევადობა  $C = \frac{q}{U}$ . აქედან, შემონაფენის მუხტი  $q = CU$ ;  $q =$   
 $= 5 \cdot 10^{-12} \cdot 1000$  კ  $= 5 \cdot 10^{-9}$  კ.

2. მუხტის % დაპირული სიმკვრივე ვაკუუმში მოთავსებული ბრტყელი კონდენ-  
სატორის ფირფიტებზე  $\sigma = 8 \cdot 10^{-7}$  კ/მ<sup>2</sup>; თითოეული ფირფიტის ფართობი  $S =$   
 $= 1000$  სმ<sup>2</sup>, კონდენსატორის ტევადობა  $C = 10$  პფ. გავიგოთ ელექტრონის სიჩქარე,  
რომელსაც შეიძენს იგი კონდენსატორში ერთი ფირფიტიდან მეორემდე გავლისას.  
ელექტრონის საწყისი სიჩქარე ნულის ტოლია.  $N$  ელექტრონის კუთრი მუხტი  
 $m = 1,76 \cdot 10^{-31}$  კ/გ.

ამოხსნა. ელექტრონის საწყისი კინეტიკური ენერგია ნულის  
ტოლია, პოტენციური კი  $W_3 = eU$ ; სადაც  $U$  ძაბვაა კონდენსატორის  
ფირფიტებს შორის. ელექტრონის საბოლოო კინეტიკური ენერგია  
ტოლია  $\frac{mv^2}{2}$ -სა, პოტენციური კი — ნულისა (თუ პოტენციური ენერ-  
გიის ნულოვან დონეს ავირჩევთ მეორე ფირფიტაზე). ენერგიის მუდ-  
მივობის კანონის თანახმად,  $\frac{mv^2}{2} = eU$ . კონდენსატორის ტევადო-  
ბა  $C = \frac{\sigma S}{U}$ , სადაც  $\sigma S$  კონდენსატორის მუხტია. განვსაზღვროთ აქე-  
დან ძაბვა და ჩავსვათ წინა ფორმულაში, მივიღებთ:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{e\sigma S}{C}$$

აქედან

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m} \cdot \frac{\sigma S}{C}} \approx 1 \cdot 10^7 \text{ მ/წმ.}$$





1. ბრტყელი კონდენსატორის შემონაფენები წარმოადგენს კილიტას ორ ზოლს, რომლებიც ერთმეორისაგან გამოყოფილია  $d=0,08$  მმ სისქის პარაფინირებული ( $\epsilon=2,2$ ) ქაღალდით. განსაზღვრეთ კონდენსატორის ტევადობა, თუ თითოეული ზოლის ფართობია  $S=0,4$  მ<sup>2</sup>.

2. წინა ამოცანაში აღწერილი კონდენსატორის შემონაფენებს შორის პოტენციალთა სხვაობა შეიცვალა 175 ვ-ით. გავიგოთ კონდენსატორის მუხტის ცვლილება.

3. ბრტყელი კონდენსატორის მუხტი არის  $2,7 \cdot 10^{-4}$  კ. თითოეული ფირფიტის ფართობია 2500 სმ<sup>2</sup>. დიელექტრიკი ქარსია ( $\epsilon=7$ ). გაიგეთ ველის დაძაბულობა დიელექტრიკში.

4. ბრტყელ კონდენსატორში ფირფიტების პარალელურად  $2 \cdot 10^7$  მ/წმ სიჩქარით შეიტყორცნება ელექტრონი. რა მანძილით წაინაცვლებს ელექტრონი დადებითად დამუხტული შემონაფენისკენ იმ დროში, რომელსაც ის ანდომებს კონდენსატორში გავლას? კონდენსატორის ელექტროტევადობა  $C=0,885$  პფ, კონდენსატორის სიგრძეა 0,05 მ, ფირფიტების ფართობი  $S=0,002$  მ<sup>2</sup>, ფირფიტებს შორის პოტენციალთა სხვაობაა 200 ვ. ელექტრონის მუხტის შეფარდება მასასთან არის  $1,76 \cdot 10^{11}$  კ/კგ.

5. ბრტყელი კონდენსატორი დამუხტეს  $U=200$  ვ ძაბვის მქონე წყაროდან. შემდეგ კონდენსატორი გამორთეს წყაროდან. როგორი გახდება ძაბვა ფირფიტებზე, თუ მათ შორის მანძილი  $d=0,2$  მმ-დან  $d_1=0,7$  მმ-მდე გაზარდეს, ფირფიტებს შორის სივრცე კი აავსეს ქარსით? ქარსის დიელექტიკული შეღწევადობა  $\epsilon=7$ .

6. რამდენჯერ შეიცვლება დამუხტული და წყაროდან გამორთული კონდენსატორის ენერგია, თუ შემონაფენებს შორის სივრცეს შევავსებთ დიელექტრიკით ( $\epsilon=3$ )?

7. განსაზღვრეთ მე-4 ამოცანაში ნახსენები კონდენსატორის ელექტრული ველის ენერგიის სიმკვრივე.

მ ო კ ლ ე დ ა ს კ ვ ნ ა

კულონის კანონის თანახმად,  $q_1$  და  $q_2$  უძრავი მუხტები ვაკუუმში ურთიერთქმედებენ ძალით:

$$\vec{F} = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2},$$

სადაც  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{ნ \cdot მ^2}{კ^2}$ . მუხტი იზომება კულონებით.

დამუხტულ სხეულთა ჩაკეტილი სისტემის ელექტრომუხტი მუდმივია.

მუხტების ურთიერთქმედება ხორციელდება ელექტრული ველის საშუალებით. ველის  $\vec{E}$  დაძაბულობა განსაზღვრავს მუხტზე მოქმედ ძალას:  $\vec{F} = q\vec{E}$ . ცალკეული მუხტების ველთა დაძაბულობანი გეომეტრიულად იკრიბება (სუპერპოზიციის პრინციპი).





წერტილოვანი მუხტის ელექტრული ველის დაძაბულობა ვაკუუმში ტოლია:

$$E = k \frac{|q|}{r^2}$$

სიბრტყის ველის დაძაბულობა  $E = k2\pi|\sigma|$ , სადაც  $\sigma$  მუხტის ზედაპირული სიმკვრივეა.

გამტარში არის თავისუფალი ელექტრული მუხტები. ველის დაძაბულობა და ელექტრული მუხტი გამტარის შიგნით ნულის ტოლია (ელექტროსტატიკაში).

დიელექტრიკში ყველა მუხტი ბმულია ატომებისა და მოლეკულების შიგნით.

ერთგვაროვან დიელექტრიკში ელექტრული ველი სუსტდება  $\epsilon$ -ჯერ, სადაც  $\epsilon$  დიელექტრიკული შეღწევადობაა.

ელექტროსტატიკური ველი პოტენციალურია: მისი მუშაობა არ არის დამოკიდებული მუხტის ტრაექტორიის ფორმაზე და ტოლია პოტენციური ენერჯიის ცვლილებისა შებრუნებული ნიშნით:  $A = -\Delta W_p$ .

მუხტის პოტენციური ენერჯია ერთგვაროვან ველში  $W_p = qEd$ , სადაც  $d$  მანძილია იმ სიბრტყიდან, რომელზედაც პოტენციური ენერჯია ნულის ტოლად ჩაითვლება.

ელექტრული ველის პოტენციალს უწოდებენ ველში მოთავსებული მუხტის პოტენციური ენერჯიის შეფარდებას ამ მუხტთან:

$$\varphi = \frac{W_p}{q}$$

ორ წერტილს შორის პოტენციალთა სხვაობა (ძაბვა) ტოლია საწყისი წერტილიდან ბოლო წერტილში მუხტის გადატანაზე ველის მიერ შესრულებული მუშაობის შეფარდებისა ამ მუხტთან:  $U =$

$$= \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q} \text{ . პოტენციალთა სხვაობა გამოისახება ვოლტებით:}$$

$$1 \text{ ვ} = \frac{1 \text{ ჯ}}{1 \text{ კ}}$$

ველის დაძაბულობა პოტენციალთა სხვაობასთან დაკავშირებულია

$$E = \frac{U}{\Delta d} \text{ . ფორმულით, სადაც } U \text{ პოტენციალთა სხვაობაა ერთ ძალწირზე მდებარე მცირე } \Delta d \text{ მანძილით დაშორებულ ორ წერტილს შორის.}$$



გამტართა უნარს დაავროვოს ელექტრული მუხტი ახასიათებენ ელექტროტევადობით. ორი გამტარის ელექტროტევადობა ტოლია:

$$C = \frac{q}{U},$$

სადაც  $q$  ერთ-ერთი გამტარის მუხტია (მეორე გამტარზე საპირისპირო ნიშნის მუხტია),  $U$  კი — გამტართა შორის პოტენციალთა სხვაობა.

ელექტროტევადობა იზომება ფარადებით:

$$1 \text{ ფ} = \frac{1 \text{ კ}}{1 \text{ ვ}};$$

უდიდესი მუხტი გროვდება კონდენსატორში — ორი ისეთი გამტარის სისტემაში, რომელთა ზომა ბევრად მეტია მათ შორის მანძილზე. ბრტყელი კონდენსატორის ტევადობა ტოლია:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d},$$

სადაც  $S$  ფირფიტების ფართობია,  $d$  — მათ შორის მანძილი, ხოლო  $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k}$  — ელექტრული მუდმივა.

დამუხტული კონდენსატორის ენერგია  $W_a = \frac{qU}{2}$ .

\*  
\* \* \*

საკმაოდ დიდი დრო დავუთმეთ ელექტრობის შესწავლას, თუმცა განვიხილეთ მხოლოდ ელექტროსტატიკა — უძრავ დამუხტულ სხეულთა უმარტივესი კერძო შემთხვევა. შეიძლება არ ღირდა ელექტროსტატიკისათვის ასეთი დიდი ყურადღების დათმობა? არა, უთუოდ ღირდა. ჩვენ შემოვიტანეთ უმნიშვნელოვანესი ცნებები, რომლებიც მთელ ელექტროდინამიკაშია გამოყენებული. ეს ცნებებია: „ელექტრული მუხტი“, „ელექტრული ველი“, „პოტენციალი და პოტენციალთა სხვაობა“, „ელექტროტევადობა“, „ელექტრული ველის ენერგია“, კერძო მარტივ შემთხვევაში ამ ფუნდამენტური ცნებების არსის გარკვევა არც ისე ძნელია, როგორც მოძრავი მუხტების ზოგად შემთხვევაში.

ახლა გადავიდეთ ელექტრომაგნიტური პროცესების შესწავლაზე, რომლებსაც ვაკვირდებით დამუხტული ნაწილაკების მოძრაობის დროს.



## მუდმივი ელექტრული დენი

### 58 ელექტრული დენი. დენის ძალა

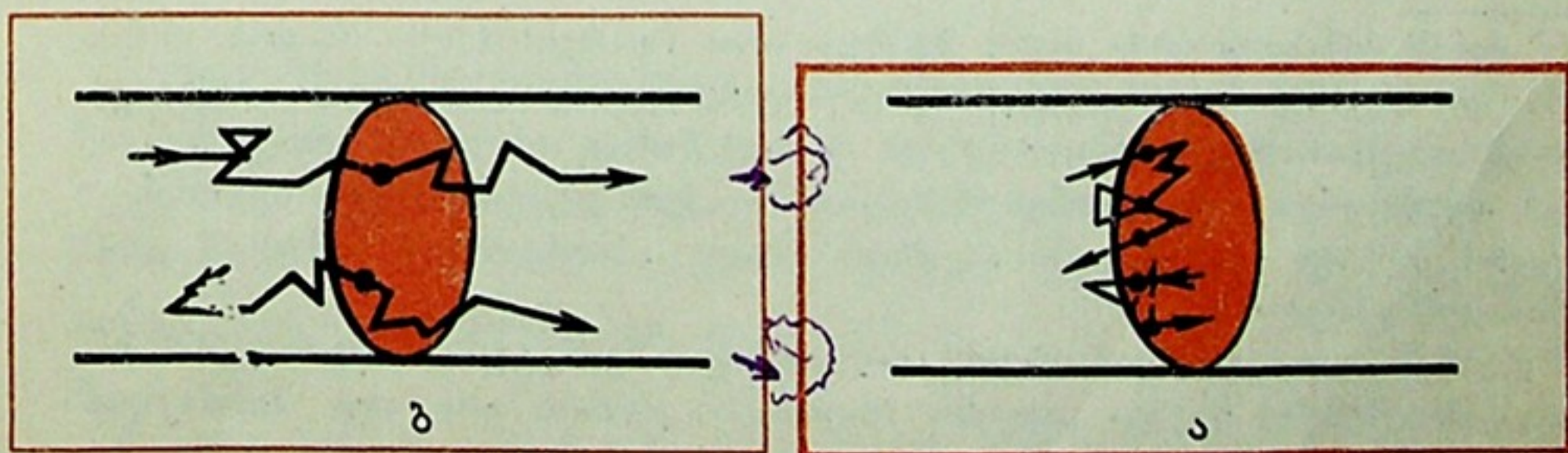
დამუხტული ნაწილაკების მოძრაობისას ხდება ელექტრული მუხტის გადატანა ერთი ადგილიდან მეორეში. მაგრამ, თუ დამუხტული ნაწილაკები უწყესრიგო სითბურ მოძრაობაშია, როგორც, მაგალითად, თავისუფალი ელექტრონები ლითონში, მუხტის გადატანა არ მოხდება (სურ. 136, ა). გამტარის განივკვეთში მუხტი გაივლის მხოლოდ მაშინ, თუ ქაოსურ მოძრაობასთან ერთად ელექტრონები მოწესრიგებულადაც მოძრაობენ (სურ. 136, ბ). ამ შემთხვევაში ამბობენ, რომ გამტარში აღიძვრა ელექტრული დენი.

VIII კლასის ფიზიკის კურსიდან ვიცით, რომ ელექტრული დენი გწოდება დამუხტული ნაწილაკების მოწესრიგებულ (მიმართულ) მოძრაობას.

ელექტრული დენი აღიძვრება თავისუფალი ელექტრონების ან იონების მოწესრიგებული მოძრაობით.

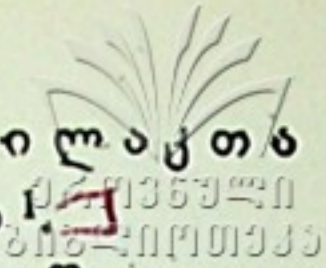
მაგრამ თუ გამოძრავებთ ნეიტრალურ სხეულს, მიუხედავად უამრავი ელექტრონისა და ატომბირთვის მოწესრიგებული მოძრაობისა, ელექტრული დენი არ აღიძვრება. ამ დროს გამტარის ნებისმიერ განივკვეთში გამავალი სრული მუხტი ნულის ტოლი იქნება, რადგან სხვადასხვა ნიშნის მუხტები ერთნაირი საშუალო სიჩქარით გადაადგილდება. დენი გამტარში მხოლოდ მაშინ აღიძვრება, როცა მუხტების ერთი მიმართულებით მოძრაობისას განივკვეთში გასული დადებითი მუხტი მოდულით ტოლი არაა უარყოფითისა.

ელექტრულ დენს გარკვეული მიმართულება აქვს. დენის მიმართულებად მიღებულია დადებითად დამუხტულ ნაწილაკთა მოძრაობის მიმართულება. თუ დენი წარმოქმნილია უარყოფითად დამუხტული ნაწილაკების მოძრაობით, მა-



სურ. 136





შინ მის მიმართულებად ითვლება ნაწილაკთა მოძრაობის საპირისპირო მიმართულებად.

**დენის მოქმედება.** გამტარში ნაწილაკთა მოძრაობას უშუალოდ ვერ ვხედავთ. მაგრამ ელექტრული დენის არსებობა შევამჩნევთ იმ მოვლენებით, რომლებიც დენს თან ახლავს.

ჯერ ერთი, გამტარი, რომელშიც დენი გადის, თბება.

მეორე, ელექტრულ დენს შეუძლია შეცვალოს გამტარის ქიმიური შედგენილობა, მაგალითად, გამოყოს მისი ქიმიური შემადგენელი ნაწილი (სპილენძი შაბიამნის ხსნარიდან და ა. შ.). ასეთი პროცესი ხდება არა ყველა გამტარში, არამედ მხოლოდ ელექტროლიტთა ხსნარებში (ან ნაღობებში) <sup>2</sup>.

მესამე, დენი ახდენს ძალურ მოქმედებას მეზობელ დენებზე ან დამაგნიტებულ სხეულებზე. დენის ამ მოქმედებას მაგნიტური ეწოდება. მაგალითად, დენიანი გამტარის მახლობლად მაგნიტური ისარი შემობრუნდება, ქიმიური და სითბური მოქმედებისაგან განსხვავებით დენის მაგნიტური მოქმედება ძირითადია, რადგან ის ყველა გამტარში ვლინდება. დენის ქიმიური მოქმედება ვლინდება ელექტროლიტების ხსნარებსა და ნაღობებში, ხოლო სითბური მოქმედება არ ვლინდება ზეგამტარებში (იხ. § 60).

**დენის ძალა.** თუ წრედში გადის დენი ეს ნიშნავს, რომ გამტარის ნებისმიერ განივკვეთში გამუდმებით ხდება ელექტრული მუხტის გადატანა. დროის ერთეულში გადატანილი მუხტის სიდიდე არის დენის ძირითადი რაოდენობრივი მაჩასიათებელი და მას დენის ძალა ეწოდება. თუ გამტარის განივკვეთში  $\Delta t$  დროის შუალედში  $\Delta q$  მუხტი გადის, მაშინ დენის ძალა

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (9.1)$$

ამრიგად, დენის ძალა <sup>3</sup> უდრის გამტარის განივკვეთში  $\Delta t$  დროის შუალედში გადატანილი  $q$  მუხტის შეფარდებას დროის ამ შუალედ-

<sup>1</sup> დენის მიმართულების ასეთი შერჩევა არაა მოსახერხებელი, რადგან უმრავლეს შემთხვევაში, დენი ელექტრონების — უარყოფითად დამუხტული ნაწილაკების — მოძრაობაა. დენის მიმართულებას არჩევა მოხდა იმ დროს, როცა ლითონებში თავისუფალი ელექტრონების არსებობაზე ჯერ კიდევ არაფერი იცოდნენ.

<sup>2</sup> ამის შესახებ დაწვრილებითაა მოთხრობილი არაორგანული ქიმიის X კლასის საბელმძღვანელოში.

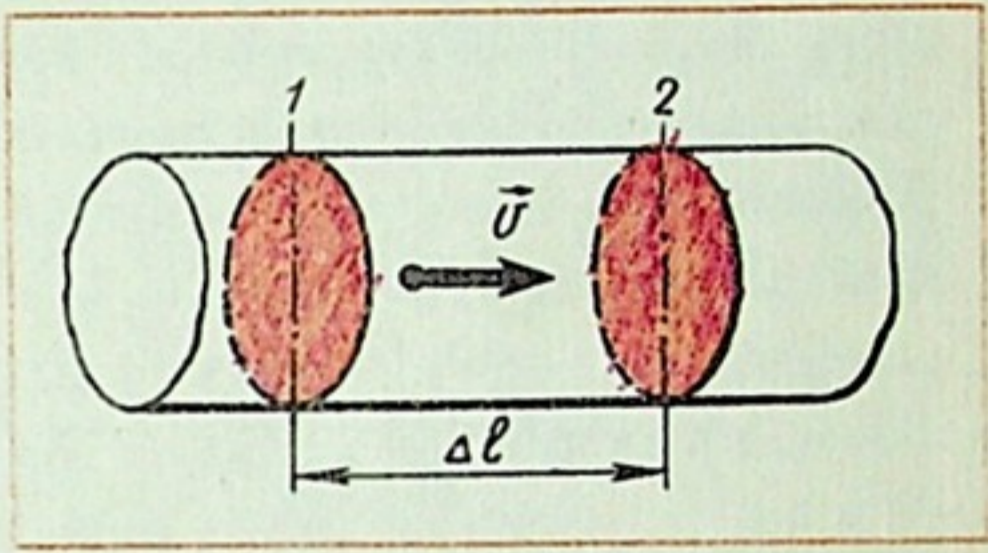
<sup>3</sup> ტერმინი „დენის ძალა“ არცთუ ისე კარგადაა შერჩეული, რადგან დენის მიმართ გამოყენებულ სიტყვა „ძალას“ არავითარი კავშირი არა აქვს მექანიკიდან ცნობილ ძალის ცნებასთან. მაგრამ ტერმინი „დენის ძალა“ დიდი ხნის წინათ შემოიღეს და მეცნიერებაში განმტკიცდა.



თან. თუ დენის ძალა დროის მიხედვით უცვლელია, მაშინ დენს მუდ-  
მივი ეწოდება.

დენის ძალა მუხტის მსგავსად, სკალარული სიდიდეა. იგი შეიძ-  
ლება იყოს როგორც დადებითი, ისე უარყოფითი. დენის ძალის ნი-  
შანი პირობითია და დამოკიდებულია იმაზე, თუ გამტარის გასწვრივ  
რომელ მიმართულებას ჩავთვლით დადებითად. დენის ძალა  $I > 0$ ,  
თუ დენის მიმართულება ემთხვევა გამტარის გასწვრივ დადებითად  
მიჩნეულ მიმართულებას. წინააღმდეგ შემთხვევაში  $I < 0$ .

დენის ძალა დამოკიდებულია  
თითოეული ნაწილაკის მიერ გა-  
დატანილ მუხტზე, ნაწილაკთა  
კონცენტრაციაზე, მათი მიმართუ-  
ლი მოძრაობის სიჩქარესა და  
გამტარის განივკვეთის ფართობ-  
ზე.



სურ. 137

ვთქვათ, გამტარის განივკვე-  
თის ფართობია  $S$ . გამტარის გა-  
სწვრივ დადებით მიმართულებად  
მივიღოთ მიმართულება მარცხნი-  
დან მარჯვნივ. თითოეული ნაწი-  
ლაკის მუხტი უდრის  $q_0$ -ს. გამტარის მოცულობაში, რომელიც შემო-  
საზღვრულია 1 და 2 კვეთებით, იმყოფება  $nS\Delta l$  ნაწილაკი (სურ.  
137), სადაც  $n$  ნაწილაკების კონცენტრაციაა. მათი საერთო მუხტი  
 $q = q_0 n S \Delta l$ . თუ ნაწილაკები მარცხნიდან მარჯვნივ მოძრაობს  $v$  სა-

შუალო სიჩქარით<sup>1</sup>, მაშინ  $\Delta t = \frac{\Delta l}{v}$  დროის შუალედში ყველა ნაწი-  
ლაკი, რომელიც განხილულ მოცულობაშია, გაივლის 2 კვეთას. ამი-  
ტომ დენის ძალა ტოლია:

$$I = \frac{q}{\Delta t} = \frac{q_0 n v S \Delta l}{\Delta l} = q_0 n v S \quad (9.2)$$

ერთეულთა საერთაშორისო სისტემაში დენის ძალას ზომავენ ამ-  
პერებით (ა). ამ ერთეულს ადგენენ დენების მაგნიტური ურთიერთ-  
ქმედებით. დენის ძალას ზომავენ ამპერმეტრით. ამ ხელსაწყოს მო-  
წყობილობის პრინციპს, რომელიც დენის მაგნიტურ მოქმედებაზეა  
დამყარებული, მოგვიანებით გავეცნობით.

<sup>1</sup> უფრო ზუსტად  $v$  არის საშუალო სიჩქარის გეგმილი გამტარის გასწვრივ აღე-  
ბულ დადებით მიმართულებაზე.



ელექტრონთა მოწესრიგებული მოძრაობის სიჩქარე გამტარში.  
 ციპოვით ელექტრონთა მოწესრიგებული მოძრაობის სიჩქარე ლი-  
 თონის გამტარში.

(9.2) ფორმულის თანახმად

$$|v| = \frac{|I|}{enS}$$

სადაც  $e$  ელექტრონის მუხტის მოდულია. ვთქვათ, დენის ძალა  $I=1$  ა, გამტარის განივკვეთის ფართობი კი  $S=10^{-6}$  მ<sup>2</sup>. ელექტრონის მუხტის მოდული  $e=1,6 \cdot 10^{-19}$  კ, თავისუფალ ელექტრონთა რიცხვი სპილენძის 1 მ<sup>3</sup> მოცულობაში ტოლია ატომების რიცხვისა. იმავე მოცულობაში, რადგან სპილენძის თითოეული ატომის ერთ-ერთი სავალენტო ელექტრონი საერთოა და თავისუფალ ელექტრონს წარმოადგენს. ეს რიცხვია  $n=8,5 \cdot 10^{28}$  მ<sup>-3</sup> (იხ. პირველი სავარჯიშოს № 7 ამოცანა). მაშასადამე,

$$|v| = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,5 \cdot 10^{28} \cdot 10^{-6}} \frac{\text{მ}}{\text{წმ}} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ მ/წმ.}$$

როგორც ვხედავთ, ელექტრონთა მოწესრიგებული მოძრაობის სიჩქარე ძალიან მცირეა.

## 57. ელექტრული დენის არსებობის აუცილებელი პირობები

მუდმივი ელექტრული დენის აღძვრისა და არსებობისათვის აუცილებელია, ჯერ ერთი წიფთიერებაში იყოს თავისუფალი დამუხტული ნაწილაკები. თუ დადებითი და უარყოფითი მუხტები ბმულია ატომებსა და მოლეკულებში, მაშინ მათი გადაადგილება ვერ წარმოქმნის ელექტრულ დენს.

მაგრამ თავისუფალი მუხტების არსებობა ჯერ კიდევ არ კმარა დენის აღძვრისათვის. დამუხტული ნაწილაკების მოწესრიგებული მოძრაობის შექმნისა და შენარჩუნებისათვის აუცილებელია, მეორეც, ძალა, რომელიც მათზე გარკვეული მიმართულებით იმოქმედებს. თუ ეს ძალა შეწყვეტს მოქმედებას, მაშინ დამუხტულ ნაწილაკთა მოწესრიგებული მოძრაობა შეწყდება იმ წინააღობის გამო, რომელსაც მათ უწევს ლითონის კრისტალური მესრის იონები ან ელექტროლიტის ნეიტრალური მოლეკულები.

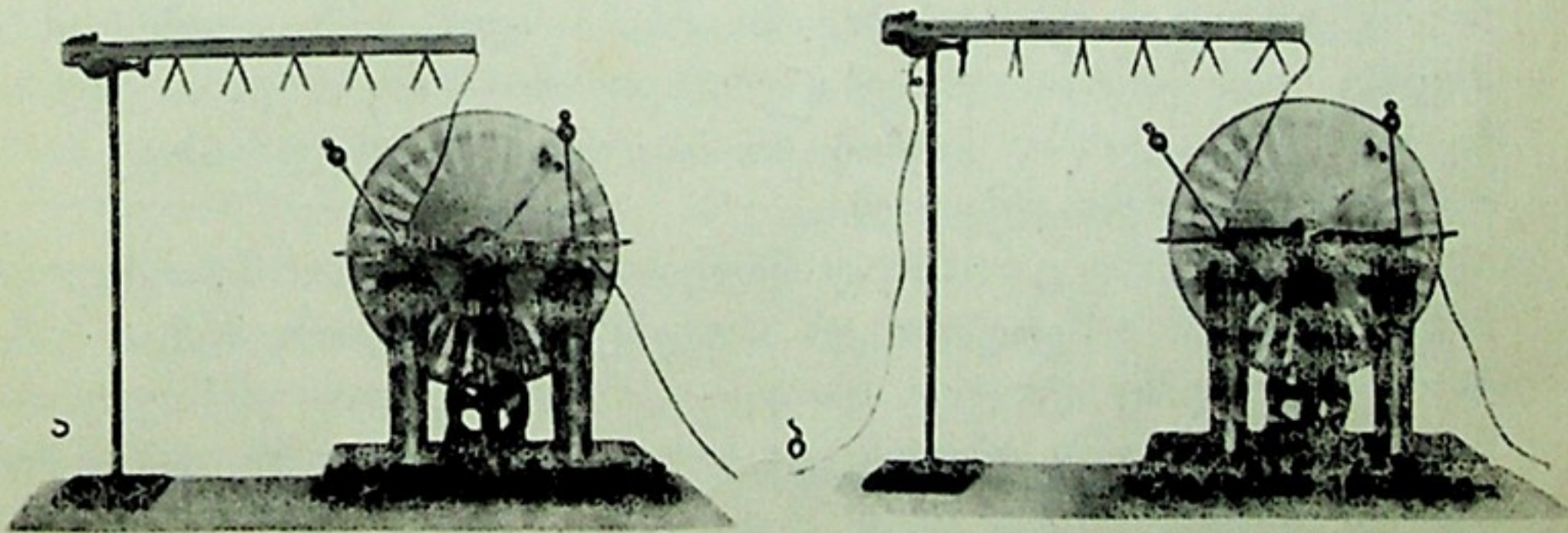
როგორც ვიცით, დამუხტულ ნაწილაკებზე მოქმედებს ელექტრული ველი  $\vec{F} = q\vec{E}$  ძალით. ჩვეულებრივ, გამტარის შიგნით



არსებული ელექტრული ველი არის ის მიზეზი, რომელიც დაშუბტული ნაწილაკების მოწესრიგებულ მოძრაობას იწვევს და ინარჩუნებს. მხოლოდ სტატიკურ შემთხვევაში, როცა მუხტები უძრავია, ელექტრული ველი გამტარის შიგნით ნულის ტოლია.

თუ გამტარის შიგნით არის ელექტრული ველი, მაშინ გამტარის ბოლოებს შორის (8.29) ფორმულის შესაბამისად, არსებობს პოტენციალთა სხვაობა. როცა ეს პოტენციალთა სხვაობა დროის მიხედვით არ იცვლება, გამტარში მყარდება მუდმივი დენი. გამტარის გასწვრივ პოტენციალი იცვლება მის ერთ ბოლოზე არსებული მაქსიმალური მნიშვნელობიდან მეორე ბოლოზე არსებულ მინიმალურ მნიშვნელობამდე. პოტენციალის ამ კლებას შეიძლება დავაკვირდეთ მარტივი ცდით.

გამტარის ნაცვლად ავიღოთ არც თუ ისე მშრალი ხის ჯოხი (ასეთი ჯოხი თუმცა ცუდად, მაგრამ მაინც ატარებს დენს) და დავამაგროთ შორიზონტალურად. ძაბვის წყარო იყოს ელექტროსტატიკური მანქანა. გამტარის სხვადასხვა ადგილას პოტენციალის რეგისტრაციისათვის (დედამიწის მიმართ) გამოვიყენოთ ჯოხზე მიმაგრებული ლითონის კილიტას ფურცლები. მანქანის ერთი პოლუსი ჩავამიწოთ, მეორე კი გამტარის (ჯოხის) ერთ ბოლოსთან შევაერთოთ, მიიღება ღია წრედი. ვაბრუნოთ მანქანის სახელური, ვნახავთ, რომ ყველა ფურცელი ერთი და იმავე კუთხით გაიშლება (სურ. 138, ა). ეს ნიშნავს, რომ დედამიწის მიმართ გამტარის ყველა წერტილის პოტენციალი ერთი და იგივეა. ასეც უნდა იყოს გამტარში მუხტების წონასწორობისას. თუ ახლა ჯოხის მეორე ბოლოს ჩავამიწებთ, მაშინ სახელურის ბრუნვის დროს სურათი შეიცვლება (რადგან დედამიწა გამტარია, ამიტომ ჯოხის ჩამიწებისას წრედი შეიკვრება). ჩამიწებულ ბოლოსთან ფურცლები საერთოდ არ გაიშლება: გამტარის ამ ბოლოს პოტენციალი პრაქტიკულად დედამიწის პოტენციალის ტოლია (პოტენციალის ვარდნა ლითონის მავთულში მცირეა). ფურცლების გაშლის კუთხე მაქსიმალური იქნება გამტარის იმ ბოლოსთან, რომელიც მანქანასთან არის



სურ. 138



შეერთებული (სურ. 138, ბ). ფურცლების გაშლის კუთხე მცირდება მანქანიდან დაშორების მიხედვით, რაც იმის მაჩვენებელია, რომ გამტარის გასწვრივ პოტენციალი ეცემა.

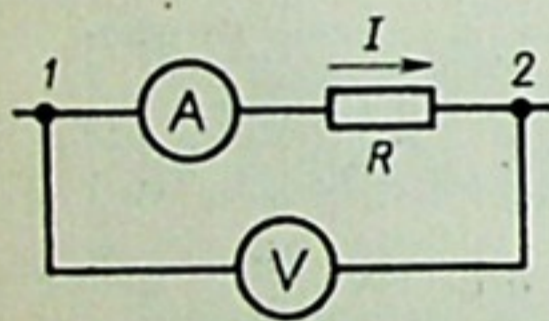
9. 1. რას ეწოდება ელექტრული დენი? 2. რას ეწოდება დენის ძალა? 3. დენის რა მიმართულებას თვლიან დადებითად? 4. რა პირობებია აუცილებელი ელექტრული დენის არსებობისათვის?

## 58. ომის კანონი წრედის უზენისათვის.

### წინალობა

ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი. წინა პარაგრაფში დადგინდა, რომ გამტარში დენის არსებობისათვის საჭიროა მის ბოლოებზე შევქმნათ პოტენციალთა სხვაობა. დენის ძალა გამტარში ამ პოტენციალთა სხვაობით განისაზღვრება. რაც მეტია პოტენციალთა სხვაობა, მით მეტია ელექტრული ველის დაძაბულობა გამტარში და, მაშასადამე, მით მეტია დამუხტული ნაწილაკების მიმართული მოძრაობის სიჩქარე. (9.2) ფორმულას თანახმად, ეს ნიშნავს დენის ძალის ზრდას.

ყველა გამტარისათვის (მყარის, თხევადისა და აიროვანისთვის) დენის ძალა გარკვეული სახით არის დამოკიდებული მოდებულ პოტენციალთა სხვაობაზე. ამ დამოკიდებულებას გამოსახავს გამტარის ე. წ. ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი. მას პოტენციური გამტარში დენის ძალის გაზომვით სხვადასხვა დაბვისას. ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის ცოდნა დიდ როლს ასრულებს დენის შესწავლაში.



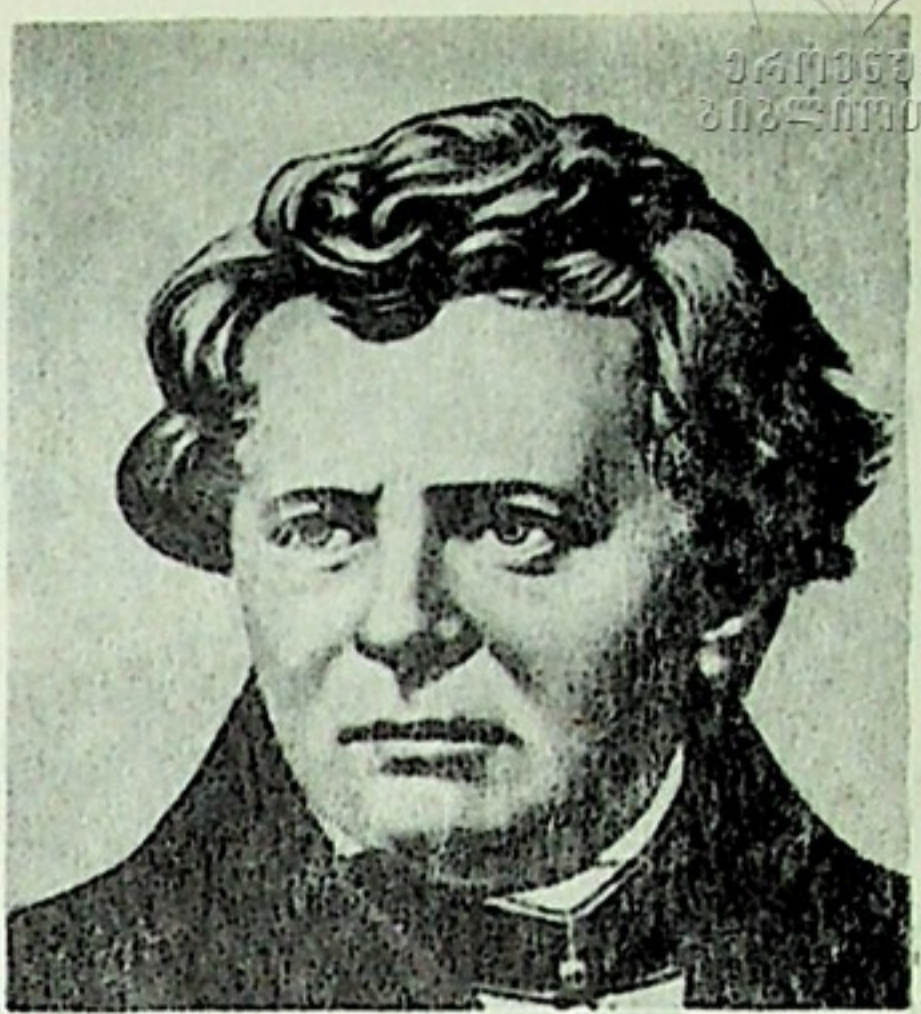
სურ. 139

ომის კანონი. ყველაზე მარტივი სახე ვოლტ-ამპერულ მახასიათებელს აქვს ლითონის გამტარებისა და ელექტროლიტთა ხსნარებისათვის. პირველად (ლითონებისათვის) ეს დაადგინა გერმანელმა მეცნიერმა გეორგ ომმა. ამიტომ დენის ძალის დამოკიდებულებას დაბვაზე ომის კანონი ეწოდება. ომის კანონი დაწვრილებით შევისწავლეთ VIII კლასში, მაგრამ ის იმდენად მნიშვნელოვანია, რომ აუცილებელია მისი გამეორება.

139-ე სურათზე გამოსახულ წრედის უბანზე დენი მიმართულია 1 წერტილიდან 2 წერტილისკენ. პოტენციალთა სხვაობა (დაბვა) გამტარის ბოლოებზე ტოლია:  $U = \varphi_1 - \varphi_2$ . რადგან დენი მიმართულია მარცხნიდან მარჯვნივ, ამიტომ ელექტრული ველის დაძაბულობაც მიმართულია იმავე მხარეს და  $\varphi_1 > \varphi_2$ .



გეორგ სიმონ ომი (1787—1854) გამოჩენილი გერმანელი ფიზიკოსია. მუშაობდა სკოლის მასწავლებლად. მან აღმოაჩინა დენის ძალის დაბეჭევა და მოკიდებულების კანონი წრედის უბნისათვის, აგრეთვე კანონი, რომელიც დენის ძალას განსაზღვრავს შეკრულ წრედში. ამ დროს მას მოუხდა დიდი სიძნელეების გადალახვა. დენის ძალის საზომი გრძნობიერი ხელსაწყო მანვე დაამზადა. დაბვის წყაროდ გამოიყენა თერმოსფერილი: სხვადასხვა ლითონის ორი ერთად მიჩილული გამტარი. ნარჩილთა ტემპერატურის სხვაობის გადიდებით ის ცვლიდა დაბვას, რომელიც ამ ტემპერატურის სხვაობის პროპორციულია. გარდა ამისა, მან მონახა წინააღმდეგობის დამოკიდებულება გამტარის სიგრძესა და მისი განივკვეთის ფართობზე.



ომის კანონის თანახმად, წრედის უბნისათვის დენის ძალა პირდაპირპროპორციულია  $U$  მოდებული დაბვისა და უკუპროპორციულია გამტარის  $R$  წინააღმდეგობისა:

$$I = \frac{U}{R}$$

(9.3)

ომის კანონს მარტივი სახე აქვს, მაგრამ მისი ექსპერიმენტული დამტკიცება საკმაოდ ძნელია. საქმე ისაა, რომ ლითონის გამტარის უბანზე პოტენციალთა სხვაობა ძლიერი დენის შემთხვევაშიც კი მცირეა, გამტარის წინააღმდეგობის სიმცირის გამო. ელექტრომეტრი, რომლის შესახებაც 52-ე პარაგრაფში იყო საუბარი, არ გამოდგება ასე მცირე დაბვის გასაზომად, რადგან მისი მგრძნობიარობა ძალიან დაბალია. გვერდებზე გაცილებით უფრო მგრძნობიარე ხელსაწყო. დაბვის გამოზომი ჩვეულებრივი ხელსაწყო — ვოლტმეტრის — გამოყენება კი ემყარება ომის კანონს.

ვოლტმეტრის მოწყობილობის პრინციპი იგივეა, რაც ამპერმეტრისა. ხელსაწყო ისრის მობრუნების კუთხე პროპორციულია დენის ძალისა. ვოლტმეტრში გასული დენის ძალა განისაზღვრება წრედის იმ წერტილთა შორის არსებული დაბვით, რომლებთანაც ისაა შეერთებული. ამიტომ თუ ვიცით ვოლტმეტრის წინააღმდეგობა, დენის ძალის მიხედვით გავიგებთ დაბვას. პრაქტიკაში ხელსაწყო ისე აგრაღუირობენ, რომ უშუალოდ აჩვენოს დაბვა ვოლტებით.

წინააღმდეგობა. გამტარის ძირითადი ელექტრული მახასიათებელია წინააღმდეგობა. ამ სიდიდეზეა დამოკიდებული დენის ძალა გამტარში,





მოცემული ძაბვის დროს. გამტარის წინაღობა გამტარის უკუქმედებაა ელექტროდენის მიმართ. გამტარის წინაღობა შეიძლება გამოვთვა-

ლოთ ომის კანონით (9.3):  $R = \frac{U}{I}$  ამისათვის საჭიროა გავზომოთ ძაბვა და დენის ძალა.

წინაღობა დამოკიდებულია გამტარის მასალასა და მის გეომეტრიულ ზომაზე.  $l$  სიგრძისა და ერთნაირი განივკვეთის  $S$  ფართობის გამტარის წინაღობა ტოლია:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

სადაც  $\rho$  სიდიდეა, რომელიც ნივთიერების გვარობასა და მის მდგომარეობაზეა (პირველ რიგში ტემპერატურაზე) დამოკიდებული.

სიდიდეს გამტარის კუთრ წინაღობას უწოდებენ. ვთქვათ, გამტარს 1 მ წიბოს მქონე კუბის ფორმა აქვს. კუთრი წინაღობა რიცხობრივად უდრის ასეთი გამტარის წინაღობას, როცა მასში დენი მიმართულია ორი მოპირდაპირე წახნაგის ნორმალის გასწვრივ.

გამტარის წინაღობის ერთეულს, რომელსაც ომს უწოდებენ, ადგენენ ომის კანონის მიხედვით. გამტარს აქვს 1 ომი წინაღობა, თუ 1 ვოლტენციალთა სხვაობის დროს მასში დენი 1 ა-ს უდრის.

კუთრი წინაღობის ერთეულია 1 ომი·მ. ლითონებს მცირე კუთრი წინაღობა აქვს, დიელექტრიკებს კი — ძალიან დიდი.

ფორზაცზე, ცხრილში, მოცემულია ზოგიერთი ნივთიერების კუთრი წინაღობის მნიშვნელობა.

**ომის კანონის მნიშვნელობა.** ომის კანონი განსაზღვრავს დენის ძალას ელექტრულ წრედში მოცემული ძაბვისა და ცნობილი წინაღობის შემთხვევაში. ამით ის საშუალებას გვაძლევს გამოვთვალოთ დენის სითბური, ქიმიური და მაგნიტური მოქმედებანი, რადგან ისინი დამოკიდებულია დენის ძალაზე. ომის კანონიდან გამომდინარეობს, რომ ჩვეულებრივი განათების ქსელის შეკვრა მცირე წინაღობის გამტარით სახიფათოა. (9.3) ფორმულის მიხედვით დენის ძალა იმდენად დიდი გახდება, რომ მას შეიძლება მძიმე შედეგები მოჰყვეს.

**59. გამტარის წინაღობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე**

ტემპერატურის ცვლილებით გამტარის წინაღობა იცვლება. ამაში დავრწმუნდებით, თუ აკუმულატორიდან დენს გავატარებთ ფოლადის სპირალში, რომელიც სანთურის ალით ხურდება. წრედში ჩართული





ამპერმეტრი გვიჩვენებს, რომ სპირალის ტემპერატურის ზრდის მი-  
ხედვით, დენის ძალა მცირდება.

თუ  $0^{\circ}\text{C}$ -ზე გამტარის წინალობა არის  $R_0$ ,  $t$  ტემპერატურაზე კი  $R$ , მაშინ წინალობის ფარდობითი ცვლილება, როგორც ცდა გვიჩვენებს, პროპორციულია  $t$  ტემპერატურის ცვლილებისა:

$$\frac{R-R_0}{R_0} = \alpha t. \quad (9.4)$$

$\alpha$  პროპორციულობის კოეფიციენტს წინალობის ტემპერატურული კოეფიციენტი ეწოდება. იგი ახასიათებს ნივთიერების წინალობის დამოკიდებულებას ტემპერატურაზე. წინალობის ტემპერატურული კოეფიციენტი რიცხობრივად ტოლია გამტარის წინალობის ფარდობითი ცვლილებისა ერთი  $K$ -ით გათბობის დროს. ლითონის გამტარისათვის  $\alpha > 0$  და უმნიშვნელოდ იცვლება ტემპერატურის შეცვლისას. თუ ტემპერატურის ცვლილების შუალედი მცირეა, მაშინ შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ  $\alpha$  მუდმივია და ტოლია მისი საშუალო მნიშვნელობისა ტემპერატურების ამ შუალედში. სუფთა ლითონებისთვის

$$\alpha \approx \frac{1}{273} K^{-1}.$$

ელექტროლიტთა ხსნარების წინალობა ტემპერატურის ზრდისას არა თუ იზრდება, არამედ იკლებს; მათთვის  $\alpha < 0$ . მაგალითად, სუფრის მარილის 10%-იანი ხსნარისათვის  $\alpha = -0,02 K^{-1}$ .

გათბობისას გამტარის გეომეტრიული ზომები უმნიშვნელოდ იცვლება. გამტარის წინალობა ძირითადად იცვლება კუთრი წინალობის შეცვლის გამო. კუთრი წინალობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე შეიძლება ვიპოვოთ, თუ (9.4) ფორმულაში ჩავსვათ  $R = \rho \frac{l}{S}$  და

$$R_0 = \rho_0 \frac{l}{S} \text{ მნიშვნელობებს. გამოთვლები გვაძლევს:}$$

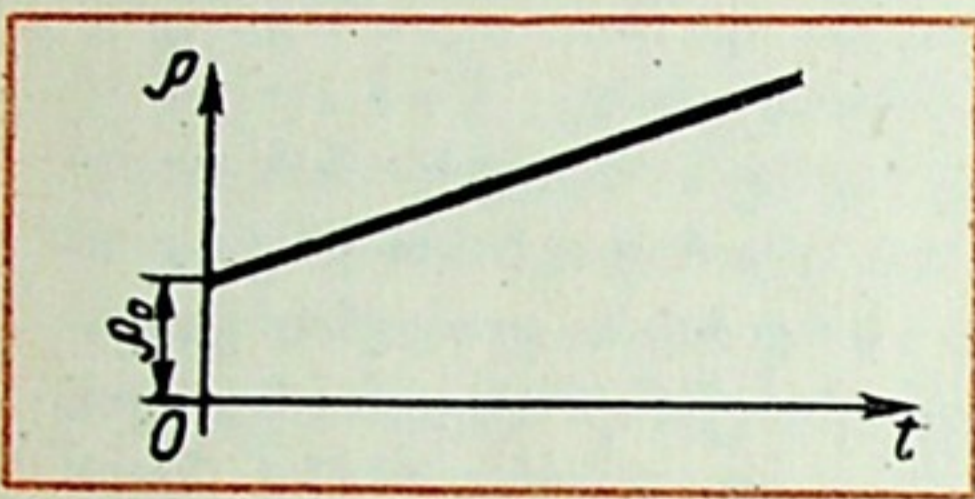
$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t). \quad (9.5)$$

რადგან  $\alpha$  მცირედ იცვლება ტემპერატურის ცვლილებისას, შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ კუთრი წინალობა ტემპერატურის წრფივი ფუნქციაა (სურ. 140). თუმცა  $\alpha$  კოეფიციენტი საკმაოდ მცირეა, მაგრამ მისი და წინალობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების გათვალისწინება აუცილებელია სახურებელ ხელსაწყოთა გაანგარიშებისას. მაგალითად, ჩვეულებრივი ვარვარის ნათურას ვოლფრამის ძაფის წინალობა 10-ჯერ და უფრო მეტჯერაც იზრდება მასში დენის გავლისას.





ზოგიერთი შენადნობის, მაგალითად, სპილენძის ნიკელთან შენადნობის — კონსტანტანის — წინალობის ტემპერატურული კოეფიციენტი ძალიან მცირეა:  $\alpha \approx 10^{-5} K^{-1}$ , კუთრი წინალობა კი დიდია:  $\rho \approx 10^{-6}$  ომი.მ. ასეთ შენადნობებს იყენებენ ეტალონური წინალობებისა და გამზომი ხელსაწყოების დამატებით წინალობათა დასამზადებლად, ე. ი. მაშინ, როცა საჭიროა წინალობა საგრძნობლად არ იცვლებოდეს ტემპერატურის ცვლილებისას.



სურ. 140.

ლითონთა წინალობის დამოკიდებულებას ტემპერატურაზე იყენებენ წინალობის თერმომეტრებში. ჩვეულებრივ, ასეთი თერმომეტრის ძირითად მუშა ელემენტად იღებენ პლათინის მავთულს, რომლის წინალობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე კარგადაა ცნობილი. ტემპერატურის ცვლილების შესახებ მსჯელობენ მავთულის წინალობის

ცვლილების მიხედვით, რომელსაც ზომავენ. ასეთი თერმომეტრები საშუალებას გვაძლევს გავზომოთ ძალიან დაბალი და ძალიან მაღალი ტემპერატურა, რისთვისაც არ გამოდგება ჩვეულებრივი სითხიანი თერმომეტრები.

**60. ზეგამტარობა**

1911 წ. ჰოლანდიელმა ფიზიკოსმა კამერლინგ-ონესმა აღმოაჩინა შესანიშნავი მოვლენა — ზეგამტარობა. მან შეამჩნია, რომ თხევად ჰელიუმში ვერცხლისწყლის გაცივებისას მისი წინალობა ჯერ თანდათან იცვლება, შემდეგ კი  $4,1 K$  ტემპერატურაზე მკვეთრად ეცემა ნულამდე (სურ. 141). ამ მოვლენას ზეგამტარობა უწოდეს. შემდეგში ბევრი სხვა ზეგამტარი აღმოაჩინეს.

ზეგამტარობა თავს იჩენს ძალიან დაბალ ტემპერატურაზე, არაუმეტეს  $25 K$ -ისა. ფორზაცზე, ცხრილში, მოცემულია ტემპერატურა, რომლის დროსაც ზოგიერთი ნივთიერება ზეგამტარი ხდება.

თუ ზეგამტარულ წრიულ გამტარში აღვძრავთ დენს, შემდეგ კი წყაროს გამოვრთავთ, დენის ძალა მასში უცვლელად რჩება ნებისმიერად დიდხანს. არაზეგამტარულ გამტარში კი მსგავსი შემთხვევისას დენი სწრაფად წყდება.

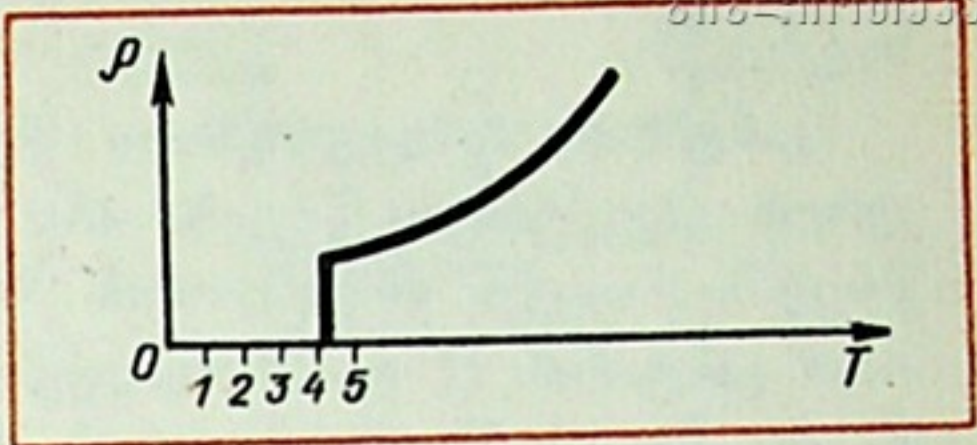
ზეგამტარებს ფართოდ იყენებენ პრაქტიკაში. მაგალითად, აგებენ ზეგამტარულგრაგნილიან მძლავრ ელექტრომაგნიტებს, რომლებიც





დროის დიდ შუალედებში ენერგის დაუხარჯავად წარმოქმნის მაგნიტურ ველს.

მაგრამ შეუძლებელია რაგინდ ძლიერი მაგნიტური ველის შექმნა ზეგამტარული მაგნიტით, რადგან ძალიან ძლიერი მაგნიტური ველი სპობს ზეგამტარულ მდგომარეობას. ასეთი ველი შეიძლება შექმნას დენმა თვით ზეგამტარში.



სურ. 141.

ამიტომ თითოეული გამტარისათვის ზეგამტარულ მდგომარეობაში არსებობს დენის ძალის კრიტიკული მნიშვნელობა, რომლის გადალახვის შემდეგ დენი ზეგამტარულ მდგომარეობას სპობს.

ზეგამტარულ მაგნიტებს იყენებენ ელემენტარულ ნაწილაკთა მაჩქარებლებში, მაგნიტოჰიდროდინამიკურ გენერატორებში (მჰდ გენერატორებში), რომლებიც მაგნიტურ ველში მოძრავ გახურებული იონიზირებული აირის ნაკადის მექანიკურ ენერგიას ელექტრულ ენერგიად გარდაქმნიან.

რომ მოხერხებულიყო ოთახის ტემპერატურაზე ზეგამტარული მასალების შექმნა, მაშინ გადაწყდებოდა უმნიშვნელოვანესი ტექნიკური პრობლემა: გამტარებით ენერგიის უდანაკარგო გადაცემა. ამჟამად ფიზიკოსები მუშაობენ ამ პრობლემის გადასაწყვეტად.

ზეგამტარობის ახსნა მხოლოდ კვანტური თეორიის საფუძველზეა შესაძლებელი. ეს 1957 წელს შეძლეს ამერიკელმა მეცნიერებმა ჯ. ბარდინმა, ლ. კუპერმა, ჯ. შრიფერმა და საბჭოთა მეცნიერმა აკად. ნ. ბოგოლიუბოვმა.

### 61. ელექტრული წრედი. გამტართა მიმდევრობითი და პარალელური შეერთება

[დენის წყაროდან გამტარებით ენერგია გადაეცემა მის მომხმარებელ მოწყობილობებს: ელექტრულ ნათურას, ელექტროძრავას, რადიომიმღებს] და ა. შ. ამისათვის ადგენენ სხვადასხვა სირთულის წრედებს. ელექტრული წრედი შედგება ენერგიის წყაროს, ელექტრული ენერგიის მომხმარებელი მოწყობილობის, შემაერთებელი სადენებისა და ჩამრთველისაგან. ხშირად ელექტრულ წრედში რთავენ ხელსაწყობებს, რომლებიც ზომავენ დენის ძალასა და ძაბვას წრედის სხვადასხვა უბანზე. ეს ხელსაწყობებია ამპერმეტრი და ვოლტმეტრი.



გამტართა შეერთების ყველაზე მარტივი და ხშირად გამოყენებული ხერხია მიმდევრობითი და პარალელური შეერთებები. საქართველოს ელექტროტექნიკის ინსტიტუტი

**გამტართა მიმდევრობითი შეერთება.** მიმდევრობითი შეერთების დროს ელექტრულ წრედს არა აქვს განშტოებანი. ყველა გამტარს წრედში რთავენ ერთიმეორის შემდეგ. 142-ე სურათზე ნაჩვენებია ორი გამტარის (1 და 2) მიმდევრობითი შეერთება; მათი წინალობებია  $R_1$  და  $R_2$ . ეს შეიძლება იყოს ორი ნათურა, ელექტროძრავას ორი გრაგნილი და ა. შ.

დენის ძალა ორივე გამტარში ერთნაირია, რადგან მუდმივი დენის დროს გამტარში ელექტრული მუხტი არ გროვდება და გამტარის ნებისმიერ განივკვეთში განსაზღვრული დროის შუალედში ერთი და იგივე მუხტი გადის. ამრიგად:

$$I_1 = I_2 = I. \quad (9.6)$$

ძაბვა (ანუ პოტენციალთა სხვაობა) წრედის აღებული უბნის ბოლოებზე უდრის პირველი და მეორე გამტარის ბოლოებზე არსებულ ძაბვათა ჯამს:

$$U = U_1 + U_2. \quad (9.7)$$

ესეუ გამოვიყენებთ ომის კანონს მთელი უბნისა და  $R_1$  და  $R_2$  წინალობის ცალკეული უბნებისათვის, დავამტკიცებთ, რომ სრული წინალობა მიმდევრობითი შეერთების დროს ტოლია:

$$R = R_1 + R_2. \quad (9.8)$$

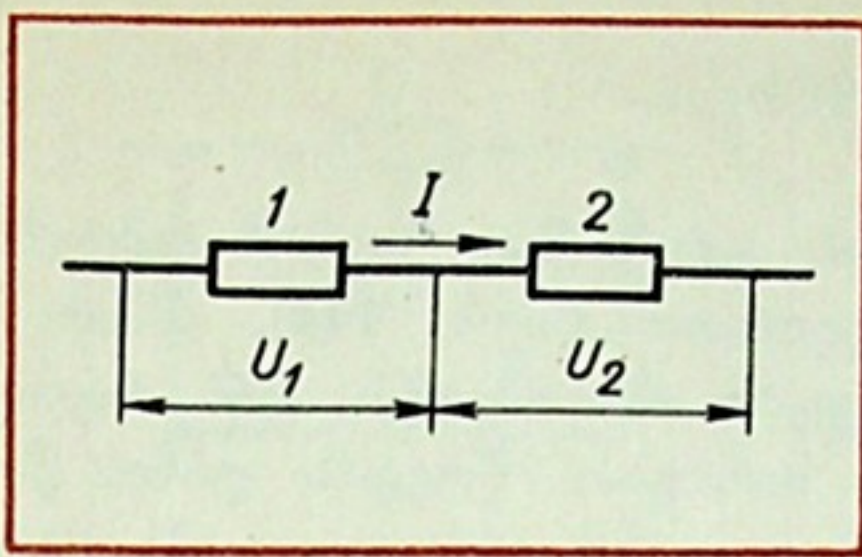
მსგავს ფორმულას მივიღებთ მიმდევრობით შეერთებულ გამტართა ნებისმიერი რიცხვისათვის.

მიმდევრობითი შეერთებისას გამტარების ბოლოებზე არსებული ძაბვა შემდეგ დამოკიდებულებაშია მათ წინალობებთან:

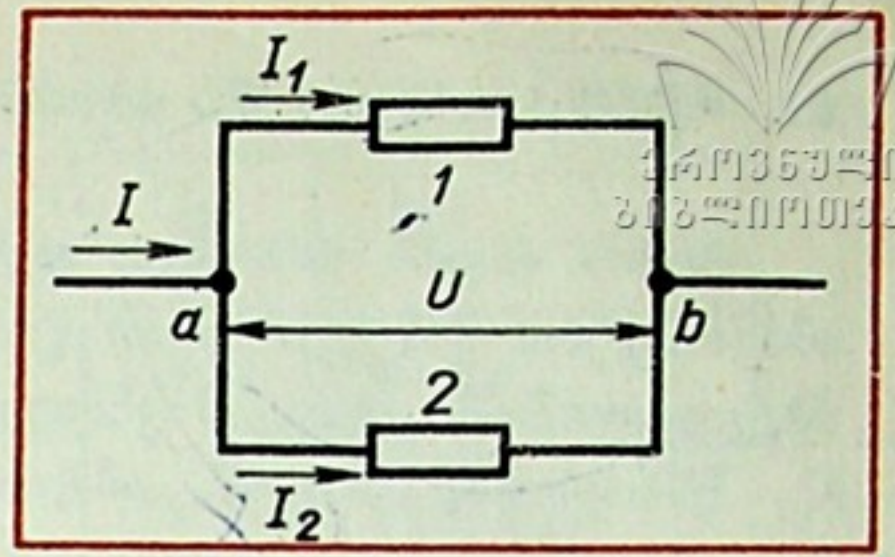
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (9.9)$$

**გამტართა პარალელური შეერთება.** 143-ე სურათზე ნაჩვენებია ორი გამტარის (1 და 2) პარალელური შეერთება. გამტართა წინალობებია  $R_1$  და  $R_2$ . ამ შემთხვევაში ელექტრული დენი, რომლის სიდიდეა  $I$ , განშტოვდება ორ ნაწილად. დენის ძალა პირველ და მეორე გამტარში აღენიშნოთ  $I_1$ -ით და  $I_2$ -ით რადგან  $a$  წერტილში — გამტართა განშტოების დასაწყისში (ასეთ წერტილს კვანძი ეწოდება) — ელექტრული მუხტი არ გროვდება, ამიტომ კვანძში დროის ერთეულ-





სურ. 142.



სურ. 143.

ში მოსული მუხტი ტოლი უნდა იყოს მუხტისა, რომელიც კვანძიდან იმავე დროში გადის. მაშასადამე,

$$I = I_1 + I_2. \quad (9.9)$$

$U$  ძაბვა პარალელურად შეერთებულ გამტარებზე ერთი და იგივეა.

განათების ქსელში დაცულია 220 ან 127 ვ ძაბვა. ამ ძაბვაზეა გათვალისწინებული ხელსაწყოები, რომლებიც ელექტრულ ენერგიას მოიხმარს, ამიტომ პარალელური შეერთება სხვადასხვა მომხმარებლის შეერთების ყველაზე უფრო გავრცელებული ხერხია. ამ შემთხვევაში რომელიმე ხელსაწყოს მწყობრიდან გამოსვლა ხელს არ უშლის დანარჩენების მუშაობას. მიმდევრობითი შეერთებისას კი ერთი ხელსაწყოს მწყობრიდან გამოსვლა მთელი წრედის განრთვას იწვევს.

ომის კანონის გამოყენებით  $R_1$  და  $R_2$  წინაღობის უბნებისათვის შეგვიძლია დავამტკიცოთ, რომ  $ab$  უბნის მთელი წინაღობის შებრუნებული სიდიდე ტოლია ცალკეულ გამტართა წინაღობების შებრუნებულ სიდიდეთა ჯამისა:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (9.10)$$

აქედან გამომდინარეობს, რომ

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (9.11)$$

პარალელური შეერთებისას გამტარებში არსებულ დენის სიდიდებსა და გამტართა წინაღობებს შორის არსებობს შემდეგი დამოკიდებულება:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (9.12)$$





**დენის ძალის გაზომვა.** დენის ძალის გასაზომად დენიან გამტარს ამპერმეტრი მიმდევრობით უნდა მივუერთოთ (სურ. 144). ამისთან, მხედველობაში უნდა მივიღოთ, რომ თვით ამპერმეტრს აქვს რაღაც  $R$ , წინალობა. ამიტომ, ამპერმეტრის ჩართვით წრედის უბნის წინალობა იზრდება და უცვლელი ძაბვისას დენის ძალა იკლებს (9.3) ომის კანონის თანახმად. ამპერმეტრმა საგრძნობლად რომ არ შეცვალოს გასაზომი დენის სიდიდე, მის წინალობას ძალიან ამცირებენ, ეს კარგად უნდა გვახსოვდეს და არასოდეს არ ვცადოთ „დენის ძალის გაზომვა“ განათების ქსელში როზეტთან ამპერმეტრის მიერთებით. მოხდება მოკლე ჩართვა. ხელსაწყოს მცირე წინალობის გამო დენის ძალა ისეთი დიდი გახდება, რომ ამპერმეტრის გრაფილი გადაიწვეება.

**ამპერმეტრის დაშუნტვა.** ყოველი ამპერმეტრი გაანგარიშებულია ისეთი დენის ძალის გასაზომად, რომელიც არ აღემატება რაღაც (მაქსიმალურ) მნიშვნელობას (მაგალითად, 5 ა-ს). მაგრამ ამპერმეტრთან რეზისტორის (ე. წ. შუნტის) პარალელური მიერთებით, შეიძლება გავზომოთ  $n$ -ჯერ (მაგალითად, 10-ჯერ) მეტი დენის ძალა:

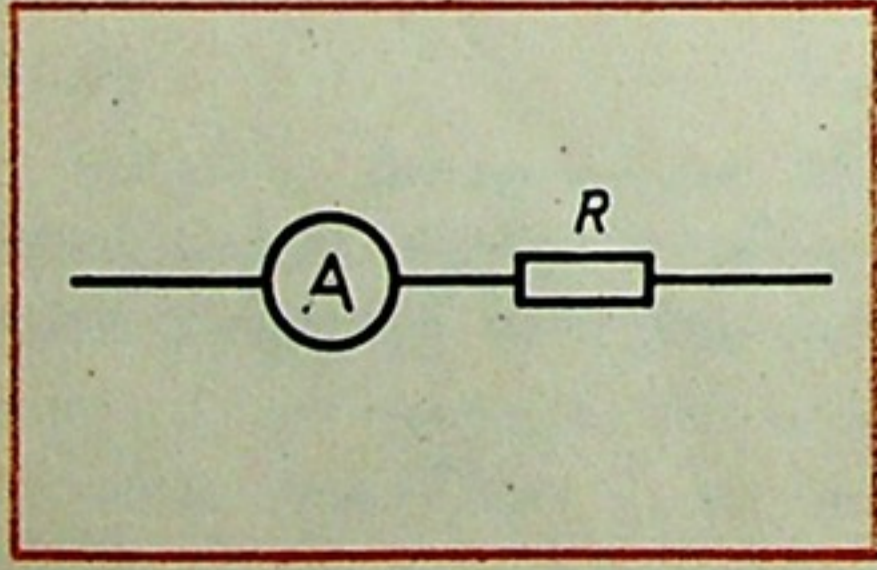
$$I = nI_0 \quad (I = 50\text{ა}).$$

ვიპოვოთ იმ შუნტის  $R_s$  წინალობა, რომელიც საჭიროა გამზომ ხელსაწყოზე აღნიშნულთან შედარებით  $n$ -ჯერ მეტი დენის ძალის გასაზომად. აღვნიშნოთ ამპერმეტრის წინალობა  $R_a$ -თი.

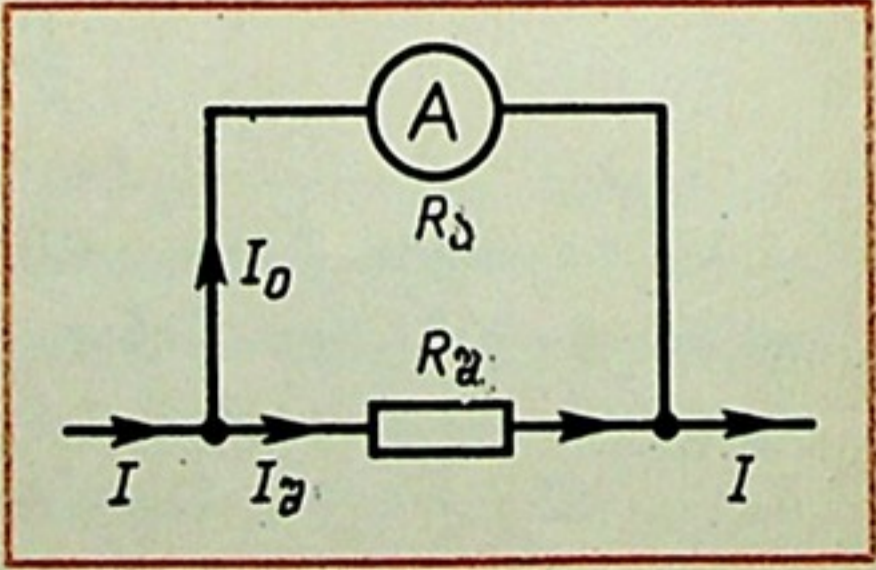
შუნტის ჩართვისას დენის ნაწილი ( $I_s$ ) მასში გაივლის. ამპერმეტრში უნდა გავიდეს დენი არაუმეტეს  $I_0$ -სა (5 ა) (სურ. 145).

$I_0$  დენის ძალა  $n$ -ჯერ ნაკლებია გასაზომზე:  $I_0 = \frac{I}{n} \left( 5\text{ა} = \frac{50\text{ა}}{10} \right)$ . მა-

შასადამე, ხელსაწყოს დანაყოფის ფასი  $n$ -ჯერ (10-ჯერ) იზრდება, ე. ი. ერთი დანაყოფით ისრის გადახრას  $n$ -ჯერ მეტი დენის ძალა შეესაბამება (1 ა-ს ნაცვლად — 10 ა). სხვანაირად რომ ვთქვათ, ამ-

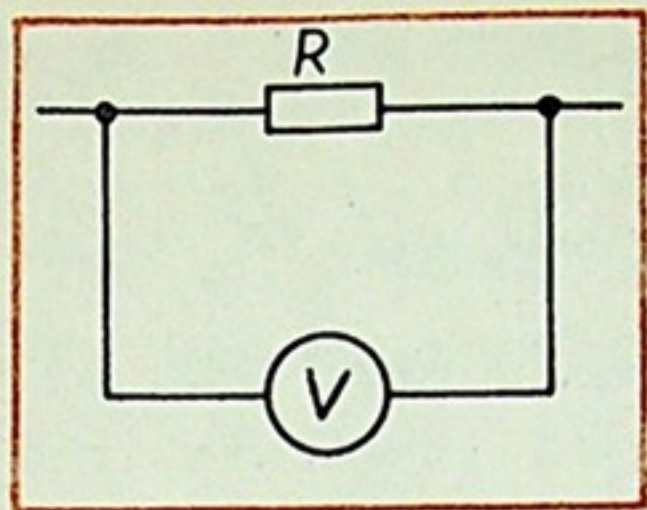


სურ. 144.

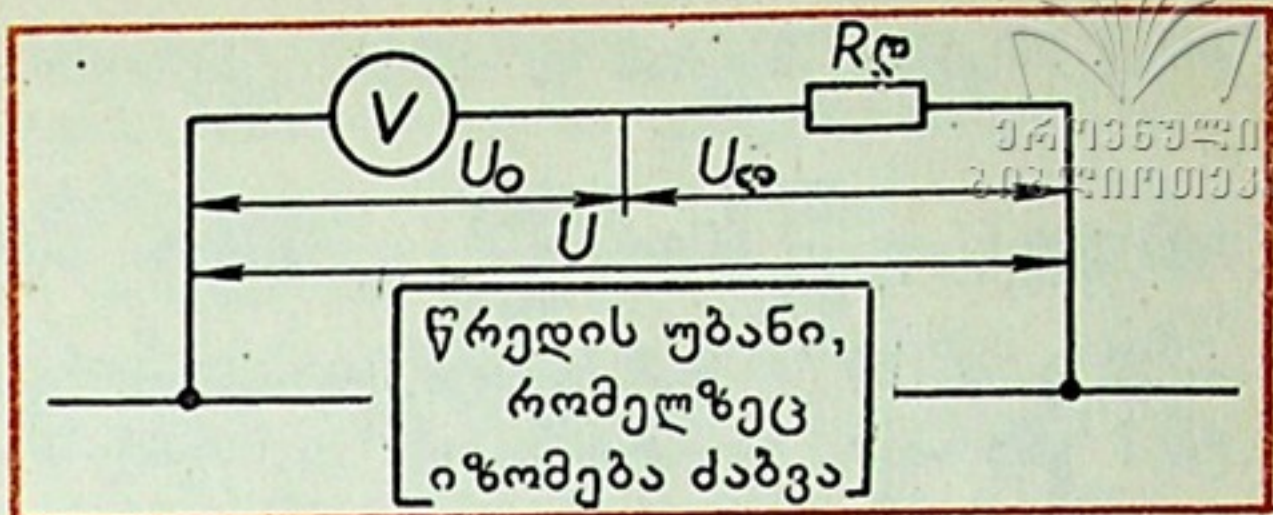


სურ. 145.





სურ. 146.



სურ. 147.

პერმეტრის გრძნობიერება მცირდება  $n$ -ჯერ. შუნტის მიერთებისას ხელსაწყოს ისარი გადაიხრება  $n$ -ჯერ (10-ჯერ) ნაკლები კუთხით, ვიდრე უშუნტოდ.

პარალელური შეერთებისას  $I = I_0 n = I_0 + I_a$  ძაბვა კი შუნტზე და ამპერმეტრზე ერთნაირია და ომის კანონის თანახმად ტოლია:  $I_0 R_s = I_a R_a$  თუ ორი უკანასკნელი ტოლობიდან გამოვრიცხავთ  $I_0$ -ს, მივიღებთ:

$$R_a = \frac{R_s}{n-1} \quad (9.13)$$

ძაბვის გაზომვა. ძაბვის გასაზომად  $R$  წინაღობის უბანს პარალელურად მიუერთებენ ვოლტმეტრს. ძაბვა ვოლტმეტრზე იგივე იქნება, რაც უბანზე (სურ. 146).

თუ ვოლტმეტრის წინაღობაა  $R_s$ , მაშინ წრედში მისი ჩართვის შემდეგ უბნის წინაღობა იქნება არა  $R$ , არამედ  $R' = \frac{RR_s}{R + R_s} < R$ .

ამის გამო წრედის უბანზე გასაზომი ძაბვა შემცირდება. იმისათვის, რომ ვოლტმეტრმა საგრძნობლად არ შეცვალოს გასაზომი ძაბვის სიდიდე, მისი წინაღობა მეტი უნდა იყოს წრედის იმ უბნის წინაღობასთან შედარებით, რომლის ბოლოებზეც ძაბვა იზომება. წრედში ვოლტმეტრის ჩართვისას არ იქმნება მისი გადაწვის საშიშროება, თუკი იგი ქსელის ძაბვაზე უფრო მაღალ ძაბვაზეა გაანგარიშებული.

**დამატებითი წინაღობის მიერთება ვოლტმეტრზე.** ნებისმიერი ვოლტმეტრი გაანგარიშებულია  $U_0$  ზღვრულ ძაბვაზე (მაგალითად, 50 ვ-ზე). მაგრამ თუ ვოლტმეტრს მიმდევრობით მივუერთებთ დამატებით რეზისტორს, რომლის წინაღობაა  $R_0$ , გავზომავთ  $n$ -ჯერ (მაგალითად, 10-ჯერ) მეტ ძაბვას,  $U = nU_0$  (500 ვ = 10 · 50 ვ).

ვიპოვოთ დამატებითი რეზისტორის წინაღობა, რომელიც საჭიროა  $n$ -ჯერ მეტი ძაბვის გასაზომად.

ვოლტმეტრის წრედში, დამატებითი რეზისტორის ჩართვისას ვოლტმეტრზე წინანდებურად იგივე  $U_0$  (50 ვ) ზღვრული ძაბვა შეიძ-



ლება მოედოს, მაგრამ ეს იქნება გასაზომი ძაბვის მხოლოდ  $\frac{1}{n}$  (1/10)

ნაწილი:  $U_0 = \frac{U}{n} \left( 50\text{ვ} = \frac{500\text{ვ}}{10} \right)$  დანარჩენი ნაწილი,  $U_{\text{ვ}} = U - U_0 = 500\text{ვ} -$

$- 50\text{ვ} = 450\text{ვ}$ , დამატებით რეზისტორზე მოდის (სურ. 147). ამიტომ გაზომვის ზღვარი  $n$ -ჯერ (10-ჯერ) იზრდება, ამდენჯერვე დიდდება ვოლტმეტრის დანაყოფის ფასი (10 ვ, ნაცვლად 1 ვ-სა) და, მაშასადამე, მცირდება მისი გრძნობიერება (10-ჯერ).

ვოლტმეტრსა და დამატებით რეზისტორში გადის ერთი და იგივე დენი. ამიტომ

$$U_0 = IR_3, U_{\text{ვ}} = IR. \text{ და } U = U_0 + U_{\text{ვ}} = IR_3 + IR_{\text{ვ}} = nU_0 = nIR_3.$$

აქედან

$$R_{\text{ვ}} = R_3(n-1).$$

9.14

### 68. მუდმივი დენის მუშაობა და სიმძლავრე

ელექტრულ წრედში ხდება ენერგიის რიგი გარდაქმნები. ზგამტარში დამუხტულ ნაწილაკთა მოწესრიგებული მოძრაობის დროს ელექტრული ველი მუშაობას ასრულებს. ამ მუშაობას დენის მუშაობას უწოდებენ.]

[განვიხილოთ წრედის ნებისმიერი უბანი. ეს შეიძლება იყოს ერთგვაროვანი გამტარი, მაგალითად, ვარვარის ნათურას ძაფი, ელექტროძრავას გრაგნილი და ა. შ. ვთქვათ,  $\Delta t$  დროის შუალედში გამტარის განივკვეთში გადის  $\Delta q$  მუხტი. მაშინ ელექტრული ველი შეასრულებს  $A = \Delta q U$  მუშაობას.

რადგან დენის ძალა  $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ , ამიტომ ეს მუშაობა ტოლია:

$$\boxed{A = IU \Delta t.} \quad (9.15)$$

[წრედის უბანზე დენის მუშაობა ტოლია დენის ძალის, ძაბვის და დროის იმ შუალედის ნამრავლისა, რომლის განმავლობაშიც მუშაობა შესრულდა.]

ენერგიის მუდმივობის კანონის თანახმად, ეს მუშაობა ტოლი უნდა იყოს ენერგიის ცვლილებისა წრედის განსაზღვრულ უბანზე. ამიტომ ენერგია, რომელიც წრედის მოცემულ უბანზე გამრიყოფა  $\Delta t$  დროში, ტოლია (9.15) ფორმულით გამოსახული დენის მუშაობისა.



თუ წრედის უბანზე მექანიკური მუშაობა არ სრულდება და დენი ქიმიურ მოქმედებას არ ახდენს, მაშინ მხოლოდ გამტარი თბება. გამტარი გამტარი სითბოს გარემომცველ სხეულებს აძლევს.

ეს შემდეგნაირად ხდება. ელექტრული ველი ანიჭებს აჩქარებას ელექტრონებს. კრისტალური მესრის იონებთან დაჯახებისას ისინი იონებს გადასცემენ თავის ენერგიას. ამის შედეგად იონთა წონასწორობის მდებარეობის ახლოს ქაოსური მოძრაობის ენერგია იზრდება. სწორედ ამას ნიშნავს შინაგანი ენერგიის გაზრდა. გამტარი თბება და სითბოს გადასცემს გარემომცველ სხეულებს. წრედის შეკვრიდან მცირე ხნის შემდეგ ტემპერატურის ცვლილება წყდება. ელექტრული ველის მუშაობის ხარჯზე გამტარს უწყვეტად გადაეცემა ენერგია. მიუხედავად ამისა, შინაგანი ენერგია არ იცვლება, რადგან გამტარი დენის მუშაობის ტოლ სითბოს რაოდენობას გარემომცველ სხეულებს გადასცემს. ამრიგად, დენის მუშაობის (9.15) ფორმულა განსაზღვრავს იმ სითბოს რაოდენობას, რომელსაც გამტარი სხვა სხეულებს გადასცემს.

(9.15)  $\int$  ფორმულაში ომის კანონის მიხედვით ან დაბვას გამოვსახავთ დენის ძალით, ან დენის ძალას — დაბვით, მივიღებთ სამ ეკვივალენტურ ფორმულას დენის მუშაობისათვის:  $\int$

$$A = IU\Delta t = I^2 R \Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t = Q. \quad (9.16)$$

$A = I^2 R \Delta t$  ფორმულის გამოყენება მოსახერხებელია გამტართა მიმდევრობითი შეერთების დროს, რადგან ამ შემთხვევაში დენის ძალა ყველა გამტარში ერთი და იგივეა. პარალელური შეერთებისას მოსახერხებელია  $A = \frac{U^2}{R} \Delta t$  ფორმულა, რადგან დაბვა ყველა გამტარში ერთი და იგივეა.

ინგლისელმა მეცნიერმა ჯოულმა და რუსმა მეცნიერმა ლენცმა, ცდების შედეგად აღმოაჩინეს კანონი, რომელიც განსაზღვრავს დენიანი გამტარის მიერ გამოყოფილ სითბოს რაოდენობას. ჯოულ-ლენცის კანონი შემდეგნაირად გამოითქმის: დენიანი გამტარის მიერ გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა ტოლია დენის ძალის კვადრატის, გამტარის წინაღობისა და დროის იმ შუალედის ნამრავლისა, რომლის განმავლობაშიც გამტარში გადიოდა დენი:

$$Q = I^2 R \Delta t. \quad (9.17)$$

ეს კანონი მივიღეთ ენერგიის მუდმივობის კანონზე დაფუძნებული მსჯელობით. (9.17) ფორმულის საშუალებით გამოვთვლით სითბოს რაოდენობას, რომელიც წრედის ნებისმიერ უბანზე ნებისმიერ გამტარში გამოიყოფა.



ყველა ელექტრული ხელსაწყო — ნათურა, ელექტროძრავა და ა. შ. — გაანგარიშებულია დროის ერთეულში განსაზღვრული ენერჯიის მოსახმარებლად. ამიტომ, დენის მუშაობასთან ერთად, დიდი მნიშვნელობა აქვს, დენის სიმძლავრის ცნებას. დენის სიმძლავრე ტოლია დენის მიერ  $\Delta t$  დროის შუალედში შესრულებული მუშაობის ფარდობისა დროის ამ შუალედთან.

სიმძლავრის განსაზღვრის თანახმად

$$P = \frac{A}{\Delta t} = UI. \quad (9.18)$$

მიღებული გამოსახულება შეიძლება გადავწეროთ რამდენიმე ეკვივალენტური ფორმით, თუ გამოვიყენებთ ომის კანონს წრედის უბნისათვის:

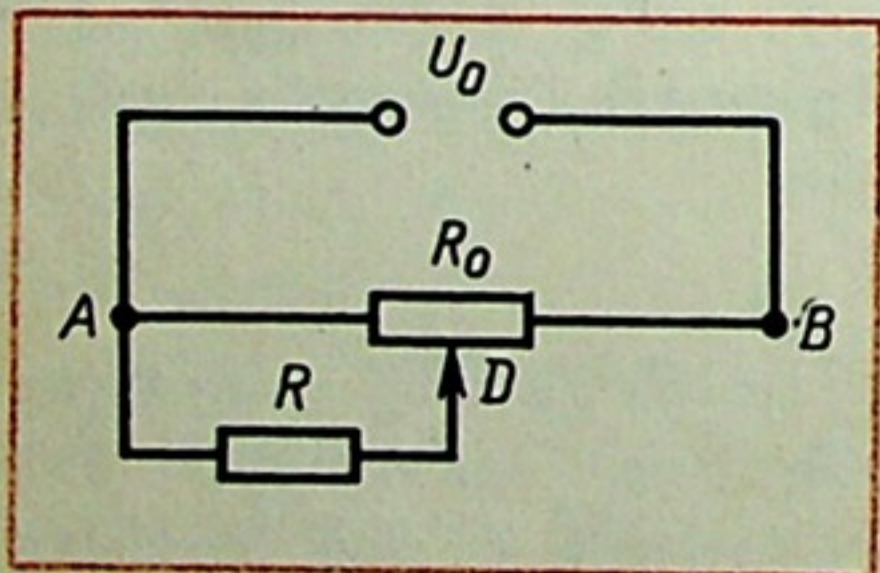
$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

უმრავლეს ხელსაწყოებზე ნაჩვენებია მათთვის საჭირო სიმძლავრე.

9. 1. როგორ გამოითქმის ომის კანონი? 2. როგორაა დამოკიდებული ტემპერატურაზე ელექტროლიტის ხსნარისა და ლითონის წინალობა? 3. რა სიძნელე ახლავს ზეგამტართა პრაქტიკულ გამოყენებას? 4. რატომ უნდა იყოს ამპერმეტრის წინალობა მცირე, ვოლტმეტრისა კი დიდი? 5. რას უწოდებენ დენის მუშაობას?

### ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები

ომის კანონის (9.3) გამოყენებით ამოცანების ამოხსნისას თვით ომის კანონის ფარდა, კარგად უნდა გვქონდეს წარმოდგენილი, რომ მიმდევრობით შეერთებისას, დენის ძალა ყველა გამტარში ერთნაირია, ხოლო ძაბვა წრედის ბოლოებზე წრედის ცალკეულ უბნებზე არსებული ძაბვების ჯამის ტოლია. პარალელური შეერთებისას ძაბვა ერთნაირია ყველა გამტარზე, ხოლო დენის ძალა წრედის განუშტოებელ ნაწილში ტოლია ცალკეულ გამტარებში არსებული დენის ძალების ჯამისა.



სურ. 148.

(9.7), (9.8), (9.10) და (9.12) ფორმულები ომის კანონიდან გამომდინარეობს, მაგრამ უკეთესია ისინი დავიხსოვოთ და უშუალოდ გამოვიყენოთ ამოცანების ამოხსნისას.

დენის მუშაობისა და სიმძლავრის შესახებ ამოცანების ამოხსნისას უნდა გამოვიყენოთ (9.16) და (9.18) ფორმულები.



1. რეოსტატთან წრედში დენის ძალა  $I=8,2$  ა, ხოლო რეოსტატის მომჭერებზე დაბვა  $U=14,4$  ვ. განსაზღვრეთ რეოსტატის იმ ნაწილის  $R$  წინაღობა, რომელშიც დენი არსებობს.

ამოხსნა: ომის კანონის თანახმად  $I = \frac{U}{R}$ , აქედან

$$R = \frac{U}{I} = 4,5 \text{ ომი.}$$

2. მოწყობილობას, რომლის დანიშნულებაა ელექტრული წრედის შეხავალზე მოგვცეს მოცემული მუდმივი  $U_0$  დაბვის  $U$  ნებისმიერი ნაწილი, დაბვის გამყოფი ეწოდება. ჩვეულებრივ იგი დამზადებულია დიდი კუთრი წინაღობის გამტარისგან და  $U$  დაბვის მდოვრე რეგულირებისათვის აღჭურვილია მცოცავი კონტაქტით.

დაბვის ასეთ გამყოფს პოტენციომეტრს უწოდებენ. მისი ჩართვის სქემა გამოსახულია 148-ე სურათზე.  $AB$  გამტარის წინაღობა  $R_0=4$  კომი, დაბვა  $U_0=220$  ვ. მცოცავ  $D$  კონტაქტსა და პოტენციომეტრის  $A$  მომჭერს შორის ჩართულია დატვირთვა (მომხმარებელი), რომლის წინაღობა  $R=10$  კომი.

განვსაზღვროთ  $U$  დაბვა დატვირთვაზე, როცა მცოცავი  $D$  კონტაქტი  $AB$  გამტარს ორ ტოლ ნაწილად ყოფს.

ამოხსნა. წრედში არის მიმდევრობით შეერთებული ორი უბანი:  $AD$ , რომელიც შედგება პარალელურად შეერთებულ  $AB$  გამტარის ნახევრისა ( $R_0/2$  წინაღობით) და დატვირთვისაგან ( $R$  წინაღობით), და  $DB$ , რომლის წინაღობაა  $R_0/2$ .  $AD$  უბნის წინაღობა ტოლია:

$$R_{AD} = \frac{\frac{R_0}{2} R}{\frac{R_0}{2} + R} = \frac{R_0 R}{R_0 + 2R}$$

წრედის საერთო წინაღობაა:

$$R_{AB} = R_{AD} + \frac{R_0}{2} = \frac{2R_{AD} + R_0}{2}$$

წრედში დენის ძალა:

$$I = \frac{U_0}{R_{AB}} = \frac{2U_0}{2R_{AD} + R_0}$$

საძიებელი დაბვა ტოლია

$$U = IR_{AD} = \frac{2U_0 R_{AD}}{2R_{AD} + R_0} = \frac{2U_0 R}{R_0 + 4R} = 100 \text{ ვ.}$$



1. სატელევიზიო მხლავის ეკრანისაკენ მოძრავი ელექტრონები ელექტრულ კონას ქმნიან. რომელ მხარესაა კონაში დენი მიმართული?
2. რატომაა, რომ 57-ე პარაგრაფში აღწერილ ცდებში, გამტარის გასწვრივ პოტენციალის ვარდნის დაკვირვებისათვის იყენებენ ხის ჯოხს და არა ლითონის გამტარს?
3. განსაზღვრეთ სპილენძის გამტარის განივკვეთის ფართობი და სიგრძე, თუ მისი წინაღობა 0,2 ომია, მასა კი 0,2 კგ. სპილენძის სიმკვრივეა 8900 კგ/მ<sup>3</sup>.
4. გალვანომეტრი, რომლის შიდა წინაღობა 600 ომია, დაშუნტულია 25-ომიანი წინაღობით. რამდენჯერ შეიცვლება გალვანომეტრის დანაყოფის ფასი?
5.  $U_0 = 150$  ვ ზღვრულ ძაბვაზე გაანგარიშებული  $R_3 = 1000$  ომი შიგა წინაღობის ვოლტმეტრით საჭიროა 6-ჯერ მეტი ძაბვა ( $U = 900$  ვ) გავზომოთ. რა დამატებითი წინაღობა უნდა მივუერთოთ ვოლტმეტრს მიმდევრობით, რომ გაზომვა ჩავატაროთ?
6. 300 მ სიგრძის სპილენძის გამტარზე მოდებულია 36 ვ ძაბვა. იპოვეთ ელექტრონთა მოწესრიგებული მოძრაობის საშუალო სიჩქარე გამტარში, თუ სპილენძში გამტარობის ელექტრონთა კონცენტრაციაა  $8,5 \cdot 10^{28}$  მ<sup>-3</sup>.
7. როგორ დავრწმუნდეთ, რომ წრიულ ზეგამტარში მართლაც გადის უცვლელი დენი?
8. გრძელი მავთული, რომლის ბოლოებზეც მუდმივ ძაბვას ინარჩუნებენ, გახურდა გაწითლებამდე. მავთულის ნაწილი ჩაუშვეს ცივ წყალში. რატომ ხურდება ამ დროს წყლის ზემოთ დარჩენილი მავთულის ნაწილი კიდევ უფრო ძლიერ?
9. ელექტროქურის სპირალი გადაიწვა და ბოლოების შეერთების შემდეგ რამდენადმე დამოკლდა. როგორ შეიცვალა განსაზღვრულ დროში ქურის მიერ გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა?
10. მუდმივი ძაბვის ქსელში ჩართულმა ელექტროქურამ რაღაც დროის შუალედში გამოყო  $Q$  სითბოს რაოდენობა. რა სითბოს რაოდენობას გამოყოფს იმავე დროში ორი ასეთივე ქურა, რომლებიც იმავე ქსელშია ჩართული მიმდევრობით? პარალელურად?
11. ელექტრომაგნიტის ალუმინის გრაგნილს  $0^\circ\text{C}$  ტემპერატურაზე 5 კვტ სიმძლავრე სჭირდება. რას უდრის მოხმარებული სიმძლავრე, თუ მუშაობის დროს გრაგნილის ტემპერატურამ  $60^\circ\text{C}$  მიაღწია, ძაბვა კი უცვლელი დარჩა? უპასუხეთ იმავე კითხვას, თუ გრაგნილში დენის ძალა უცვლელი რჩება.
12. „ფიზიკა X“ სახელმძღვანელოს სამმილიონიანი ტირაჟის დასამზადებლად საჭიროა 1200 ტ ქაღალდი. ამ ქაღალდის გამომუშავებაზე იხარჯება 840 000 კვტ. სთ ელექტროენერგია. ამ რიცხვების მასშტაბი შეიძლება წარმოვიდგინოთ შემდეგი მაგალითით.  
 ელმავალი, რომელიც იმავე მასის შემადგენლობას ეწევა და საჭიროებს იმავე რაოდენობის ენერგიას, 7 დღე-ღამეში გაივლის 7500 კმ-ს.  
 როგორი იქნება ელმავლის მკვ და დენის ძალა მის ძრავებში, თუ კონტაქტური ქსელის ძაბვაა 3000 ვ, ელმავლის წევის ძალა კი დაახლოებით შემადგენლობის წონის  $1/30$ -ს შეადგენს?





### 84. ელექტრომაგნიტური ძალა

თუ გამტარით შევაერთებთ ლითონის ორ ბურთულას, რომლებსაც საპირისპირო ნიშნის მუხტები აქვს, ამ მუხტების ელექტრული ველის გავლენით გამტარში გაივლის ელექტრული დენი (სურ. 149). ეს დენი იქნება ძალიან ხანმოკლე. მუხტები სწრაფად განეიტრალებიან, ბურთულებს შორის პოტენციალთა სხვაობა მოისპობა და ელექტრული ველის დაძაბულობა ნული გახდება.

**გარე ძალები.** დენი რომ მუდმივი იყოს, საჭიროა ბურთულებს შორის არსებობდეს მუდმივი ძაბვა. ამისათვის კი აუცილებელია მოწყობილება (დენის წყარო), რომელიც მუხტებს გადაადგილებს განსაზღვრული მიმართულებით. ეს მიმართულება საპირისპიროა იმ ძალის მიმართულებისა, რომელიც მუხტებზე მოქმედებს ელექტრული ველის მხრივ. ასეთ მოწყობილობაში მუხტებზე უნდა მოქმედებდეს არაელექტრული წარმოშობის ძალაც (სურ. 150). **მ ა რ ტ ო ე ლ ე ქ ტ რ უ ლ ვ ე ლ ს** (კულონური ველი) რომელსაც დამუხტული ნაწილაკები ქმნიან, არ შეუძლია მუდმივი დენის შენარჩუნება წრედში.

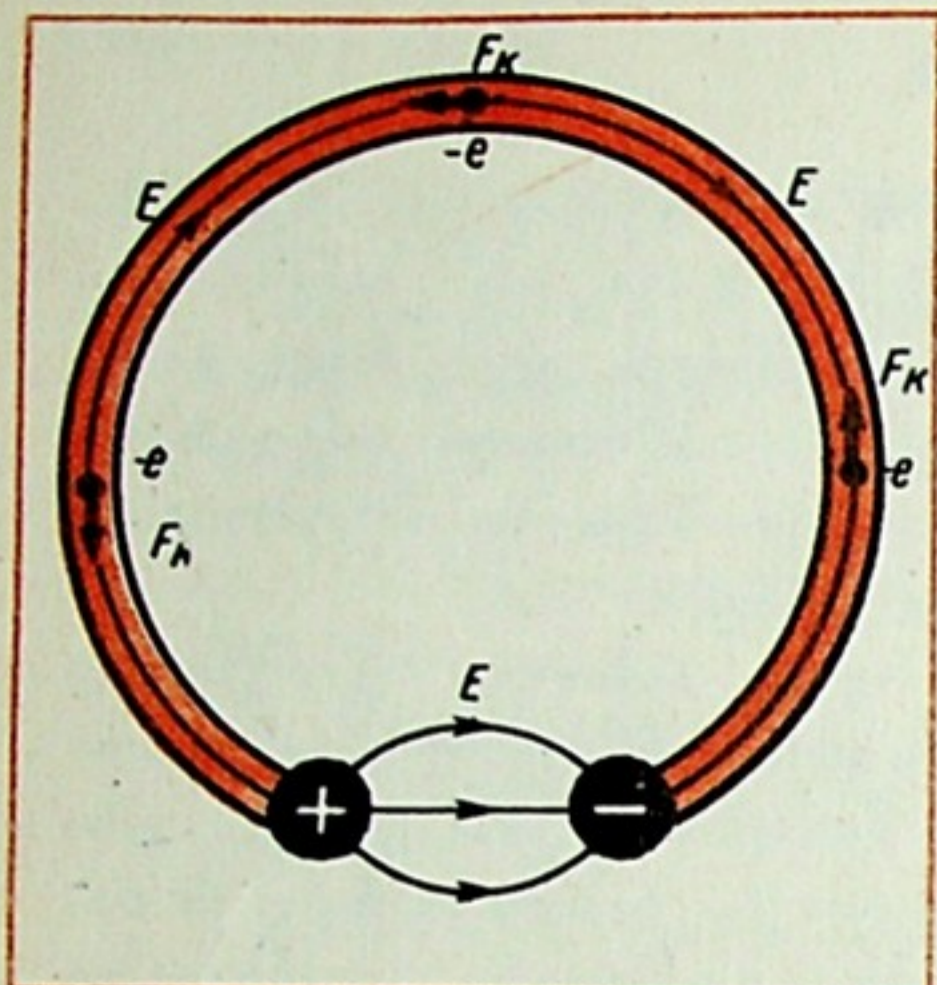
ელექტრულად დამუხტულ ნაწილაკებზე მოქმედ ნებისმიერ ძალებს, გარდა ელექტროსტატიკური (ე. ი. კულონური) ძალებისა, გარე ძალებს უწოდებენ.

დასკვნა, რომ წრედში მუდმივი დენის შენარჩუნებისათვის აუცილებელია გარე ძალების არსებობა, კიდევ უფრო ნათელი გახდება ენერჯიის მუდმივობის კანონის განხილვით. ელექტროსტატიკური ველი პოტენციალურია. ამ ველის მუშაობა დამუხტული ნაწილაკების გადაადგილებისათვის შეკრულ ელექტრულ წრედში ნულის ტოლია. გამტარებში დენის გავლას კი თან ახლავს ენერჯიის გამოყოფა — გამტარი თბება. მაშასადამე, ნებისმიერი წრედისათვის აუცილებლად უნდა არსებობდეს ენერჯიის რაღაც წყარო, რომელიც წრედს მიაწოდებს ენერჯიას. ამ წყაროში კულონურ ძალებთან ერთად აუცილებლად უნდა მოქმედებდეს გარე, არაპოტენციალური ძალები. ამ ძალთა მუშაობა შეკრული კონტურის გასწვრივ ნულისაგან განსხვავებული უნდა იყოს. დენის წყაროში სწორედ ამ ძალების მუშაობის შედეგად იძენენ დამუხტული ნაწილაკები ენერჯიას, რომელსაც შემდეგ მოძრაობისას ელექტრული წრედის გამტარებს გადასცემენ.

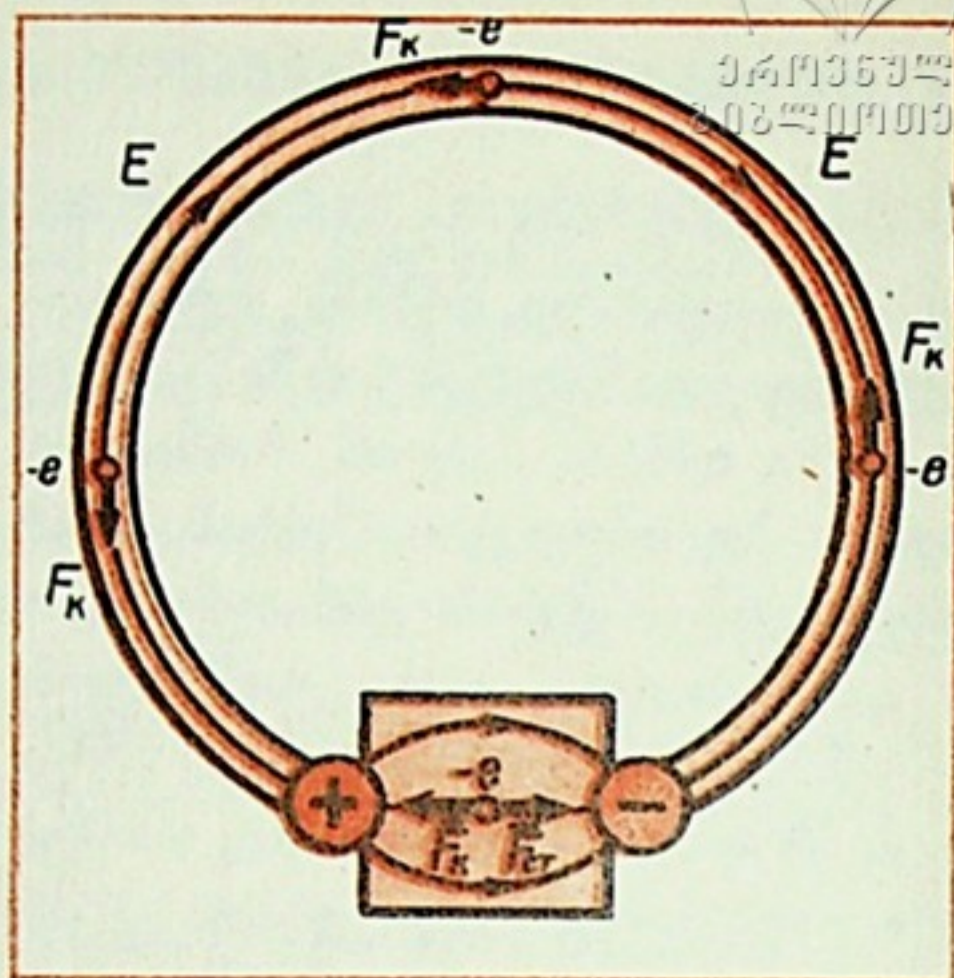
დენის ყველა წყაროში, — ელექტროსადგურების გენერატორებში, გალვანურ ელემენტებში, აკუმულატორებში და ა. შ. — დამუხტული ნაწილაკები მოძრაობაში მოჰყავს გარე ძალებს.

წრედის შეკვრის დროს ელექტრული ველი იქმნება წრედის ყველა გამტარში. წყაროს შიგნით მუხტები მოძრაობენ გარე ძალების





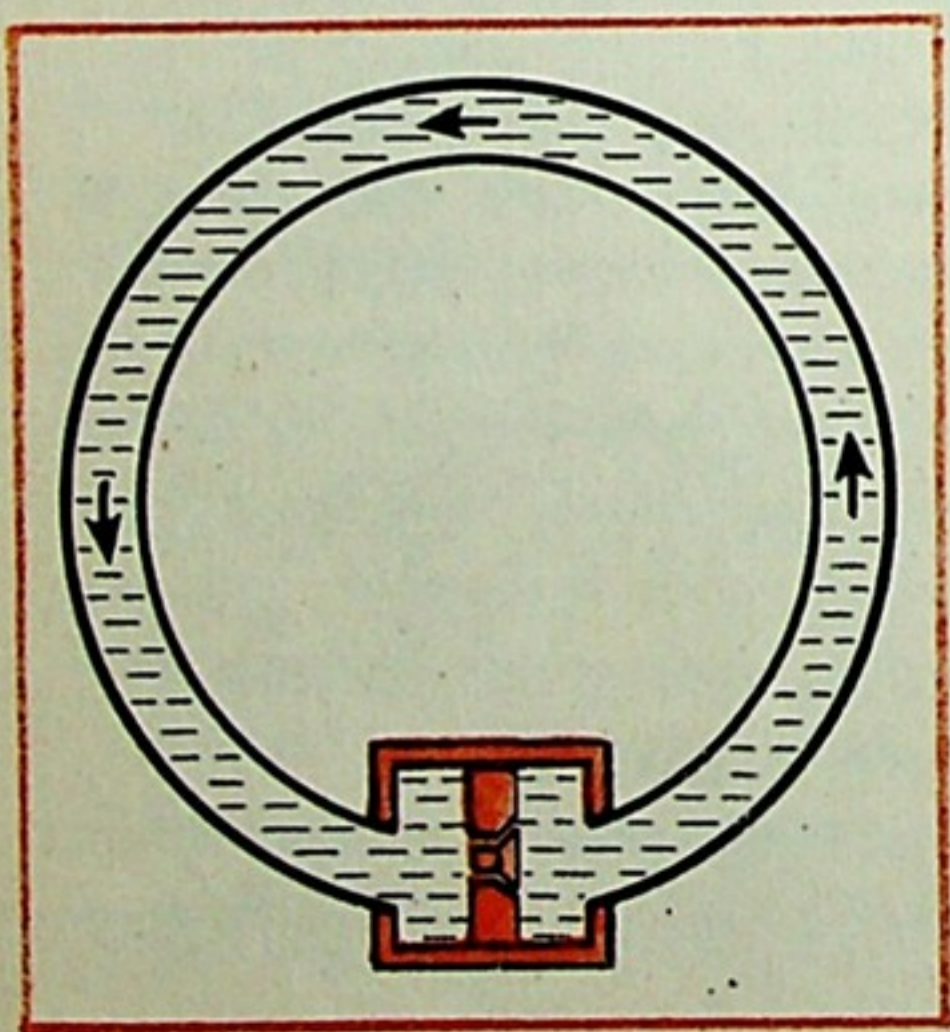
სურ. 149.



სურ. 150.

გავლენით კულონური ძალების საწინააღმდეგოდ (უარყოფითი მუხტები პლუსიდან მინუსისკენ), წრედის მთელ დანარჩენ ნაწილში კი მუხტებს ამოძრავებს ელექტრული ველი (სურ. 150).

ანალოგია ელექტრულ დენსა და სითხის დინებას შორის. ზემოთქმული უკეთ რომ გავიგოთ, გამტარში არსებული ელექტრული დენი შევადაროთ მილებში სითხის დინებას. პორიზონტალური მილის ნებისმიერ უბანზე სითხე მიედინება უბნის ბოლოებზე არსებულ წნევათა სხვაობის გამო. სითხე გადაადგილდება წნევის შემცირების მიმართულებით. მაგრამ წნევის ძალა სითხეში დრეკადობის ძალის ერთ-



სურ. 151.

ერთი სახეა, რომელიც პოტენცი-  
ალურია მსგავსად კულონური ძა-  
ლისა. ამიტომ ამ ძალის მუშაობა  
შეკრულ გზაზე ნულის ტოლია  
და მართო ამ ძალას არ შეუძლია  
მილებში წყლის ხანგრძლივი  
ცირკულაცია. სითხის დინებას  
თან ახლავს ენერჯის კარგვა ხა-  
ხუნის ძალთა მოქმედების გამო.  
წყლის ცირკულაციისათვის აუ-  
ცილებელია ტუმბო. მისი დგუში  
მოქმედებს წყლის ნაწილაკებზე და  
ქმნის მუდმივ წნევათა სხვაობას,  
ტუმბოს შესავალსა და გამოსავალ-  
ზე (სურ. 151). ამის გამო, სითხე  
მიედინება მილში. ტუმბო არის  
დენის წყარო ანალოგი, ხოლო



გარე ძალების როლს ასრულებს ძალა, რომელიც წყალზე მოქმედებს მოძრავი დგუშის მხრიდან. ტუმბოს შიგნით სითხე მიედინება ნაკლები წნევის უბნიდან მეტი წნევის უბნებისაკენ. წნევათა სხვაობა ძაბვის ანალოგიურია.

გარე ძალთა ბუნება. გარე ძალთა ბუნება მეტად მრავალფეროვანია. ელექტროსადგურის გენერატორებში გარე ძალა ის ძალაა, რომლითაც მაგნიტური ველი ელექტრონებზე მოქმედებს მოძრავ გამტარებში. ამის შესახებ მოკლედ უკვე იყო ლაპარაკი VIII კლასის ფიზიკის კურსში.

გალვანურ ელემენტში, მაგალითად, ვოლტას ელემენტში, ქიმიური ძალები მოქმედებს. ვოლტას ელემენტი შედგება თუთიისა და სპილენძის ელექტროდებისაგან, რომლებიც ფოგირდმჟავას ხსნარშია ჩაშვებული. ქიმიური ძალები იწვევს თუთიის გახსნას მჟავაში ამ დროს ხსნარში გადადის თუთიის დადებითად დამუხტული იონები, თვით თუთიის ელექტროდი კი უარყოფითად იმუხტება. სპილენძი ძალიან ცუდად იხსნება ფოგირდმჟავაში. (ამიტომ თუთიისა და სპილენძის ელექტროდებს შორის წარმოიქმნება პოტენციალთა სხვაობა, რომელიც აპრობებს დენს შეკრულ ელექტრულ წრედში)

ელექტრომამოძრავებელი ძალა. გარე ძალების მოქმედება ხასიათდება მნიშვნელოვანი ფიზიკური სიდიდით, რომელსაც ელექტრომამოძრავებელი ძალა (შემოკლებით ემ ძალა) ეწოდება. შეკრულ კონტურში ელექტრომამოძრავებელი ძალა წარმოადგენს გარე ძალების მიერ კონტურის გასწვრივ მუხტის გადაადგილებისათვის შესრულებული მუშაობის შეფარდებას ამ მუხტთან<sup>1</sup>:

$$\mathcal{E} = \frac{A_a}{\Delta q} \quad \text{ვოლტი} \quad (9.19)$$

ისე როგორც პოტენციალთა სხვაობა, ემ ძალა იზომება ვოლტებით.

წრედის ნებისმიერ უბანზე შეიძლება ვილაპარაკოთ ელექტრომამოძრავებელ ძალაზე. იგი გარე ძალების კუთრი მუშაობაა (მუშაობა ერთეული დადებითი მუხტის გადაადგილებისათვის) არა მთელ კონტურში, არამედ მარტო მოცემულ უბანზე. გალვანური ელემენტის ელექტრომამოძრავებელი ძალა არის ელემენტის შიგნით გარე ძალთა მიერ შესრულებული მუშაობა ერთეული დადებითი მუხტის გადასატანად ერთი პოლუსიდან მეორეზე. გარე ძალების მუშაობა არ

<sup>1</sup> როგორც განსაზღვრიდან ჩანს, ემ ძალა არის ერთეული დადებითი მუხტის გადაადგილებისათვის შესრულებული მუშაობა და არა ძალა ამ სიტყვის ჩვეულებრივი გაგებით. აქაც გამოყენებულია მოუხერხებელი, მაგრამ ღიდი ხნის წინათ დადგენილი ტერმინი.



შეიძლება პოტენციალთა სხვაობით გამოისახოს, რადგან გარე ძალები არაპოტენციალურია, მათი მუშაობა ტრაექტორიის ფორმისა და მოძრაობის კიდებულს. მაგალითად, გარე ძალების მუშაობა დენის წყაროს მოძრაობებს შორის მუხტის გადაადგილებისას თვით წყაროს გარეთ ნულის ტოლია.

### 65. ომის კანონი სრული წრედისათვის

განვიხილოთ უმარტივესი სრული (ან შეკრული) წრედი, რომელიც შედგენილია წყაროსა (გალვანური ელემენტის, აკუმულატორისა ან გენერატორისაგან) და  $R$  წინაღობის რეზისტორისაგან (სურ. 152). დენის წყაროს აქვს  $\mathcal{E}$  ემ ძალა და  $r$  წინაღობა. წყაროს წინაღობას ხშირად შიდა წინაღობას უწოდებენ და განასხვავებენ წრედის  $R$  გარე წინაღობისაგან. გენერატორში  $r$  გრაგნილის წინაღობაა, გალვანური ელემენტში კი — ელექტროლიტის ხსნარისა და ელექტროდების წინაღობა.

ომის კანონი შეკრული წრედისათვის ერთმანეთთან აკავშირებს წრედში არსებულ დენის ძალას, ემ ძალასა და წრედის  $R+r$  სრულ წინაღობას. ამ კავშირს თეორიულად დავადგენთ, თუ გამოვიყენებთ ენერჯიის მუდმივობის კანონსა და ჯოულ — ლენცის კანონს (9.17).

ვთქვათ,  $\Delta t$  დროში გამტარის განიკვეთში გადის  $\Delta q$  მუხტი. მაშინ მუხტის გადაადგილებისათვის შესრულებული გარე ძალთა მუშაობა ასე დაიწერება:  $A_g = \mathcal{E} \Delta q$ . დენის ძალის (9.1) განსაზღვრის თანახმად  $\Delta q = I \Delta t$ .

ამიტომ

$$A_g = \mathcal{E} I \Delta t. \quad (9.20)$$

ამ მუშაობის შესრულების დროს წრედის შიდა და გარე უბნებზე, რომელთა წინაღობებია  $r$  და  $R$ , გამოიყოფა რაღაც სითბოს რაოდენობა. ჯოულ — ლენცის კანონის თანახმად იგი ტოლია:

$$Q = I^2 R \Delta t + I^2 r \Delta t. \quad (9.21)$$

ენერჯიის მუდმივობის კანონის თანახმად,  $A = Q$ . (9.20)-ის და (9.21)-ის გატოლებით მივიღებთ:

$$\mathcal{E} = IR + Ir. \quad (9.22)$$

დენის ძალისა და წრედის უბნის წინაღობის ნამრავლს ხშირად ძაბვის ვარდნას უწოდებენ ამ უბანზე. ამრიგად, ემ ძალა ტოლია ჩაკეტილი წრედის შიდა და გარე უბნებზე ძაბვის ვარდნათა ჯამისა.)



შვეულბრივ ომის კანონს ჩაკეტილი წრედისათვის შემდეგი სახით წერენ:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r} \quad (9.23)$$

სრულ წრედში დენის ძალა უდრის წრედის ემ ძალის შეფარდებას მის სრულ წინაღობასთან.

დენის ძალა დამოკიდებულია სამ სიდიდეზე:  $\mathcal{E}$  ემ ძალასა, წრედის  $R$  გარე და  $r$  შიდა წინაღობაზე. შიდა წინაღობა საგრძნობ გავლენას არ ახდენს დენის ძალაზე, თუ ის მცირეა გარე წინაღობასთან შედარებით ( $R \gg r$ ). ამ დროს დაბეჭდვა წყაროს მომჭერებზე დაახლოებით ემ ძალის ტოლია:

$$U = IR \approx \mathcal{E}.$$

მაგრამ მოკლე ჩართვისას ( $R \rightarrow 0$ ) დენის ძალა წრედში სწორედ წყაროს შიდა წინაღობით განისაზღვრება. დენის ძალა შეიძლება ძალიან დიდი გახდეს, თუ ემ ძალა რამდენიმე ვოლტია და  $r$  მცირეა (მაგალითად, აკუმულატორისათვის  $r \approx 0,1 - 0,001$  ომია). ამ დროს გამტარები შეიძლება გადნეს და თვით წყარო მწყობრიდან გამოვიდეს.

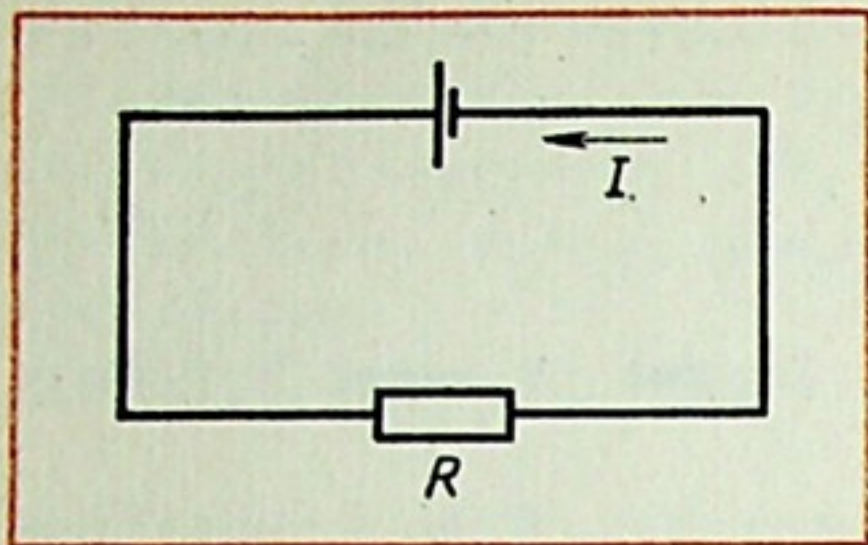
თუ წრედი შეიცავს მიმდევრობით შეერთებულ რამდენიმე ელემენტს, რომელთა ემ ძალებია  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$  და ა. შ., მაშინ წრედის სრული ემ ძალა ტოლია ცალკეულ ელემენტთა ემ ძალების ალგებრული ჯამისა წყაროს ემ ძალის ნიშნის გასარკვევად საჭიროა, წინასწარ პირობითად შევარჩიოთ კონტურის შემოვლის დადებითი მიმართულება. 153-ე სურათზე დადებითად (ნებისმიერად) ვთვლით საათის ისრის მოძრაობის საწინააღმდეგო მიმართულებას.

თუ წრედის შემოვლისას წყაროს უარყოფითი პოლუსიდან გადავდივართ დადებითისკენ, მაშინ ემ ძალა  $\mathcal{E} > 0$ . წყაროს შიგნით გარე ძალები ამ დროს დადებით მუშაობას ასრულებენ. თუკი წრედის შემოვლისას წყაროს დადებითი პოლუსიდან გადავდივართ უარყოფითისკენ, ემ ძალა იქნება უარყოფითი. წყაროს შიგნით გარე ძალები უარყოფით მუშაობას ასრულებენ. მაგალითად, 158-ე სურათზე გამოსახული წრედის შემთხვევაში კონტურის საათის ისრის მოძრაობის საწინააღმდეგოდ შემოვლისას

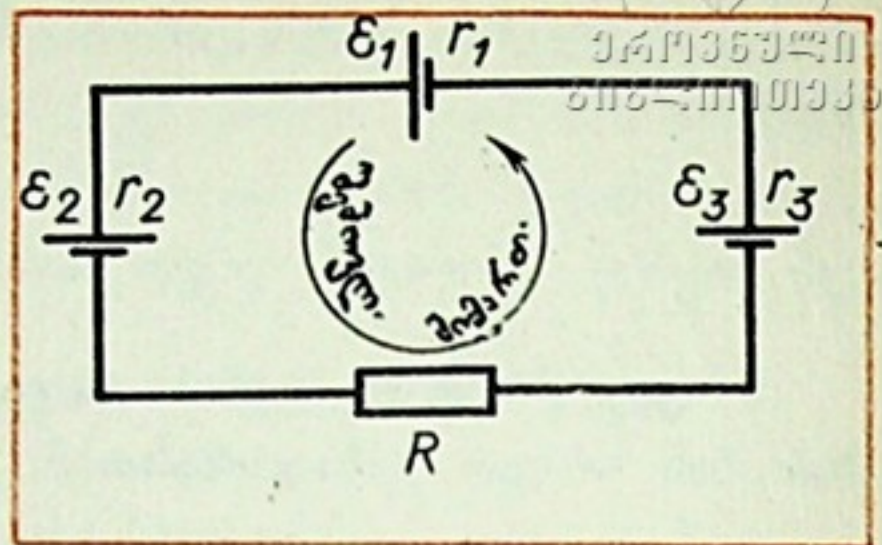
$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = |\mathcal{E}_1| - |\mathcal{E}_2| + |\mathcal{E}_3|.$$

თუ  $\mathcal{E} > 0$ , მაშინ (9.23)-ის თანახმად, დენის ძალა  $I > 0$ , ე. ი. დენის მიმართულება ემთხვევა კონტურის შემოვლის მიმართულებას. როცა  $\mathcal{E} < 0$ , პირიქით, დენის მიმართულება საპირისპიროა კონტურის შე-





სურ. 152.



სურ. 153.

მოვლის მიმართულებისა. წრედის სრული წინაღობა  $R_{სრ}$  ტოლია ყველა წინაღობათა ჯამისა:

$$R_{სრ} = R + r_1 + r_2 + r_3$$

- 9 1. რატომაა, რომ დამუხტული ნაწილაკების ელექტრულ ველს (კულონურ ველს) არ შეუძლია მოგვცეს მუდმივი ელექტრული დენი წრედში? 2. როგორ ძალას ეწოდება გარე ძალა? 3. რას ეწოდება ელექტრომამოძრავებელი ძალა? 4. ჩამოაყალიბეთ ომის კანონი შეკრული წრედისათვის. 5. რაზეა დამოკიდებული ემ ძალის ნიშანი ომის კანონის ფორმულაში შეკრული წრედისათვის?

### ამოცანათა ამოხსნის ნიშნუხები

იმ ამოცანების ამოხსნისას, რომლებშიც ვსარგებლობთ ემ ძალის ცნებით, უნდა ვიცოდეთ ომის კანონი შეკრული წრედისათვის (9.23) და შეგვეძლოს ამ კანონში ემ ძალის ნიშნების სწორი დასმა იმ წრედისათვის, სადაც რამდენიმე დენის წყარო გვაქვს. გარდა ამისა, ბევრ ამოცანაში საჭიროა წრედის უბნისათვის ომის კანონის (9.3) და დენის მუშაობისა და სიმძლავრის (9.16), (9.18) გამოსახულებების გამოყენება.

1. აკუმულატორი, რომლის ემ ძალა  $\mathcal{E} = 6,0$  ვ, შიდა წინაღობა კი  $r = 0,1$  ომს, კვებავს  $R = 12,4$  ომი წინაღობის გარე წრედს. რა  $Q$  სითბოს რაოდენობა გამოიყოფა მთელ წრედში  $t = 10$  წუთის განმავლობაში?

ამოხსნა. ომის კანონის თანახმად, შეკრული წრედისათვის წრედში დენი  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ . სითბოს რაოდენობა, რომელიც წრედის გარე უბანში გამოიყოფა, ტოლია  $Q_1 = I^2 R t$ , შიდაში კი —  $Q_2 = I^2 r t$ . სრული სითბოს რაოდენობა

$$Q = Q_1 + Q_2 = I^2 (R+r) t = \frac{\mathcal{E}^2 t}{R+r} \approx 1,7 \text{ კჯ.}$$



2. გალვანური ელემენტი, რომლის ემ ძალა  $\mathcal{E} = 5,0$  ვ, შიდა წინაღობა  $r = 0,2$  ომი, ჩაკეტილია  $R = 40$  ომ გარე წინაღობაზე. რას უდრის  $U$  ძაბვა წინაღობაზე?

ამოხსნა. ომის კანონის თანახმად, წრედის უბნისათვის  $U = IR$ . დენის ძალა ჩაკეტილ წრედში

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$$

აქედან

$$U = \frac{\mathcal{E}R}{R+r} \approx 4,97 \text{ ვ.}$$

### ს ა ვ ა რ ჯ ი შ ო 12

1. რას უდრის ძაბვა  $\mathcal{E}$  ემ ძალის გალვანური ელემენტის მომჭერებზე, თუ წრედი ღიაა?

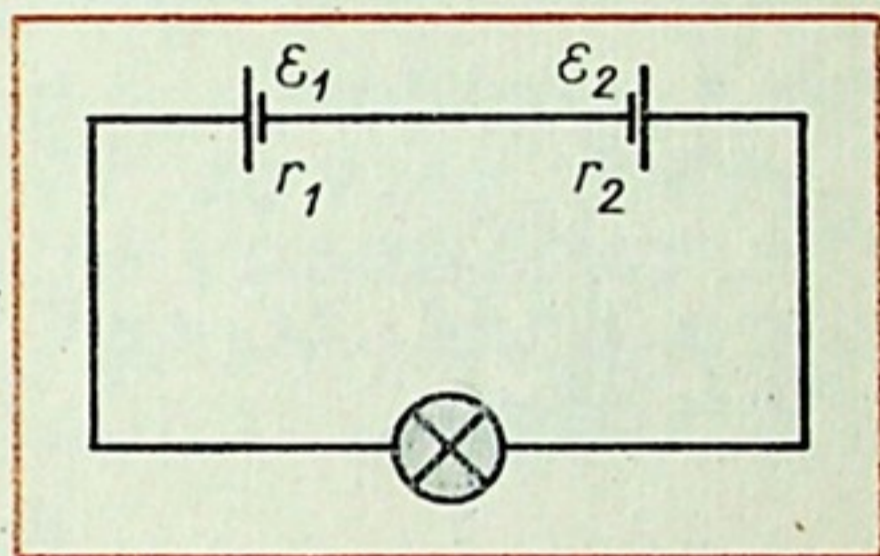
2. როგორი იქნება დენი იმ აკუმულატორის მოკლე შეერთვისას, რომლის ემ ძალა  $|\mathcal{E}| = 12$  ვ, შიდა წინაღობა  $r = 0,01$  ომი?

3. ჯიბის ფარნის ბატარეა შეერთებულია რეოსტატთან. რეოსტატის  $1,65$  ომი წინაღობისას მასზე ძაბვა  $3,30$  ვ-ია ხოლო  $3,50$  ომის დროს —  $3,50$  ვ. იპოვეთ ბატარეის ემ ძალა და შიდა წინაღობა.

4.  $4,50$  ვ და  $1,50$  ვ ემ ძალებისა და  $1,50$  და  $0,50$  ომი შიდა წინაღობების გალვანური ელემენტები შეერთებულია 154-ე სურათის მიხედვით და კვებავენ ჯიბის ფარნის ნათურას. რას უდრის ნათურას სიმძლავრე, თუ ცნობილია, რომ მისი ძაფის წინაღობა გახურებულ მდგომარეობაში  $23$  ომის ტოლია?

5. შეკრულ წრედს კვებავს წყარო, რომლის ემ ძალა  $6$  ვ-ია და შიდა წინაღობა  $0,1$  ომი. ააგეთ: ა) წრედში დენის ძალის გარე უბნის წინაღობაზე დამოკიდებულების გრაფიკი, ბ) წყაროს მომჭერებზე ძაბვის გარე უბნის წინაღობაზე დამოკიდებულების გრაფიკი.

6.  $4,1$  ვ ემ ძალისა და  $4$  ომი შიდა წინაღობის ორი ელემენტი შეერთებულია ერთსახელიანი პოლუსებით, რომლებსაც აქვს გამოყვანები. როგორი ემ ძალა და შიდა წინაღობა უნდა ჰქონდეს ელემენტს, რომელიც შეცვლიდა მოცემულ ბატარეას?



სურ. 154.

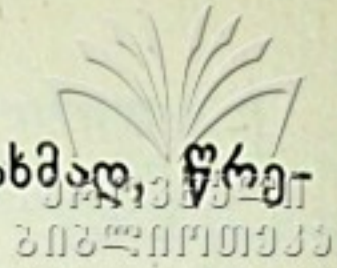
### მ ო კ ლ ე დ ა ს კ ვ ნ ა

დაუხტულ ნაწილაკთა მიმართულ (მოწესრიგებულ) მოძრაობას ელექტრული დენი ეწოდება. დენის ძალა ტოლია გამტარის განივკვეთში  $\Delta t$  დროის შუალედში გასული  $\Delta q$  მუხტის შეფარდებისა დროის ამ შუალედთან:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$



დენის ძალას ზომავენ ამპერებით, ომის კანონის თანახმად, წრედის უბნისათვის



$$I = \frac{U}{R},$$

სადაც  $U$  არის ძაბვა წრედის უბნის ბოლოებზე,  $R$  კი — უბნის წინალობა. წინალობას ზომავენ ომებით:

$$1 \text{ ომი} = \frac{1}{10^9} \text{ ომი}.$$

ლითონის გამტართა წინალობა დაახლოებით წრფივად იზრდება ტემპერატურის ზრდასთან ერთად. რიგი სუფთა ლითონებისა და შენადნობების წინალობა სავსებით ისპობა აბსოლუტური ნულის მაქსიმალურ ტემპერატურაზე. ამ მოვლენას ზეგამტარობა ეწოდება.

გამტარში დამუხტულ ნაწილაკთა მოწესრიგებული მოძრაობის დროს ელექტრული ველი ასრულებს მუშაობას, რომელსაც დენის მუშაობა ეწოდება.  $\Delta t$  დროის შუალედში გამტარის უბანზე დენის მუშაობა ტოლია

$$A = IU\Delta t.$$

დენიან გამტარში გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა ჯოულ—ლენცის კანონის თანახმად ტოლია:

$$Q = I^2 R \Delta t.$$

დენის სიმძლავრე

$$P = \frac{A}{\Delta t} = IU.$$

წრედში უნდა არსებობდეს ამა თუ იმ ბუნების (არაპოტენციალური) გარე ძალები. ისინი მოქმედებს წრედში ჩართული დენის წყაროს შიგნით.

ჩაკეტილი კონტურის გასწვრივ  $q$  მუხტის გადატანაზე გარე ძალების მიერ შესრულებული მუშაობის შეფარდებას ამ მუხტთან, ელექტრომამოძრავებელი ძალა ეწოდება:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{გ}}}{q}.$$

მთელ წრედში დენის ძალა ტოლია წრედის ემ ძალის შეფარდებისა მის სრულ წინალობასთან:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}.$$



## ელექტრული დენი სხვადასხვა გარემოში

### 66. სხვადასხვა ნივთიერების ელექტრული გამტარობა

საკმაოდ დაწვრილებით განვიხილეთ ელექტრული დენი ლითონის გამტარებში, გავეცანით ამ გამტართა ცდით დადგენილ ვოლტ-ამპერულ მახასიათებელს — ომის კანონს. ლითონის გამტარები ფართოდ გამოიყენება ელექტროენერჯის გადასაცემად დენის წყაროებიდან მომხმარებლებამდე. გარდა ამისა, ამ გამტარებით სარგებლობენ ელექტროძრავებსა და გენერატორებში, ელექტროსახურებელ ხელსაწყოებში და ა. შ.

ლითონებთან ერთად კარგი გამტარებია, ე. ი. თავისუფალ დამუხტულ ნაწილაკთა დიდ რაოდენობას შეიცავს ელექტროლიტების წყალხსნარები ან ნაღნობები და იონიზებული აირი — პლაზმა. ეს გამტარებიც ფართოდ გამოიყენება ტექნიკაში. ვაჭუთმურ ელექტრონულ ხელსაწყოებში ელექტრულ დენს ქმნის ელექტრონთა ნაკადი.

გარდა გამტარებისა და დიელექტრიკებისა ე. ი. ნივთიერებებისა, რომლებიც თავისუფალ დამუხტულ ნაწილაკთა მცირე რაოდენობას შეიცავს, არის ისეთ ნივთიერებათა ჯგუფი, რომელთა გამტარობას შუალედური მდებარეობა უჭირავს გამტარებსა და დიელექტრიკებს შორის. ეს ნივთიერებანი არც ისე კარგად ატარებენ დენს, რომ გამტარები ვუწოდოთ და არც იმდენად ცუდად, რომ დიელექტრიკებს მივაკუთვნოთ. ამიტომაც მათ ნახევარგამტარები უწოდეს.

არც ისე დიდი ხნის წინათ ნახევარგამტარები შესამჩნევ პრაქტიკულ როლს არ ასრულებდნენ. ელექტროტექნიკასა და რადიოტექნიკაში იყენებდნენ მხოლოდ სხვადასხვა გამტარსა და დიელექტრიკს. მდგომარეობა არსებითად შეიცვალა, და შეიძლება ითქვას, რადიოტექნიკაში რევოლუცია მოხდა, როცა ჯერ თეორიულად, შემდეგ კი ექსპერიმენტულად, აღმოაჩინეს და შეისწავლეს ნახევარგამტარებით ელექტრული გამტარობის მართვის შესაძლებლობა.

ელექტრული ენერჯის გადასაცემად, რასაკვირველია, ისევ გამტარებს ხმარობენ. ნახევარგამტარებს კი იყენებენ როგორც დენის გარდამქმნელ ელემენტებს რადიომიმღებებში, გამომთვლელ მანქანებში და ა. შ.

ამ თავში გავეცნობით ფიზიკურ პროცესებს, რომლებიც განაპირობებს დენის გავლას სხვადასხვა გარემოში. დავიწყებთ ლითონ-





ლეონიდ ისაიას ძე მანდელშტამი (1879—1944) ერთ-ერთი დიდი საბჭოთა ფიზიკოსია, აკადემიკოსი. ლ. მანდელშტამმა დიდი წვლილი შეიტანა რხევის თეორიის, რადიოფიზიკისა და ოპტიკის განვითარებაში. გ. ლანდსბერგთან ერთად მან აღმოაჩინა კრისტალების მიერ სინათლის გაბნევა, რომელსაც თან ახლავს სიხშირის ცვლილება (ე. წ. კომბინაციური გაბნევა). ლ. მანდელშტამმა საბჭოთა ფიზიკაში შექმნა მთელი სამეცნიერო მიმართულება. მისი მოწაფეები არიან აკადემიკოსები: ა. ა. ანდრონოვი, მ. ა. ლეონტოვიჩი, სსრ კავშირის აკადემიის წევრ-კორესპონდენტი ს. მ. რიტოვი, პროფესორი ს. პ. სტრელკოვი და ბევრი სხვა.

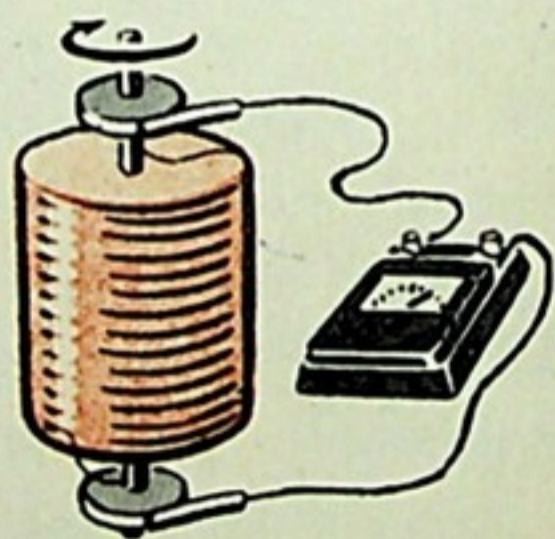
ნებით. ამ გამტართა ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი ჩვენთვის ცნობილია, მაგრამ ჯერ არაფერი არ თქმულა მისი ახსნის შესახებ მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის მიხედვით.

## 67. ლითონების ელექტრონული გამტარობა

ლითონებში თავისუფალი მუხტის გადამტანები ელექტრონებია. მათი კონცენტრაცია ძალიან დიდია —  $10^{28}$   $1/მ^3$ . ეს ელექტრონები მონაწილეობენ ქაოსურ სითბურ მოძრაობაში. ელექტრული ველის გავლენით ისინი იწყებენ მოწესრიგებულ მოძრაობას  $10^{-4}$  მ/წმ რიგის საშუალო სიჩქარით (იხ. § 56).

ლითონებში თავისუფალ ელექტრონთა არსებობის ექსპერიმენტული დამტკიცება. ლითონების გამტარობა რომ თავისუფალი ელექტრონების მოძრაობით არის განპირობებული, ეს ექსპერიმენტულად დაამტკიცეს ლ. მანდელშტამმა და ნ. პაპალექსიმ (1913 წ.), სტიუარტმა და ტოლმენმა (1916 წ.).

ამ ცდების სქემა ასეთია. კოჭაზე ახვევენ მავთულს, რომლის ბოლოებსაც მიარჩილავენ ერთმანეთისაგან იზოლირებულ ლითონის ორ დისკოს (სურ. 155). დისკოების ბოლოებს მოსრიალე კონტაქტების საშუალებით უერთებენ გალვანომეტრს.



სურ. 155

კოჭა მოჰყავთ სწრაფ ბრუნვაში, შემდეგ კი უცებ აჩერებენ. კოჭას მკვეთრი გაჩერებისას თავისუფალი დამუხტული ნაწილაკები ერთხანს ინერციით იმოძრაებენ გამტარის მიმართ: კოჭაში აღიძვრება



ელექტრული დენი. დენი მალე შეწყდება, რადგან გამტარის წინა-  
ლობის გამო დამუხტული ნაწილაკები დამუხრუჭდება და დენის წარ-  
მომქმნელი ნაწილაკების მოწესრიგებული მოძრაობა შეწყდება.

დაკვირვებებმა აჩვენა, რომ კოჭას გაჩერების შემდეგ, რაღაც  
დროის შუალედში, წრედში დენი არსებობს. მისი მიმართულება მი-  
უთითებს, რომ იგი შექმნილია უარყოფითად დამუხტული ნაწილა-  
კების მოძრაობით. ამ დროს გადატანილი მუხტის სიდიდე პროპორ-  
ციულია დენის წარმომქმნელ ნაწილაკთა მუხტის შეფარდებისა მათ  
მასასთან, ე. ი.  $\frac{|q_0|}{m}$ -სა, ამიტომ იმ მუხტის გაზომვით, რომელიც გალვა-

ნომეტრში გადის წრედში დენის არსებობისას, შესაძლო გახდა  $\frac{|q_0|}{m}$   
ფარდობის განსაზღვრა. იგი ტოლი აღმოჩნდა  $1,8 \cdot 10^{11}$  კ/კგ-სა. ეს სი-  
დიდე ემთხვევა ელექტრონის მუხტისა და მასის ფარდობას  $\left(\frac{e}{m}\right)$ ,

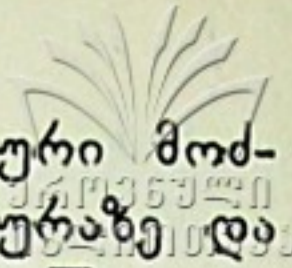
რომელიც ადრე სხვა ცდებით იყო დადგენილი.

ელექტრონების მოძრაობა ლითონში. ელექტრული ველის მხრივ  
მოქმედი მუდმივი ძალის გავლენით ელექტრონები მოწესრიგებული  
მოძრაობის გარკვეულ სიჩქარეს იძენენ. ეს სიჩქარე შემდეგში დროის  
მიხედვით აღარ იზრდება, რადგან კრისტალური მესრის იონების  
მხრივ ელექტრონებზე მოქმედებს განსაზღვრული დამამუხრუჭებელი  
ძალა. ეს ძალა მსგავსია წინალობის ძალისა, რომელიც ქვაზე მოქმე-  
დებს წყალში ჩაძირვისას. ამის გამო ელექტრონთა მოწესრიგებული  
მოძრაობის საშუალო სიჩქარე პროპორციულია ელექტრული ველის  
დაძაბულობისა გამტარში  $v \sim E$  და, მაშასადამე, გამტარის ბოლოებზე  
არსებული პოტენციალთა სხვაობისა (რადგან  $E = \frac{U}{l}$ , სადაც  $l$  გამტარ-  
ის სიგრძეა).

ვიციტ, რომ დენის ძალა გამტარში პროპორციულია ნაწილაკთა  
მოწესრიგებული მოძრაობის სიჩქარისა (იხ. ფორმულა 9.2). ამიტომ  
შეგვიძლია ვთქვათ, რომ დენის ძალა პროპორციულია გამტარის ბო-  
ლოებზე არსებული პოტენციალთა სხვაობისა  $I \sim U$ . ესაა ომის კან-  
ონის თვისებრივი ახსნა ლითონთა გამტარობის ელექტრონული თეო-  
რიის საფუძველზე.

კლასიკური მექანიკის კანონების საფუძველზე ლითონში ელექ-  
ტრონთა მოძრაობის დამაკმაყოფილებელი რაოდენობრივი თეორიის  
აგება შეუძლებელია. რატომ? ელექტრონთა მოძრაობის პირობები  
ლითონში ისეთია, რომ ნიუტონის კლასიკური მექანიკა უძლურია ამ  
მოძრაობის აღწერისას. ყველაზე ნათლად ეს ჩანს შემდეგი მაგალი-





თიდან. თუ ცდით გავიგებთ ლითონში ელექტრონთა სითბური მოძრაობის საშუალო კინეტიკურ ენერჯიას ოთახის ტემპერატურაზე და

$$\text{შემდეგ მოვნახავთ ამ ენერჯიის შესაბამის ტემპერატურას } \frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}kT$$

ფორმულიდან, მივღებთ  $10^5$ — $10^6$  K რიგის ტემპერატურას. ასეთი ტემპერატურა ვარსკვლავების შიგნითაა. ელექტრონთა მოძრაობა ლითონში კვანტური მექანიკის კანონებს ემორჩილება.

- 9 1. ჩამოთვალეთ ელექტრული დენის კარგი გამტარები. 2. 155-ე სურათზე გამოსახულ ცდაში კოქა ბრუნავდა საათის ისრის მოძრაობის მიმართულებით, შემდეგ  $\pi$  მკვეთრად დამუხრუჭდა. განსაზღვრეთ ელექტრული დენის მიმართულება კოქაში მისი დამუხრუჭებისას. 3. რა დამოკიდებულებაშია ლითონის გამტარში ელექტრონთა მოწესრიგებული მოძრაობის სიჩქარე მის ბოლოებს შორის არსებულ ძაბვასთან?

### 68. ელექტრული დენი სითხეში

სითხე, ისევე როგორც მყარი სხეული, შეიძლება იყოს დიელექტრიკი, გამტარი და ნახევარგამტარი. დიელექტრიკების რიცხვს მიეკუთვნება გამოხდილი წყალი, გამტარებს მიეკუთვნება ელექტროლიტების — მჟავების, ტუტეებისა და მარილების — ხსნარები. თხევადი ნახევარგამტარებია, მაგალითად, გამდნარი სელენი, სულფიდთა ნადნობები.

ელექტროლიტური დისოციაცია. [X კლასის არაორგანული ქიმიის კურსში დაწვრილებითაა გარჩეული, თუ რატომ ატარებენ დენს ელექტროლიტთა წყალხსნარები. ელექტროლიტთა გახსნისას წყლის პოლარული მოლეკულების ელექტრული ველის გავლენით წარმოებს ელექტროლიტთა მოლეკულების დაშლა ცალკეულ იონებად. ამ პროცესს ელექტროლიტური დისოციაცია ეწოდება.]

დისოციაციის ხარისხი, ე. ი. გახსნილი ნივთიერების იონებად დაშლილ მოლეკულათა რაოდენობა დამოკიდებულია ტემპერატურაზე, ხსნარის კონცენტრაციაზე და გამხსნელის  $\epsilon$  დიელექტრიკულ შეღწევადობაზე. ტემპერატურის გაზრდით დისოციაციის ხარისხი მატულობს და, მაშასადამე, იზრდება დადებითად და უარყოფითად დამუხრუჭული იონების კონცენტრაცია.

სროცა სხვადასხვა ნიშნის იონები ერთმანეთს ჰვდება, შეიძლება მოხდეს მათი რეკომბინირება — ხელახალი შეერთება ნეიტრალურ მოლეკულად. უცვლელი პირობების დროს ხსნარში მყარდება დინამიკური წონასწორობა, რომლის დროსაც წამში იონებად დაშლილი მოლეკულების რიცხვი უდრის იმ ნეიტრალური მოლეკულების





რიცხვს, რომლებიც იონების შეერთების შედეგად მაშინვე წარმოიქმნება.

**იონური გამტარობა.** ელექტროლიტების წყალხსნარებსა ან ნაღობებში მუხტის გადამტანებია დადებითად და უარყოფითად დამუხტული იონები.

თუ ჭურჭელს, რომელშიც ასხია ელექტროლიტის ხსნარი, ჩაერთავთ ელექტრულ წრედში, მაშინ უარყოფითი იონები გაემართება დადებითი ელექტროდისაკენ — ანოდისაკენ, დადებითი კი უარყოფითი ელექტროდისაკენ — კათოდისაკენ. მიიღება ელექტრული დენი. რადგან ელექტროლიტების წყალხსნარებში ან ნაღობებში მუხტის გადატანა იონებით ხდება, ასეთ გამტარობას იონური გამტარობა ეწოდება.

სითხეს შეიძლება ჰქონდეს ელექტრონული გამტარობაც. მაგალითად, ასეთი გამტარობა ახასიათებს თხევად ლითონს.

**ელექტროლიზი.** იონური გამტარობისას დენის გავლა დაკავშირებულია ნივთიერების გადატანასთან. ელექტროდებზე ხდება იმ ნივთიერებათა გამოყოფა, რომლებიც ელექტროლიტის შედგენილობაში შედის. ანოდზე უარყოფითად დამუხტული იონები გასცემენ თავის ზედმეტ ელექტრონებს (ქიმიკში ამას მუანგავი რეაქცია ეწოდება), კათოდზე კი დადებითი იონები შეივსებენ ელექტრონების დანაკლისს (აღმდგენი რეაქცია). ელექტროდებზე ნივთიერებათა გამოყოფის პროცესს, რომელიც მუანგავ-აღმდგენით რეაქციებთანაა დაკავშირებული, ელექტროლიზს უწოდებენ.

**ელექტროლიზის გამოყენება.** ელექტროლიზს ფართოდ იყენებენ ტექნიკაში სხვადასხვა მიზნით. ელექტროლიტური მეთოდით ფარავენ ერთი ლითონის ზედაპირს მეორის თხელი ფენით (მონიკელემა, მოქრომვა, სპილენძით დაფარვა და ა. შ.). ეს მკვიდრი საფარი ზედაპირს იცავს კოროზიისაგან.

თუ მივიღებთ ზომებს იმისთვის, რომ ელექტროლიზის დროს ელექტროდზე გამოყოფილი ლითონის თხელი ფენა მოვაშოროთ ელექტროდს (ამას აღწევენ ელექტროდის ზედაპირის გრაფიტით დაფარვით), მაშინ მივიღებთ ელექტროდის ზედაპირის რელიეფის ასლს.

პოლიგრაფიულ მრეწველობაში ასეთ ასლებს (სტერეოტიპებს) ღებულობენ მატრიცებიდან (ანაწყობის ანაბეჭდიდან პლასტიკურ მასალაზე). ამისათვის მატრიცებზე დალექავენ რკინის, ან სხვა მასალის სქელ ფენას. ეს საშუალებას გვაძლევს შევქმნათ ანაწყობი ეგზემპლარები საჭირო რაოდენობით. თუ წინათ წიგნის ტირაჟი განისაზღვრებოდა იმ ანაბეჭდების რაოდენობით, რომლებსაც ღებულობდნენ ერთი ანაწყობიდან (ბეჭდვის დროს ანაწყობი იშლება) ახლა სტერეოტიპების გამოყენება ტირაჟის გაზრდის საშუალებას იძლევა.



ამჟამად, ელექტროლიზის საშუალებით სტერეოტიპებს ღებულობენ მხოლოდ ისეთი წიგნებისათვის, რომლებიც მაღალხარისხიანად უნდა დაიბეჭდოს.

ზედაპირის რელიეფის ასლის მიღების პროცესი (გალვანოპლასტიკა). დაამუშავა რუსმა მეცნიერმა ბ. იაკობიმ, რომელმაც 1836 წელს ამ ხერხით მიიღო დრუ ფიგურები ლენინგრადის ისააკის ტაძრისათვის.

ელექტროლიზის საშუალებით ლითონებს ასუფთავებენ გარეშე მინარევებისაგან. მაგალითად, მადნიდან მიღებულ მინარევებიან სპილენძს ასხამენ სქელი ფურცლების სახით, რომლებსაც შემდეგ ათავსებენ აბაზანაში ანოდად. ელექტროლიზის დროს ანოდის სპილენძი იშლება, მინარევები, რომლებიც ძვირფას და იშვიათ ლითონებს შეიცავს, ფსკერზე ილექება, კათოდზე კი სუფთა სპილენძი გამოიყოფა.

ელექტროლიზის საშუალებით ბოქსიტების ნაღობისაგან ღებულობენ ალუმინს. სწორედ ამ ხერხის წყალობით გახდა ალუმინი იაფი და რკინასთან ერთად ყველაზე უფრო გავრცელებული ლითონი ტექნიკასა და ყოფა-ცხოვრებაში. ]

## 69. ელექტროლიზის კანონი

ელექტროლიზის დროს ელექტროდებზე გამოიყოფა ნივთიერება. რაზეა დამოკიდებული განსაზღვრულ  $\Delta t$  დროის შუალედში გამოყოფილი ნივთიერების მასა? ]

ჯხადია, ეს მასა ტოლია ერთი იონის  $m_{oi}$  მასის ნამრავლისა იონების  $N_i$  რიცხვზე, რომლებმაც მიაღწიეს ელექტროდს  $\Delta t$  დროში:

$$m = m_{oi} N_i. ] \quad (10.1)$$

(1.5) ფორმულის თანახმად ერთი იონის  $m_{oi}$  მასა ტოლია:

$$m_{oi} = \frac{M}{N_A}, ] \quad (10.2)$$

სადაც  $M$  ნივთიერების მოლური (ან ატომური) მასაა,  $N_A$  კი — ავოგადროს მუდმივა. ] ე. ი. იონთა რაოდენობა ერთ მოლში.

ელექტროდს მიღწეული იონთა რიცხვი

$$N_i = \frac{\Delta q}{q_{oi}}, ] \quad (10.3)$$



სადაც  $\Delta q = I\Delta t$  ელექტროლიტში გავლილი მუხტია  $\Delta t$  დროის შუალედში,  $q_{oi}$  იონის მუხტია, რომელიც ატომის  $n$  ვალენტობით განისაზღვრება:  $q_{oi} = ne$  ( $e$  ელემენტარული მუხტის მოდულია).

იმ მოლეკულების დისოციაციისას, რომლებიც ერთვალენტიანი ატომებისგან ( $n=1$ ) შედგება, მიიღება ერთმუხტიანი იონები. მაგალითად,  $KBr$  მოლეკულის დისოციაციის დროს წარმოიქმნება  $K^+$  და  $Br^-$  იონები. შაბიამნის მოლეკულის დისოციაცია წარმოქმნის  $Cu^{2+}$  და  $SO_4^{2-}$  ორმუხტიან იონებს, რადგან სპილენძის ატომები მოცემულ ნაერთში ორვალენტია ( $n=2$ ). ჩავსვათ (10.1) ფორმულაში (10.2) და (10.3) გამოსახულებანი და გავითვალისწინოთ, რომ  $\Delta q = I\Delta t$ , ხოლო  $q_{oi} = ne$ , მივიღებთ:

$$m = \frac{M}{neN_A} I\Delta t. \quad (10.4)$$

ფარადეის კანონი. ნივთიერების  $m$  მასისა და  $q = I\Delta t$  მუხტს შორის არსებული პროპორციულობის კოეფიციენტი აღვნიშნოთ  $k$ -თი, მაშინ

$$m = kI\Delta t, \quad (10.5)$$

სადაც

$$k = \frac{1}{eN_A} \frac{M}{n}; \quad (10.6)$$

$k$  პროპორციულობის კოეფიციენტი დამოკიდებულია ნივთიერების გვარობაზე.

ამრიგად, ელექტრული დენის მიერ  $\Delta t$  დროის შუალედში ელექტროდზე გამოყოფილი ნივთიერების მასა პროპორციულია დენის ძალისა და დროისა.

ეს დებულება, რომელიც თეორიულად მივიღეთ, პირველად ექსპერიმენტულად აღმოაჩინა ფარადეიმ. მას ფარადეის ელექტროლიზის კანონი ეწოდება.

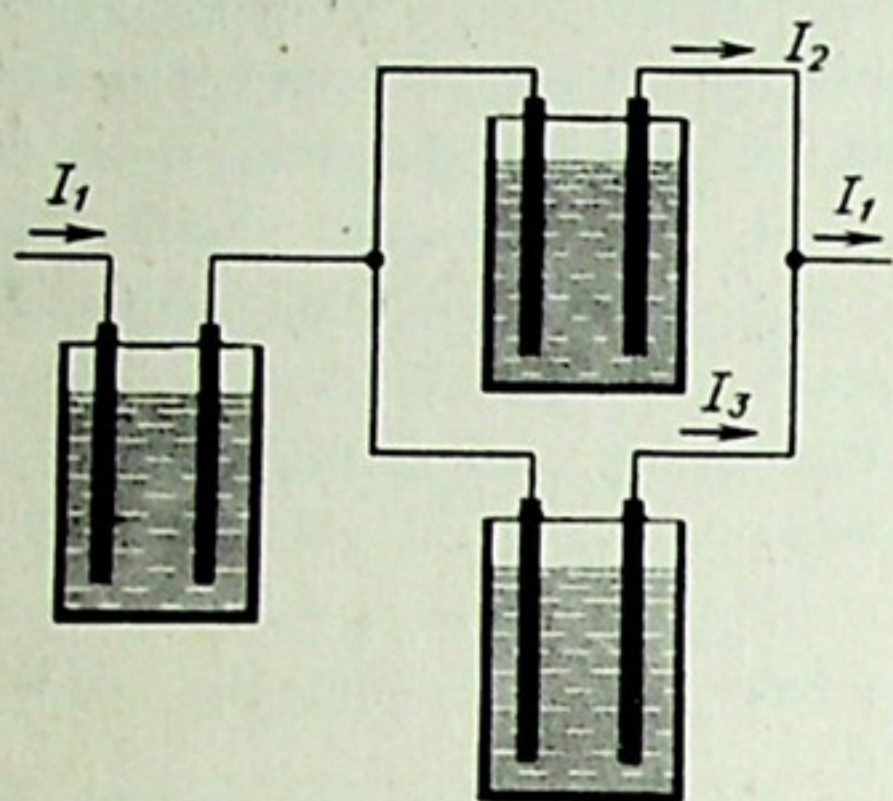
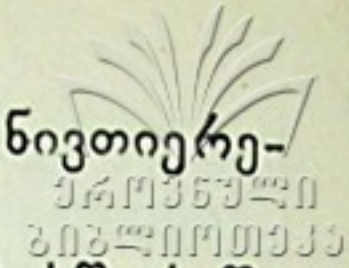
(10.5) ფორმულიდან ჩანს, რომ  $k$  კოეფიციენტი რიცხობრივად ტოლია ნივთიერების მასისა, რომელიც ელექტროდებზე გამოიყოფა იონების მიერ 1 კ მუხტის გადატანისას.  $k$  სიდიდეს მოცემული ნივთიერების ელექტროქიმიური ეკვივალენტი ეწოდება. ელექტროქიმიური ეკვივალენტი გამოისახება კილოგრამობით კულონზე (კგ/კ).

ელექტროქიმიურ ეკვივალენტს აქვს მარტივი ფიზიკური აზრი. რადგან  $\frac{M}{N_A} = m_{oi}$  და  $en = q_{oi}$ , ამიტომ (10.6)-ის თანახმად,  $k = \frac{m_{oi}}{q_{oi}}$ .

ე. ი.  $k$  ტოლია იონის მასის შეფარდებისა მის მუხტთან.



$m$  და  $\Delta q$  სიდიდეების გაზომვით გავიგებთ სხვადასხვა ნივთიერების ელექტროქიმიურ ეკვივალენტს.



სურ. 156.

ფარადეის კანონის სისწორეში შემდეგი ცდა დაგვარწმუნებს. ავაწყოთ 156-ე სურათზე ნაჩვენები დანადგარი. სამივე ელექტროლიტური აბაზანა ავსებულა ერთი და იმავე ელექტროლიტის ხსნარით, მაგრამ მათში გამავალი დენები სხვადასხვაა. აღვნიშნოთ ეს დენები  $I_1$ ,  $I_2$  და  $I_3$ -ით. მაშინ  $I_1 = I_2 + I_3$ . თუ ცალკეულ აბაზანებში გავზომავთ ელექტროდებზე გამოყოფილ ნივთიერებათა  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  მასებს, დავრწმუნდებით, რომ ისინი პროპორციულია შესაბამისი დენის ძალებისა  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ .

**ელექტრონის მუხტის განსაზღვრა.** ელექტროდზე გამოყოფილი ნივთიერების მასის ფორმულა (10.4) საშუალებას გვაძლევს გავიგოთ ელექტრონის მუხტი. ამ ფორმულიდან გამომდინარეობს, რომ ელექტრონის მუხტის მოდული

$$e = \frac{M}{mnN_A} I \Delta t, \quad (10.7)$$

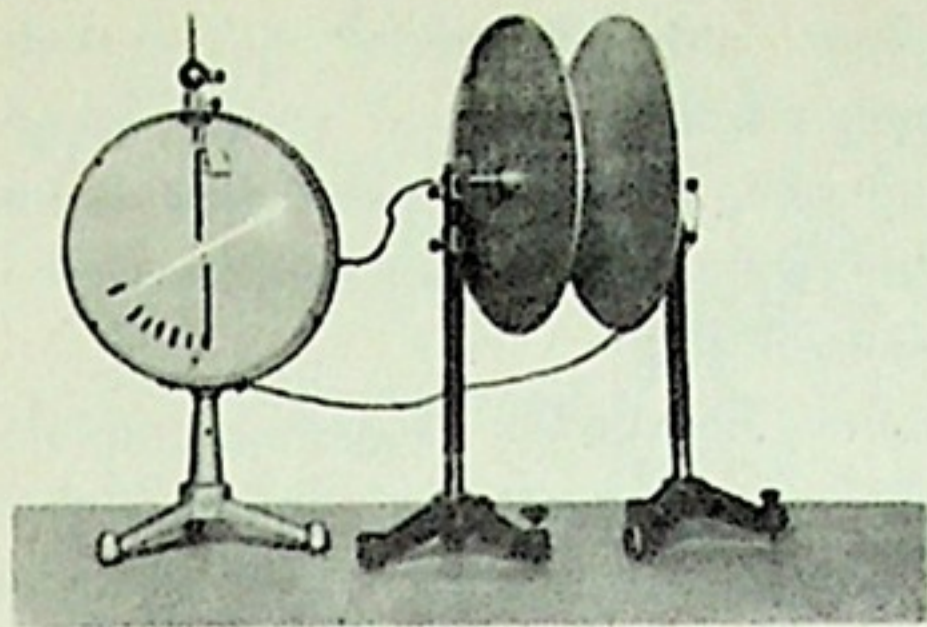
თუ ვიცით  $I \Delta t$  მუხტის გავლისას გამოყოფილი ნივთიერების  $m$  მასის,  $M$  მოლური მასის,  $n$  ვალენტობისა და  $N_A$  ავოგადროს მუდმივას მნიშვნელობები, გავიგებთ ელექტრონის მუხტის მოდულს  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  კ. 1874 წელს სწორედ ამ გზით მიიღეს პირველად ელემენტარული ელექტრული მუხტის მნიშვნელობა.

- ?
1. რა არის ელექტროლიტური დისოციაცია?
  2. რატომაა, რომ ელექტროლიტის ხსნარში დენის გავლისას ხდება ნივთიერების გადატანა, ლითონის გამტარში გავლისას კი არა?
  3. ჩამოაყალიბეთ ფარადეის ელექტროლიზის კანონი.
  4. როგორ განვსაზღვროთ ელემენტარული ელექტრული მუხტი ელექტროლიზის კანონის გამოყენებით?

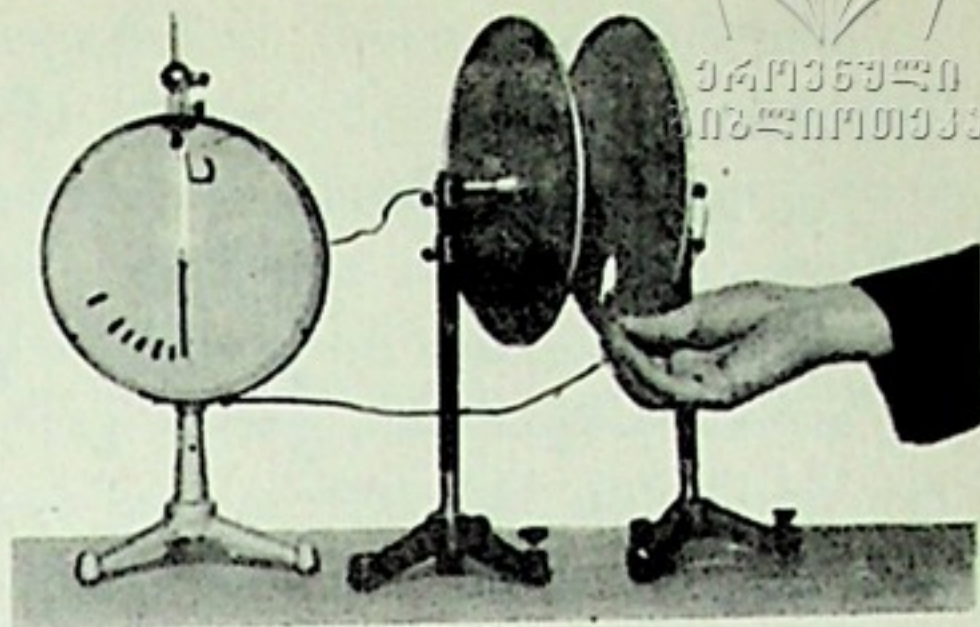
## 70. ელექტრული დენი აირში

**ელექტრული განმუხტვა აირში.** სვილთ ელექტრომეტრი, მივუერთოთ მას ბრტყელი კონდენსატორის დისკოები; კონდენსატორი დავმუხტოთ (სურ. 157). ოთახის ტემპერატურაზე, თუ ჰაერი საკმაოდ





სურ. 157.



სურ. 158.

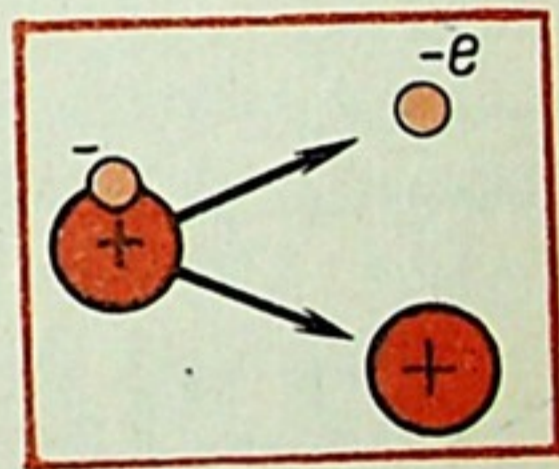
მშრალია, კონდენსატორი შესამჩნევად არ განიმუხტება. ეს ნიშნავს, რომ დისკოებს შორის არსებული პოტენციალთა სხვაობით გამოწვეული ელექტრული დენი ჰაერში ძალიან მცირეა. ამრიგად, ჰაერის ელექტრული გამტარობა ოთახის ტემპერატურაზე ძალიან მცირეა. ჰაერი შეიძლება დიელექტრიკად ჩავთვალოთ.

დისკოებს შორის ჰაერი გავათბოთ ანთებული ასანთით (სურ. 158). შევამჩნევთ, რომ ელექტრომეტრის ისარი სწრაფად უახლოვდება ნულს, ე. ი. კონდენსატორი განიმუხტება. მაშასადამე, გახურებული აირი გამტარია და მასში დამყარდა დენი.

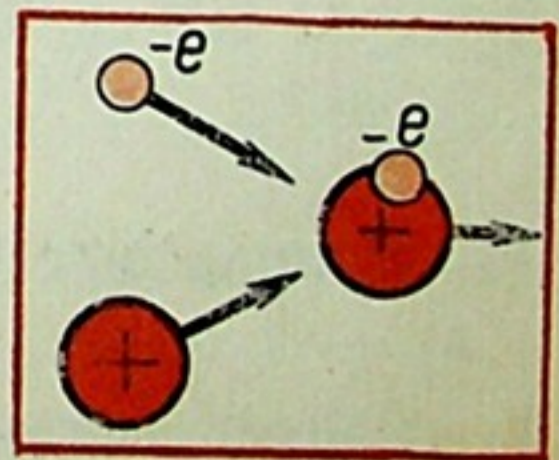
აირში დენის გავლის პროცესს აიროვანი განმუხტვა ეწოდება.

აირის იონიზაცია ეწინააღმდეგება, რომ ოთახის ტემპერატურაზე ჰაერი ძალიან ცუდი გამტარია. გათბობის შედეგად მისი გამტარობა იზრდება. ჰაერის გამტარობა შეიძლება გავზარდოთ სხვა ხერხითაც, მაგალითად, სხვადასხვა გამოსხივების გავლენით: ულტრაიისფერი და რენტგენის სხივებით, რადიოაქტიური გამოსხივებით და სხვ.

ჩვეულებრივ პირობებში აირი თითქმის მთლიანად ნეიტრალური ატომებისა და მოლეკულებისაგან შედგება და, მაშასადამე, დიელექტრიკია. გაცხელების ან გამოსხივების გავლენით ატომების ნაწილი იონიზაციას განიცდის — იშლება დადებითად დამუხტულ იონებად და ელექტრონებად (სურ. 159). აირში შეიძლება წარმოიქმნას უარყოფითი იონებიც: ისინი ჩნდება ნეიტრალურ ატომებთან ელექტრონთა მიერთების შედეგად.

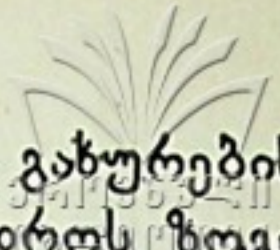


სურ. 159.



სურ. 160.





გახურებისას აირის იონიზაცია იმით აიხსნება, რომ გახურების შედეგად მოლეკულები უფრო სწრაფად მოძრაობენ. ამ დროს წარმოიქმნება მოლეკულა ისე სწრაფ მოძრაობას იწყებს, რომ შეჯახებისას მათი ნაწილი იშლება და იონებად გარდაიქმნება. რაც უფრო მაღალია ტემპერატურა, მით მეტი იონები წარმოიქმნება.

**აირის გამტარობა.** აირის გამტარობის მექანიზმი მსგავსია ელექტროლიტების ხსნარებისა და ნაღობების გამტარობის მექანიზმისა. განსხვავება ისაა, რომ უარყოფითი მუხტი ძირითადად გადაიტანება არა უარყოფითი იონებით, როგორც ეს ელექტროლიტების წყალხსნარებსა და ნაღობებში ხდება, არამედ ელექტრონებით.

ამრიგად, აირში შერწყმულია ლითონების ელექტრონული გამტარობა და ელექტროლიტების წყალხსნარებისა და ნაღობების იონური გამტარობა. არსებითია კიდევ ერთი განსხვავება. ელექტროლიტების ხსნარებში იონები წარმოიქმნება მოლეკულებში იონთა შიდა მოლეკულური კავშირების შესუსტების შედეგად, რაც გამხსნელის მოლეკულების (წყლის მოლეკულების) ზემოქმედებას მიეწერება. აირში იონები წარმოიქმნება ან გათბობით, ან გარე იონიზატორის, მაგალითად, გამოსხივების მოქმედებით.

**რეკომბინაცია.** იონიზატორის მოქმედების შეწყვეტისას შევამჩნევთ, რომ დამუხტული ელექტრომეტრი კვლავაც დამუხტული რჩება. ეს გვიჩვენებს, რომ იონიზატორის მოქმედების შეწყვეტის შემდეგ აირი გამტარი აღარ არის. როცა ყველა იონი და ელექტრონი ელექტროდებს მიაღწევს, დენი შეწყდება.

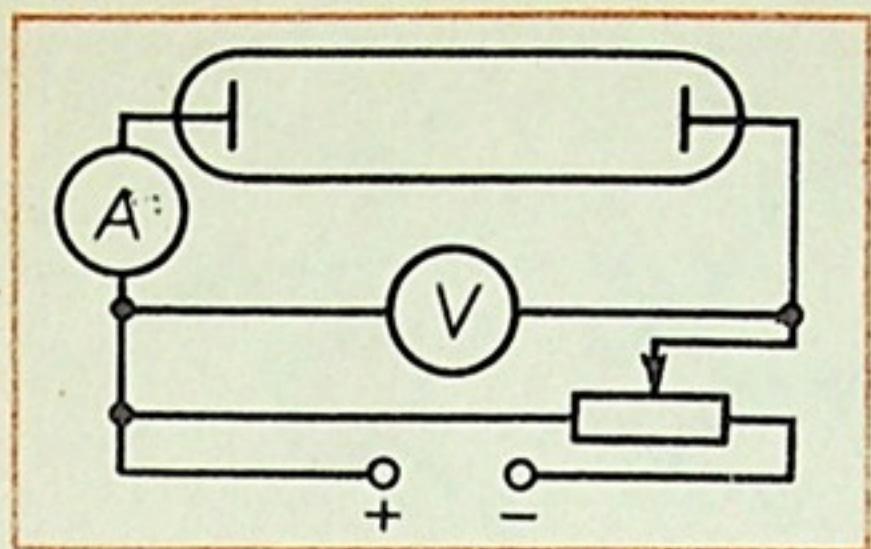
გარდა ამისა, ელექტრონისა და დადებითი იონის ურთიერთმიახლოებისას შეიძლება კვლავ წარმოიქმნას ნეიტრალური ატომი. სქემატურად ეს გამოსახულია 160-ე სურათზე. ამ პროცესს დამუხტულ ნაწილაკთა რეკომბინაციას უწოდებენ.

როცა გარე ველი არ არის, მხოლოდ რეკომბინაციის გამო ისპობა დამუხტული ნაწილაკები და აირი დიელექტრიკი ხდება. თუ იონიზატორის მოქმედება არ იცვლება, მაშინ მყარდება დინამიკური წონასწორობა, რომლის დროსაც დამუხტულ ნაწილაკთა ახლად წარმოქმნილი წყვილების რიცხვი ტოლია რეკომბინაციის შედეგად მოსპობილ წყვილთა საშუალო რიცხვისა.

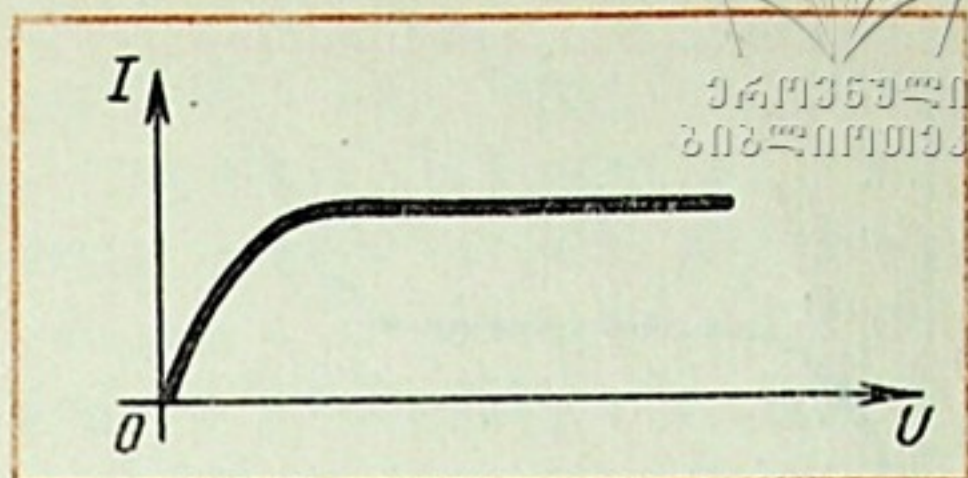
## 71. არათავისთავადი და თავისთავადი განმუხტვა

**არათავისთავადი განმუხტვა.** სხვადასხვა წნევისას აირში განმუხტვის შესასწავლად მოსახერხებელია ლითონის ორელექტროდიანი მინის მილის გამოყენება (სურ. 161).





სურ. 161.



სურ. 162.

ვთქვათ, ზაიმე იონიზატორის გავლენით აირში წამში იქმნება დამუხტული ნაწილაკების — დადებითი იონებისა და ელექტრონების წყვილთა გარკვეული რიცხვი.

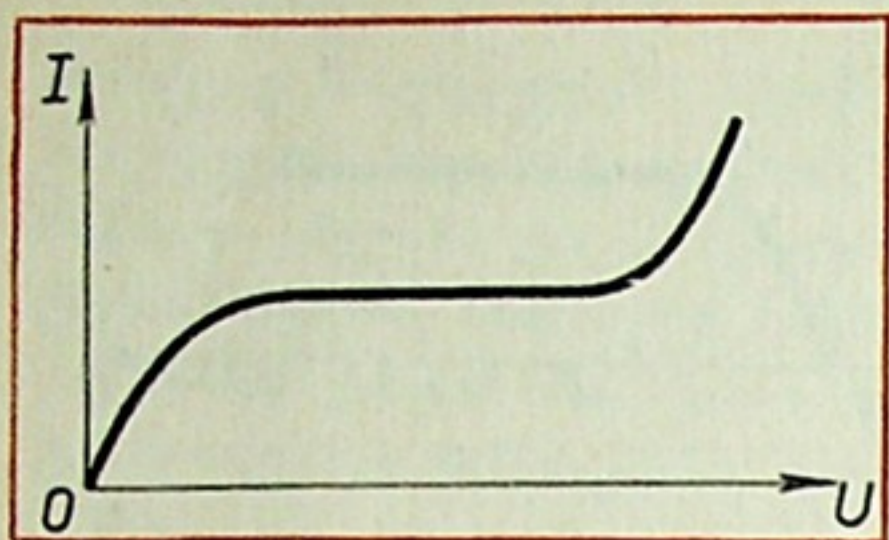
მილის ელექტროდებს შორის მცირე პოტენციალთა სხვაობის დროს დადებითად დამუხტული იონები გადაადგილდება უარყოფითი ელექტროდისაკენ, უარყოფითად დამუხტული კი დადებითი ელექტროდისაკენ. ამრიგად, მილში აღიძვრება დენი. ე. ი. მოხდება აიროვანი განმუხტვა.

ყველა წარმოქმნილი იონი როდი აღწევს ელექტროდამდე: მათი ნაწილი ერთდება და ქმნის აირის ნეიტრალურ მოლეკულებს, მილის ელექტროდებს შორის პოტენციალთა სხვაობის ზრდისას, იზრდება ელექტროდებამდე მისულ დამუხტულ ნაწილაკთა რაოდენობა, იზრდება წრედში დენის ძალაც. დაბოლოს, დგება მომენტი, როცა აირის მთელ მოცულობაში წამში წარმოქმნილი ყველა დამუხტული ნაწილაკი მაშინვე აღწევს ელექტროდებს. დენის ზრდა ამ დროს წყდება (სურ. 162). როგორც ამბობენ, დენი ნაჯერობას აღწევს. **ეს** იონიზატორის მოქმედება შეწყდება, განმუხტვაც შეწყდება, რადგან იონთა სხვა წყარო აირს არა აქვს. ამის გამო განმუხტვას არათავისთავადი განმუხტვა ეწოდება.

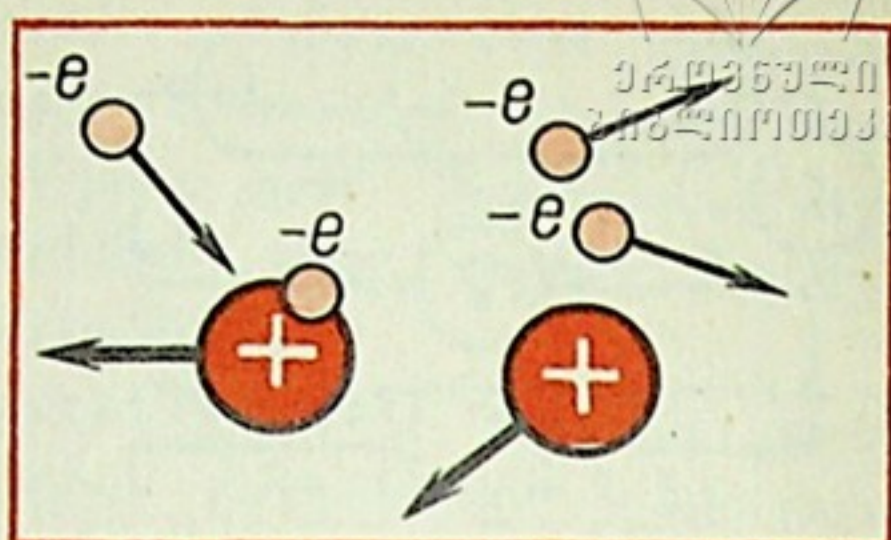
თავისთავადი განმუხტვა. როგორ შეიცვლება განმუხტვა აირში, თუ ელექტროდებს შორის პოტენციალთა სხვაობის ზრდას გავაგრძელებთ?

ერთი შეხედვით, პოტენციალთა სხვაობის შემდგომი ზრდისას დენი უცვლელი უნდა დარჩეს. მაგრამ ცდა გვიჩვენებს, რომ ელექტროდებს შორის პოტენციალთა სხვაობის ზრდის დროს, დაწყებული მისი რაღაც მნიშვნელობიდან, დენი კვლავ იზრდება (სურ. 163). ეს ნიშნავს, რომ აირში წარმოიქმნა დამატებითი იონები იმის გარდა,





სურ. 163.



სურ. 164.

რაც იონიზატორმა წარმოქმნა. ღდენის ძალა შეიძლება ასეულ და ათასეულჯერ გაიზარდოს, წარმოქმნილ იონთა რაოდენობა კი ისე დიდი გახდეს, რომ გარე იონიზატორი უკვე საჭირო აღარ იყოს განმუხტვის შესანარჩუნებლად. თუ ახლა გარე იონიზატორს გამოვრთავთ, განმუხტვა აღარ შეწყდება.  $\left[ \right]$  რაკი განმუხტვა მიმდინარეობს ისე, რომ გარე იონიზატორს არ საჭიროებს, მას თავის თავად განმუხტვას უწოდებენ.  $\left. \right]$

იონიზაცია ელექტრონული დარტყმით.  $\left[ \right]$  რა მიზეზები იწვევს დენის მკვეთრ ზრდას დიდ დაბვაზე?

განვიხილოთ დამუხტულ ნაწილაკთა რაიმე წყვილი (დადებითი იონი და ელექტრონი), რომელიც შექმნა გარე იონიზატორმა. ამნაირად წარმოქმნილი თავისუფალი ელექტრონი მოძრაობას იწყებს დადებითი ელექტროდისაკენ — ანოდისაკენ, დადებითი იონი კი — კათოდისაკენ.  $\left[ \right]$  თავის გზაზე ელექტრონი შეხვდება იონებს და ნეიტრალურ ატომებს. ორი მომდევნო დაჯახების შუალედში ელექტრონის ენერგია იზრდება.  $\left[ \right]$  ელექტრული ველის ძალთა მუშაობის შედეგად. რაც მეტია პოტენციალთა სხვაობა ელექტროდებს შორის, მით მეტია ელექტრული ველის დაძაბულობა.  $\left[ \right]$  მორიგი დაჯახების წინ ელექტრონის კინეტიკური ენერგია პროპორციულია ველის დაძაბულობისა და ელექტრონის თავისუფალი განარბენისა  $\left[ \right]$  (გზისა ორ მომდევნო დაჯახებას შორის):

$$\left[ \frac{mv^2}{2} = eEl. \right] \quad (10.8)$$

$\left[ \right]$  თუ ელექტრონის კინეტიკური ენერგია მეტია  $A_i$  მუშაობაზე, რომელიც საჭიროა ნეიტრალური ატომის იონიზაციისათვის, ე. ი.

$$\left[ \frac{mv^2}{2} \geq A_i \right]$$



მაშინ ელექტრონის ატომთან შეხლისას, იონიზაცია მოხდება. ამ პროცესის სქემა მოცემულია 164-ე სურათზე. ამის შედეგად, ერთი ელექტრონის ნაცვლად, მიიღება ორი (ატომთან შეხლილი და ატომიდან ამოგლეჯილი). ისინი, თავის მხრივ, ველში იძენენ ენერგიას, ახდენენ შემხვედრ ატომთა იონიზაციას და ა. შ. ამის გამო, დამუხტულ ნაწილაკთა რიცხვი სწრაფად იზრდება, წარმოიქმნება ელექტრონული ზვავი. აღწერილ პროცესს ელექტრონული დარტყმითი იონიზაცია ეწოდება. მაგრამ მარტო ელექტრონული დარტყმით იონიზაციას როდი შეუძლია განაპირობოს თავისთავადი განმუხტვის შენარჩუნება, მართლაც, ამ გზით წარმოქმნილი ყველა ელექტრონი მოძრაობს ანოდისაკენ, და ანოდთან მიღწევის შემდეგ „თამაშიდან ვარდება“. განმუხტვის შენარჩუნებისათვის აუცილებელია კათოდიდან ელექტრონების ემისია („ემისია“ ნიშნავს „გამოშვებას“.) ემისიას კი რამდენიმე მიზეზი განაპირობებს.

ნეიტრალურ ატომებთან ელექტრონების დაჯახებისას წარმოქმნილი დადებითი იონები კათოდისაკენ მოძრაობისას, ველის მოქმედებით იძენენ დიდ კინეტიკურ ენერგიას. ასეთი სწრაფი იონების დაჯახების შედეგად კათოდის ზედაპირიდან ამოიგლიჯება ელექტრონები.

თერმოელექტრონული ემისია. გარდა ამისა, კათოდიდან ელექტრონები შეიძლება ამოვიდეს მისი მაღალ ტემპერატურამდე გახურებისას. ამ პროცესს, თერმოელექტრონული ემისია ეწოდება. ის შეიძლება განვიხილოთ როგორც ელექტრონთა აორთქლება ლითონიდან. მრავალ მყარ ნივთიერებაში თერმოელექტრონულ ემისიას ადგილი აქვს ისეთ ტემპერატურაზე, რომლის დროსაც თვით ნივთიერების აორთქლება ჯერ კიდევ მცირეა. სწორედ ასეთ ნივთიერებას იყენებენ კათოდის დასამზადებლად.

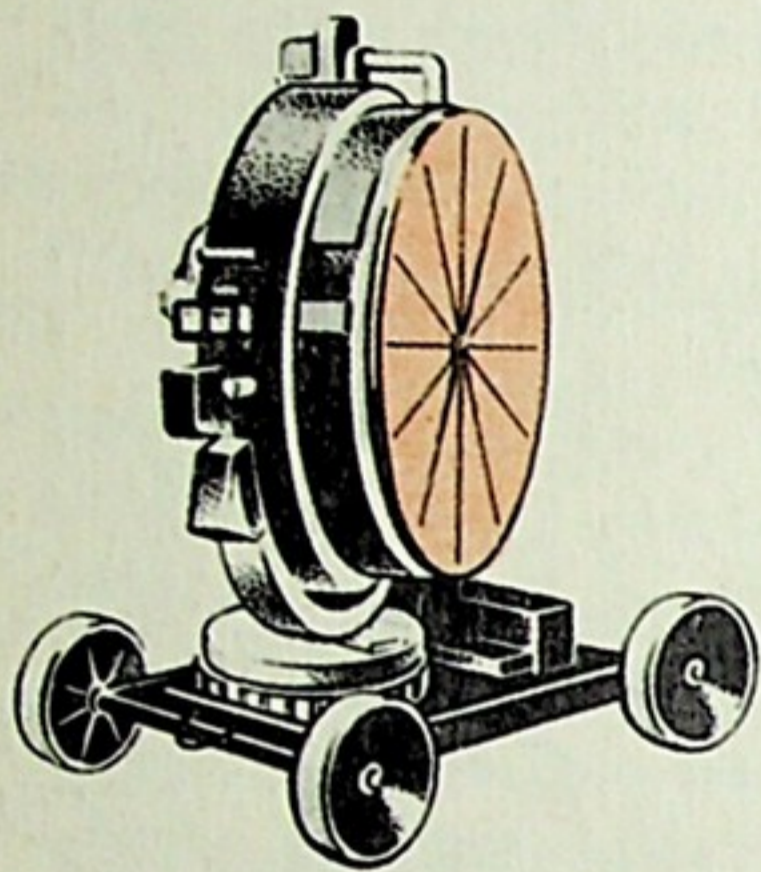
თავისთავადი განმუხტვის დროს კათოდი შეიძლება გახურდეს დადებითი იონებით ბომბარდირებისას. თუ იონების ენერგია ძალიან დიდი არ არის, მაშინ კათოდიდან ელექტრონები არ ამოიგლიჯება და ისინი გამოდიან თერმოელექტრონული ემისიის შედეგად.

## 72. თავისთავადი განმუხტვის სხვადასხვა ტიპი და მათი ტექნიკური გამოყენება

იმის მიხედვით, თუ როგორია აირის მდგომარეობა და თვისებები ელექტროდების განლაგება და ხასიათი, აგრეთვე ელექტროდებზე მოდებული ძაბვა, აირში ხდება სხვადასხვა სახის თავისთავადი განმუხტვა.



**მღვივარი განმუხტვა.** დაბალი წნევის დროს (ვერცხლისწყლის სვეტის მილიმეტრის მათედი და მეასედი ნაწილები) მიღწევა დავთ მღვივარ განმუხტვას. მღვივარი განმუხტვის აღძვრისათვის საკმარისია ელექტროდებზე იყოს რამდენიმე ასეული (ზოგჯერ კი საგრძნობლად ნაკლები) ვოლტი ძაბვა. მღვივარი განმუხტვისას თითქმის მთელი მილი, კათოდის მახლობელი მცირე უბნის გარდა, ერთგვაროვნად ანათებს. ამ ნათებას დადებით სვეტს უწოდებენ (იხ. ფერადი ჩანართი 4).



სურ. 165.

მოსფერული წნევის დროსაც კი საგრძნობია, რადგან უარყოფითი ელექტროდიდან ამოტყორცნილი ელექტრონების რაოდენობა ძალიან დიდია. მცირე ზომის რკალში დენის ძალა რამდენიმე ამპერს აღწევს, დიდ რკალებში — რამდენიმე ასეულ ამპერს — სულ რაღაც 50 ვ პოტენციალთა სხვაობის დროს.

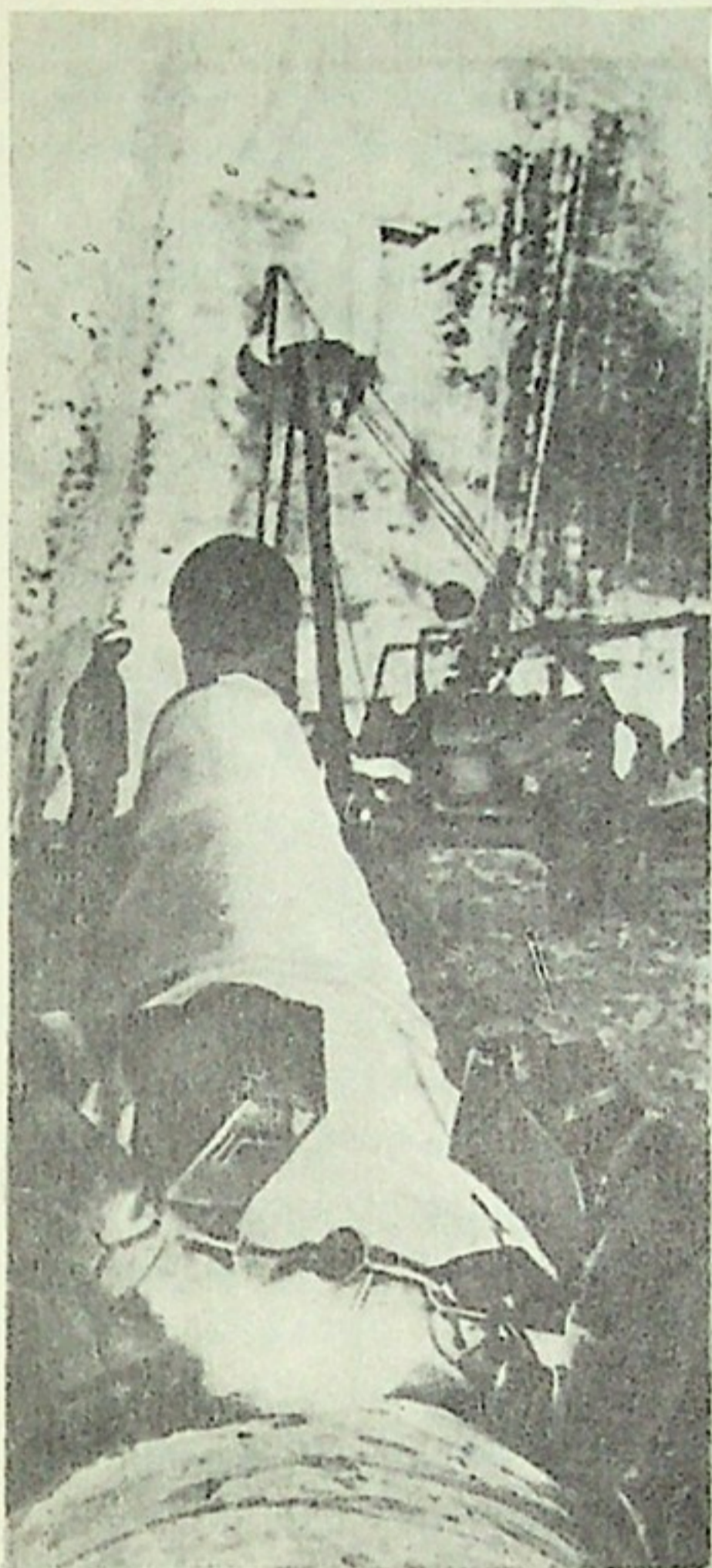
ელექტრული რკალი პირველად 1802 წელს მიიღო რუსმა აკადემიკოსმა ვ. პეტროვმა.

რკალური განმუხტვა სინათლის მძლავრი წყაროა. მას იყენებენ პროექტორებში (სურ. 165), საპროექციო აპარატებსა და კინოაპარატებში.

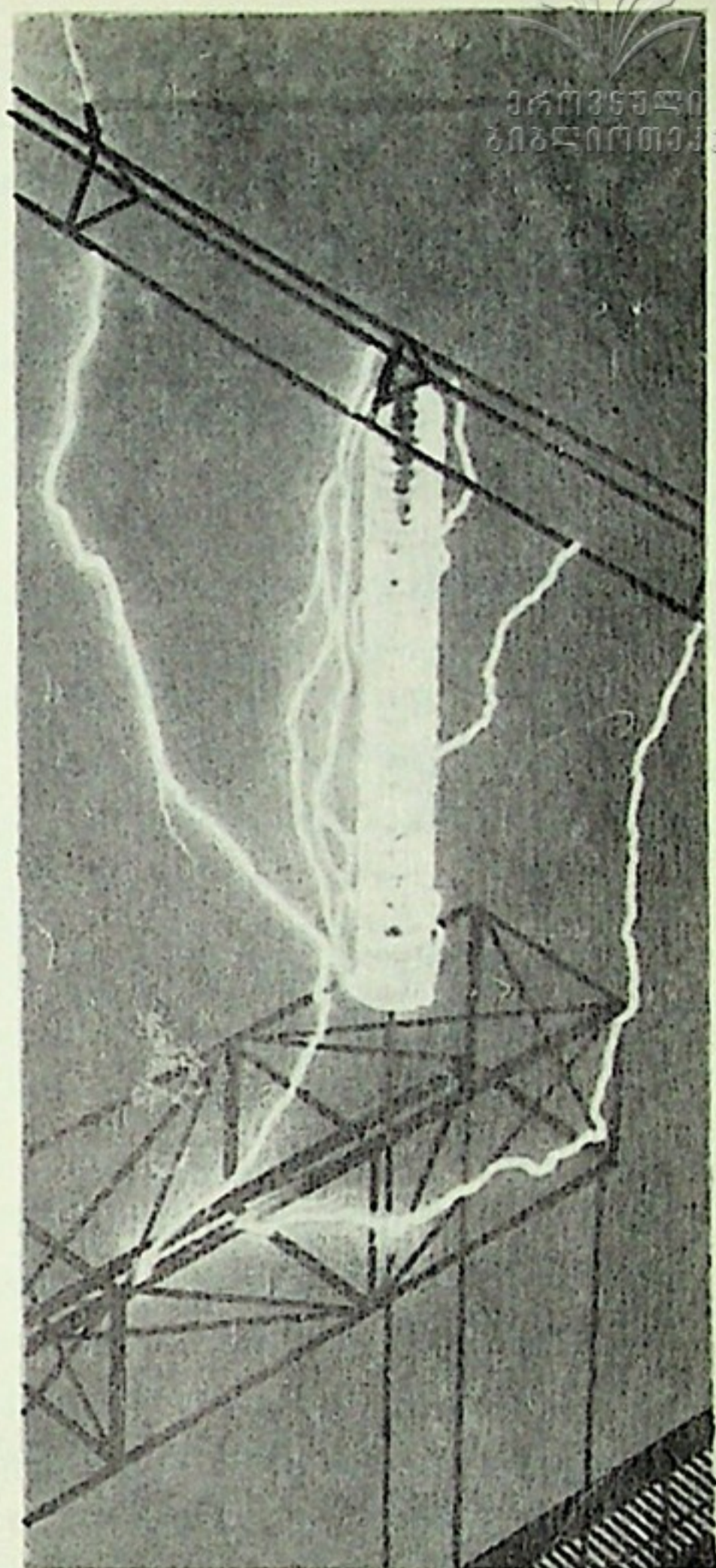
მეტალურგიაში ფართოდ იყენებენ ელექტროლუმელებს, რომლებშიც სითბოს წყაროა რკალური განმუხტვა. რკალური განმუხტვით სარგებლობენ აგრეთვე ლითონების შესადულებლად (სურ. 166).

**თავისთავადი განმუხტვის სხვა ტიპები.** ატმოსფერული წნევის პირობებში, გამტარის წვეტის უბნებში, რომლებსაც დიდი ელექტრული მუხტი აქვთ, შეიმჩნევა განმუხტვა, რომლის მნათი არე გვირგვინს მოგვაგონებს (იხ. ფერადი ჩანართი 4). ეს განმუხტვა, რომელსაც გვირგვინისებრი განმუხტვა ეწოდება, გამოწვეულია და-





სურ. 166.



სურ. 167.

მუხტული წვეტის მახლობლად ელექტრული ველის მაღალი დაძაბულობით (დაახლოებით  $3 \cdot 10^6$  ვ/მ). გვირგვინისებრ განმუხტვას ანგარიში უნდა გავუწიოთ ყოველთვის, როცა საქმე გვაქვს მაღალ დაბვასთან. გამოშვერილი ნაწილებისა, ან ძალიან წვრილი მავთულების არსებობისას, მოსალოდნელია გვირგვინისებრი განმუხტვა. ეს, რა თქმა უნდა, იწვევს ელექტროენერჯის კარგვას. რაც მეტია მაღალვოლტიანი ხაზის დაბვა, მით მსხვილი უნდა იყოს სადენები.

ელექტროდებს შორის არსებული ელექტრული ველის დიდი დაძაბულობისას ჰაერში აღიძვრება ნაპერწკლური განმუხტვა. გარეგანი სახით ნაპერწკლური განმუხტვა არის კაშკაშა ზიგზაგისებრი ზოლების კონა, რომელიც წვრილი არხიდან განშტოვდება (სურ. 167). ამ სახის განმუხტვა აღიძვრება მაშინ, როცა წყაროს





სიმძლავრე საკმარისი არ არის რკალური ან მღვივარი განმუხტვის შენარჩუნებისათვის. გიგანტური ნაპერწკლური განმუხტვის მაგალითია ელვა (იხ. ფერადი ჩანართი 4).

ელვა ჩნდება ორ ღრუბელს, ან ღრუბელსა და დედამიწას შორის. დენის ძალა ელვაში 500 000 ა-ს აღწევს, პოტენციალთა სხვაობა კი ღრუბელსა და დედამიწას შორის — მილიარდ ვოლტს.

**73. პლაზმა**

ძალიან დაბალ ტემპერატურაზე ყველა ნივთიერება მყარ მდგომარეობაშია. გათბობის შედეგად ნივთიერება მყარი მდგომარეობიდან გადადის თხევადში, შემდეგ კი აირადში.

საკმაოდ დიდ ტემპერატურაზე, ძალიან სწრაფად მოძრავი ატომებისა, თუ მოლეკულების ურთიერთშეხლის შედეგად, იწყება აირის იონიზაცია. ნივთიერება გადადის ახალ მდგომარეობაში, რომელსაც **პლაზმა**<sup>1</sup> ეწოდება. პლაზმა არის ნაწილობრივ ან მთლიანად იონიზებული აირი, რომელშიც დადებითი და უარყოფითი მუხტების სიმკვრივეები პრაქტიკულად ერთმანეთის ტოლია. ამრიგად, პლაზმა მთლიანობაში ელექტრულად ნეიტრალური სისტემაა. პირობების მიხედვით პლაზმის იონიზაციის ხარისხი, ე. ი. იონიზებულ ატომთა რიცხვის შეფარდება ატომების მთელ რაოდენობასთან, შეიძლება სხვადასხვა იყოს. სრულად იონიზებულ პლაზმაში ნეიტრალური ატომები არ არის.

აირის იონიზაცია და პლაზმის წარმოქმნა შეიძლება გამოიწვიოს არა მარტო გათბობამ, არამედ სხვადასხვაგვარმა გამოსხივებამ, ან სწრაფი დამუხტული ნაწილაკებით აირის ატომთა ბომბარდირებამ, ამ შემთხვევაში მიიღება ე. წ. დაბალტემპერატურული პლაზმა.

**პლაზმის თვისებები.** პლაზმას აქვს რიგი სპეციფიკური თვისებები, რაც საფუძველს გვაძლევს განვიხილოთ იგი, როგორც ნივთიერების განსაკუთრებული, მეოთხე მდგომარეობა.

დიდი ძვრადობის გამო პლაზმის დამუხტული ნაწილაკები ადვილად გადაადგილდება ელექტრული და მაგნიტური ველების გავლენით. ამიტომ, პლაზმის ცალკეული უბნების ელექტრული ნეიტრალობის ნებისმიერი დარღვევა, რომელსაც იწვევს ერთი ნიშნის მუხტის

<sup>1</sup> ბერძნული სიტყვიდან plasma — გამოძერწილი, გაფორმებული. თავდაპირველად ამ სიტყვას ხმარობდნენ ბიოლოგიაში სისხლისა და ცოცხალი ქსოვილების უფერული თხევადი კომპონენტების აღსანიშნავად. ფიზიკაში სიტყვა „პლაზმას“ — სულ სხვა აზრი აქვს.



ნაწილაკთა თავმოყრა, სწრაფად ისპობა. აღძრული ელექტრული ველ-  
ლი მანამ გადაადგილებს დამუხტულ ნაწილაკებს, სანამ ელექტრული  
ნეიტრალობა არ აღდგება და ელექტრული ველი არ მოისპობა.

ნეიტრალური აირისაგან განსხვავებით (მის მოლეკულებს შორის  
არსებობს ახლოქმედების ძალები), პლაზმის დამუხტულ ნაწილაკებს  
შორის კულონური ძალები მოქმედებს. ეს ძალები შედარებით ნელა  
მცირდება მანძილის მიხედვით. თითოეული ნაწილაკი ერთბაშად დიდი  
რაოდენობის გარემომცველ ნაწილაკებთან ურთიერთქმედებს. ამის  
გამო ქაოსურ სითბურ მოძრაობასთან ერთად პლაზმის ნაწილაკები  
შეიძლება მოწესრიგებულ (კოლექტიურ) მოძრაობებში მონაწილეობ-  
დნენ. პლაზმაში ადვილად აღიძვრება სხვადასხვა სახის რხევები და  
ტალღები.

პლაზმის გამტარობა მატულობს იონიზაციის ხარისხის ზრდის მი-  
ხედვით. მაღალ ტემპერატურაზე სრულად იონიზებული პლაზმა თავისი  
გამტარობით ზეგამტარებს უახლოვდება.

პლაზმა კოსმოსში. სამყაროს ნივთიერების უდიდესი ნაწილი (და-  
ახლოებით 99%) პლაზმურ მდგომარეობაშია. მაღალი ტემპერატურის  
შედეგად მზე და სხვა ვარსკვლავები სრულად იონიზებული პლაზმი-  
საგან შედგება.

პლაზმისაგან შედგება ვარსკვლავთშორისი გარემოც, რომელიც  
ავსებს მთელ სივრცეს ვარსკვლავებსა და გალაქტიკებს შორის. ვარ-  
სკვლავთშორისი გარემოს სიმკვრივე ძალიან მცირეა, საშუალოდ ერთ  
ატომზე ნაკლები  $1 \text{ სმ}^3$ -ში. ვარსკვლავთშორისი გარემოს ატომთა  
იონიზაცია ხდება ვარსკვლავთა გამოსხივებით და კოსმოსური სხივე-  
ბით — სწრაფ ნაწილაკთა ნაკადებით, რომლებიც მთელი სამყაროს  
სივრცეს განჭოლავენ ყველა მიმართულებით. ვარსკვლავთა ცხელი  
პლაზმისაგან განსხვავებით, ვარსკვლავთშორისი პლაზმის ტემპერატუ-  
რა ძალიან დაბალია.

პლაზმითაა გარემოცული ჩვენი პლანეტა. ატმოსფეროს ზედა შრე  
 $100-300 \text{ კმ}$  სიმაღლეზე იონიზებული აირია — იონოსფერო. ატმოს-  
ფეროს ზედა შრეების ჰაერის იონიზაცია უპირატესად გამოწვეულია  
მზის გამოსხივებითა და მზიდან ამოფრქვეული დამუხტული ნაწილა-  
კების ნაკადით. იონოსფეროს ზემოთ გადაჭიმულია დედამიწის რა-  
დიაციული სარტყლები, რომლებიც თანამგზავრთა საშუალებით აღმო-  
აჩინეს. რადიაციული სარტყლები აგრეთვე პლაზმისაგან შედგება.

პლაზმის ბევრი თვისება ახასიათებს თავისუფალ ელექტრონებს  
ლითონებში. ჩვეულებრივი პლაზმისაგან განსხვავებით, მყარი სხეუ-  
ლის პლაზმაში დადებით იონებს არ შეუძლიათ მთელ სხეულში გადა-  
ადგილება.





**პლაზმის პრაქტიკული გამოყენება.** პლაზმა წარმოიქმნება აირში ყველა სახის განმუხტვისას: მღვივარი, რკალური, ნაპერწკლური და ა. შ.

სარეკლამო მნათ მიღებასა და დღის სინათლის ნათურებში გამოყენებულია მღვივარი განმუხტვის დადებითი სვეტის პლაზმა. დღის სინათლის ნათურებში განმუხტვა ხდება ვერცხლისწყლის ორთქლში. მინის მილს ფარავენ სპეციალური შედგენილობის ნივთიერებით — ლუმინოფორით<sup>1</sup>, რომელიც პლაზმის გამოსხივების გავლენით თავად იწყებს ნათებას. ლუმინოფორს ისე შეარჩევენ, რომ მისი ნათება თავისი შედგენილობით ახლოს იყოს თეთრ სინათლესთან.

აირადი განმუხტვის პლაზმას იყენებენ ბევრ ხელსაწყოში, მაგალითად, აირად ლაზერებში — სინათლის კვანტურ წყაროებში. ლაზერები სინათლის უაღრესად მძლავრი წყაროა. მათ XI კლასში გაეცნობით.

პლაზმის ნაკადი გამოყენებულია მაგნიტოჰიდროდინამიკურ გენერატორებში, რომლებიც 197-ე გვერდზე მოვიხსენიეთ. კოსმოსური ხომალდებისათვის პერსპექტიულია მცირე სიმძლავრის პლაზმური ძრავების გამოყენება.

დიდი ხანი არ არის, რაც შეიქმნა ახალი ხელსაწყო — პლაზმოტრონი. პლაზმოტრონი იქმნება მკვრივი პლაზმის მძლავრი ჭავლები, რომლებიც ფართოდაა გამოყენებული ტექნიკის სხვადასხვა დარგში: ლითონთა ჭრისა და შედუღებისათვის, მაგარ ქანებში ჭაბურღილების გასაკეთებლად და ა. შ. (იხ. ფერადი ჩანართი 4). პლაზმურ ჭავლში ხდება ბევრი ქიმიური რეაქციის დაჩქარება და ისეთი რეაქციების ჩატარება, რომლებიც ჩვეულებრივ პირობებში არ მიმდინარეობს.

მაღალი ტემპერატურის (ასეულ მილიონობით გრადუსი) პლაზმის გამოყენების მნიშვნელოვანი პერსპექტივაა მისი მეშვეობით მართვადი თერმობირთვული რეაქციების შექმნა. ამჟამად, ინტენსიური კვლევა მიმდინარეობს ამ რეაქციების განხორციელებისათვის, რის შედეგადაც ხდება უზარმაზარი ენერჯის გამოყოფა. ამ გრანდიოზული ამოცანის გადაწყვეტა კაცობრიობას მისცემს ენერჯის პრაქტიკულად ამოუწურავ წყაროს.

- 9
1. რა განსხვავებაა ელექტროლიტების დისოციაციასა და აირის იონიზაციას შორის?
  2. რა პირობებში გადაიქცევა აირში მიმდინარე არათავისთავადი განმუხტვა თავისთავადად?
  3. რას წარმოადგენს თერმოელექტრონული ემისია?
  4. ჩამოთვალეთ თავისთავადი განმუხტვის ძირითადი ტიპები.
  5. რას ეწოდება პლაზმა.

<sup>1</sup> ლათინური სიტყვიდან „ლიუმენ“ — სინათლე და ბერძნულიდან „ფოროს“ — მქონე.



## 74. ელექტრონი და ვაკუუმი

ელექტრონ-სხივურ მილაკში, რადიომიმღების ელექტრონულ მილაკში და სხვა მრავალ მოწყობილობაში ელექტრონები ვაკუუმში მოძრაობენ. როგორ მიიღება ელექტრონთა ნაკადი ვაკუუმში? რატვისებით ხასიათდება იგი?

ორელექტროდიან მინის მილაკში (სურ. 161) თავისთავადი აიროვანი განმუხტვა შეიძლება მოხდეს მაშინ, როცა აირის წნევა ძალიან დაბალი არ არის. თუ აირის წნევა 0,0001 მმ ვწყ. სვ.-ზე დაბლა დაიწევს, განმუხტვა შეწყდება, ე.ი. დენის ძალა ნულის ტოლი გახდება, თუმცა, ელექტროდებზე დაბვა ნულისაგან განსხვავებული იქნება.

ეს აიხსნება ატომების სიმცირით. რის გამოც, არ ხდება იონების წარმოქმნა ატომებთან ელექტრონების შეხლით და კათოდიდან ამ იონებით ელექტრონების ამოგლეჯა.

გაუხშობებული აირი არაგამტარი რჩება წნევის შემდგომი შემცირების დროსაც. თუ აირის ამოტუმბვას გავაგრძელებთ, შეიძლება მივალწიოთ მის ისეთ კონცენტრაციას, როცა მოლეკულები ერთი კედლიდან მეორემდე მანძილს გადიან ერთმანეთთან შეუჭახებლად. მილაკში აირის ასეთ მდგომარეობას ვაკუუმი ეწოდება.

გაუხშობებული აირი გამტარი ხდება იონიზატორის ზემოქმედებით (არათავისთავად აიროვანი განმუხტვით **§ 72**). თუ აირი ისე ცოტაა, რომ შეიძლება ვაკუუმზე ვილაპარაკოთ, მაშინ აირის გამტარობა შეიძლება უზრუნველვყოთ მილაკში დამუხტული ნაწილაკების წყაროს შეტანით.

უფრო ხშირად ასეთი წყაროს მოქმედება ემყარება მაღალ ტემპერატურამდე გახურებული სხეულის მიერ ელექტრონების გამოშვების თვისებას. თერმოელექტრონული ემისიის მოვლენას, რომლის შესახებაც უკვე ვთქვით **71-ე პარაგრაფში**, აქვს დიდი პრაქტიკული გამოყენება. უმეტეს თანამედროვე ელექტრონულ ვაკუუმიან ხელსაწყოებში დამუხტული ნაწილაკების წყაროა გახურებული კათოდი.

## 75. ორელექტროდიანი ელექტრონული მილაკი — დიოდი

თერმოელექტრონული ემისიის გამო ლითონის გახურებული ელექტროდი, ცივისაგან განსხვავებით, უწყვეტად უშვებს ელექტრონებს, რომლებიც მის ირგვლივ „ელექტრონულ ღრუბელს“ ქმნის. ამ დროს ელექტროდი დადებითად იმუხტება და ელექტრონული ველის გავლენით ელექტრონები ნაწილობრივ უკანვე ბრუნდება. წონასწორობის მდგომარეობაში ყოველ წამს ელექტროდიდან გამოსული



ელექტრონების რაოდენობა ტოლია უკანვე დაბრუნებული ელექტრონების რაოდენობისა. **რაც უფრო მაღალია ლითონის ტემპერატურა, მით უფრო მეტია ელექტრონული ღრუბლის სიმკვრივე.**

ვაკუუმიან ჰურჭელში ჩარჩილულ ცხელ და ცივ ელექტროდებს შორის განსხვავება იწვევს ცალმხრივ დენს. **დენის წყაროსთან ელექტროდების მიერთების შემდეგ, მათ შორის აღიძვრება ელექტრული ველი. თუ წყაროს დადებითი პოლუსი ცივ ელექტროდთან (ანოდთან) არის მიერთებული, უარყოფითი კი — ცხელთან (კათოდთან), მაშინ ელექტრული ველის დაძაბულობა მიმართულია ცხელი ელექტროდისაკენ.** ამ ველის გავლენით ელექტრონები ნაწილობრივ ტოვებენ ელექტრონულ ღრუბელს და მოძრაობენ ცივი ელექტროდისაკენ. ელექტრული წრედი იკვრება და მასში გადის ელექტრული დენი. **წყაროს საპირისპირო ჩართვისას ველის დაძაბულობა მიმართულია კათოდთან ანოდისაკენ.** ამ შემთხვევაში ელექტრული ველი ღრუბლის ელექტრონებს უკან განზიდავს კათოდისაკენ, წრედი განირთვება.

**დიოდი.** ცალმხრივ გამტარობას იყენებენ ორელექტროდიან ელექტრონულ ხელსაწყოში — ვაკუუმიან დიოდში.

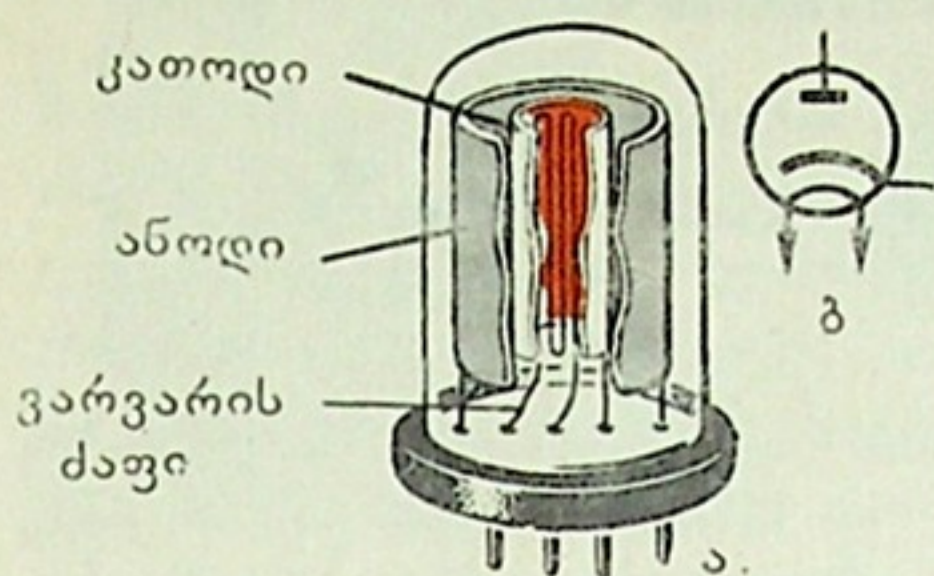
თანამედროვე ვაკუუმიანი დიოდის მოწყობილობა ასეთია: მინის ან ლითონკერამიკის ბალონში, რომლიდანაც ჰაერი ამოტუმბულია  $10^{-6}$ — $10^{-7}$  მმ ვწყ. სვ. წნევამდე, მოთავსებულია ორი ელექტროდი (სურ. 168, ა). ერთი მათგანი — კათოდი — ლითონის ვერტიკალური ცილინდრია, რომელიც ჩვეულებრივ დაფარულია ტუტემიწა ლითონების — ბარიუმის, სტრონციუმის, კალციუმის — ოქსიდების შრით. ასეთ კათოდს, ოქსიდური კათოდი ეწოდება. **გახურების დროს ოქსიდური კათოდის ზედაპირი გამოყოფს გაცილებით მეტ ელექტრონს, ვიდრე სუფთა ლითონისაგან დამზადებული კათოდი. კათოდის შიგნით იზოლირებული გამტარია, რომელიც ცვლადი დენით ხურდება. გახურებული კათოდი აფრქვევს ელექტრონებს, რომლებიც ანოდს აღწევს, თუ მას აქვს კათოდთან შედარებით უფრო მაღალი პოტენციალი.**

მილაკის ანოდი მრგვალი ან ოვალური ცილინდრია, რომელსაც კათოდთან საერთო ღერძი აქვს. დიოდი სქემატურად გამოსახულია 168-ე, ბ სურათზე.

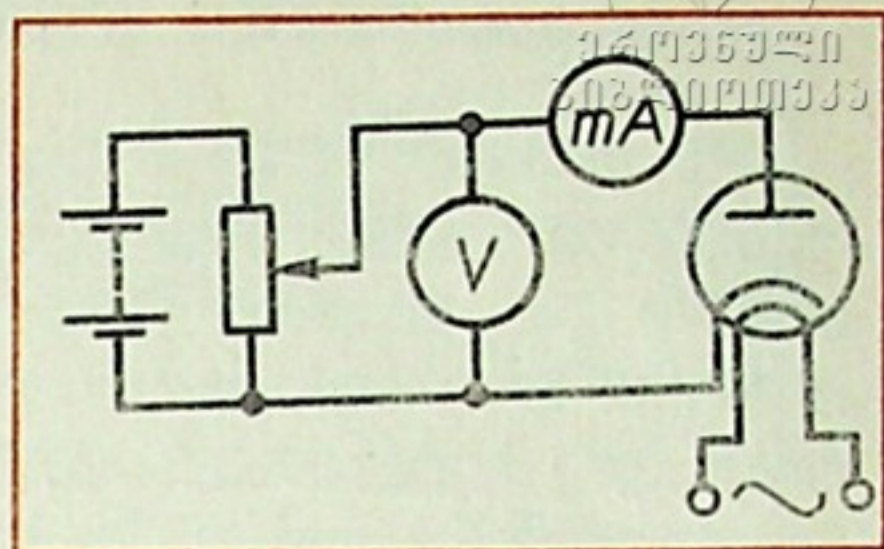
**დიოდის ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი.** ნებისმიერი ელექტრონული მოწყობილობის არსებით თვისებებს გამოსახავს მისი ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი, ე. ი. დენის ძალის დამოკიდებულება ამ მოწყობილობის მომჭერებზე არსებულ პოტენციალთა სხვაობასთან.

დიოდის ვოლტ-ამპერული მახასიათებლის მიღება შეიძლება წრედის მეშვეობით, რომლის სქემა 169-ე სურათზეა ნაჩვენები. ლითონის გამტარის მახასიათებლისაგან განსხვავებით, ეს მახასიათებელი არაწრფივია (სურ. 170). ვაკუუმიანი დიოდის მახასიათებლის არაწრფი-





სურ. 168.

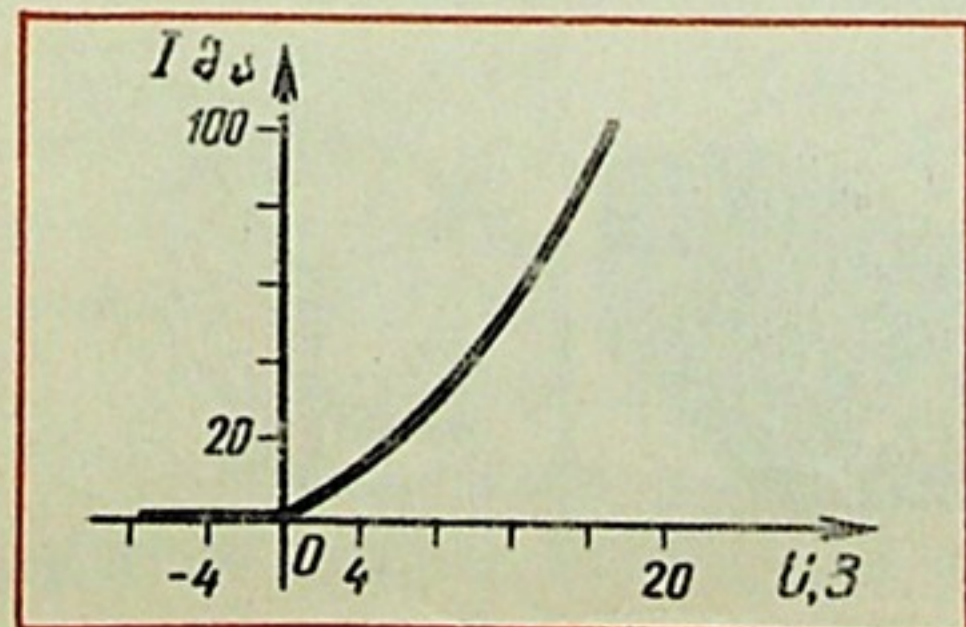


სურ. 169.

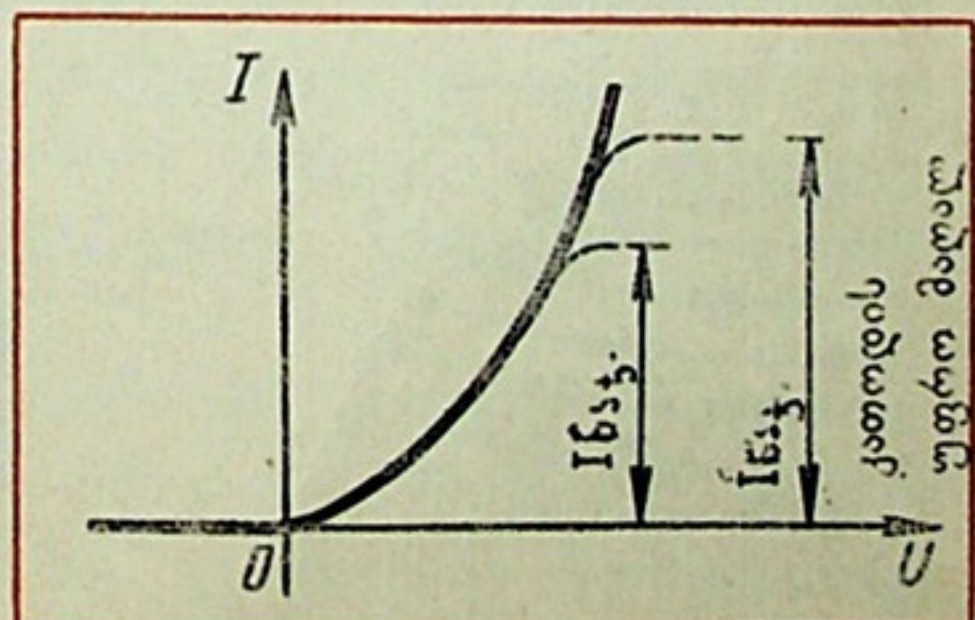
ვობის ძირითადი მიზეზი ისაა, რომ ცდილობს დენს წარმოქმნის თავისუფალი ელექტრონები, რომლებიც შეზღუდული რაოდენობით ამოდის კათოდიდან. გარდა ამისა, ელექტროდების ველთან ერთად, ელექტრონების მოძრაობაზე არსებით გავლენას ახდენს კათოდთან არსებული ელექტრონული ღრუბლის სივრცული მუხტის ველი.

რაც უფრო მაღალია დაბვა ანოდსა და კათოდს შორის, მით ნაკლებია ელექტრონული ღრუბლის სივრცული მუხტი, ელექტრონთა მით მეტი რაოდენობა აღწევს ანოდს, მაშასადამე, მით მეტია მილაკში დენის ძალაც. თუ კათოდი არაა დაფარული ოქსიდური შრით, მაშინ საკმაოდ დიდი დაბვისას კათოდიდან გამოსული ყველა ელექტრონი აღწევს ანოდს და დაბვის შემდეგი ზრდისას დენი არ იცვლება. დგება ნაჯერობა (პუნქტირწირი 171-ე სურათზე). თუ კათოდის ტემპერატურას გავზრდით (ეს შეიძლება ვარვარების წრედში რეოსტატის წინააღობის შეცვლით), მაშინ კათოდს ელექტრონთა მეტი რაოდენობა დატოვებს. კათოდის ირგვლივ ელექტრონული ღრუბლის სიმკვრივე გაიზრდება. ნაჯერობის დენი მიიღება უფრო მაღალი დაბვისას ანოდსა და კათოდს შორის, და მისი მნიშვნელობა გაიზრდება (მეორე პუნქტირწირი 171-ე სურათზე). ოქსიდური კათოდის მქონე ელექტრონულ მილაკში ნაჯერობის მიღწევა შეუძლებელია, რადგანაც ეს მოითხოვს დიდ პოტენციალთა სხვაობას, რომლის დროსაც კათოდი იშლება.

ცდილობს გამოიყენება ცვლადი ელექტრული დენის გამართვისათვის.



სურ. 170.



სურ. 171.





თუ ელექტრონული მილაკის ანოდს ნახვრეტს გავუკეთებთ, მაშინ ელექტრული ველის მიერ აჩქარებული ელექტრონების ნაწილი ნახვრეტში გავა და ანოდის უკან ელექტრონულ კონას მოგვცემს. თუ კათოდსა და ანოდს შორის დამატებით ელექტროდს მოვათავსებთ, მაშინ მისი პოტენციალის ცვლით შეგვიძლია ვცვალოთ ელექტრონების რაოდენობა კონაში. ნივთიერებასთან ურთიერთქმედებისას ელექტრონული კონის სწრაფი ნაწილაკები იწვევენ სხვადასხვა მოვლენებს, რომლებიც პრაქტიკაში გამოიყენება.

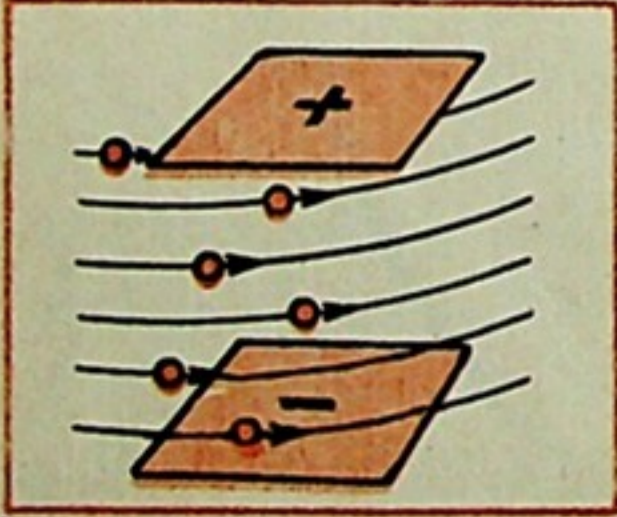
**ელექტრონული კონის თვისებები და მათი გამოყენება.** სხეულზე მოხვედრისას ელექტრონული კონა იწვევს მის გახურებას. თანამედროვე ტექნიკაში ამ თვისებას იყენებენ ვაკუუმში ზესუფთა ლითონების ელექტრონული დნობისათვის.

რაიმე სხეულთან შეხლისას, სწრაფი ელექტრონების დამუხრუჭება იწვევს რენტგენის გამოსხივებას. ეს თვისება გამოყენებულია რენტგენის მილაკში, რის შესახებაც XI კლასის სახელმძღვანელოში იქნება ლაპარაკი.

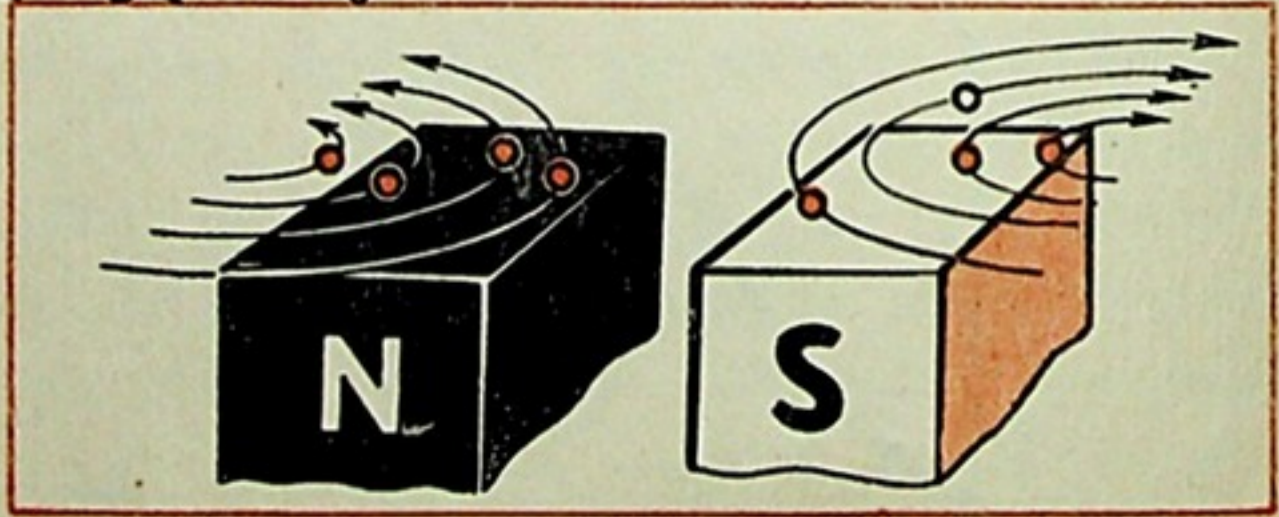
ზოგიერთი ნივთიერება (მინა, თუთიისა და კადმიუმის სულფიდები) იწყებს ნათებას ელექტრონებით დაბომბვისას. ამჟამად, ამ ტიპის ნივთიერებათა შორის (ლუმინოფორები) ისეთებს იყენებენ, რომლებიც ელექტრონული კონის ენერგიის დაახლოებით 25%-ს სინათლის ენერგიად გარდაქმნიან.

ელექტრონული კონა იხრება ელექტრონულ ველში. მაგალითად, კონდენსატორის ფირფიტებს შორის გავლისას ელექტრონები იხრებიან უარყოფითად დამუხტული ფირფიტიდან დადებითად დამუხტულისაკენ (სურ. 172).

ელექტრონული კონა იხრება აგრეთვე მაგნიტურ ველშიც. მაგნიტის ჩრდილო პოლუსის თავზე გავლის დროს ელექტრონები იხრებიან მარცხნივ, ხოლო სამხრეთ პოლუსის თავზე გავლისას — მარჯვნივ (სურ. 173). მზიდან მომავალ ელექტრონთა კონის გადახრა დედამიწის მაგნიტურ ველში იწვევს პოლუსებთან ატმოსფეროს ზედა შრეების აირთა ნათებას (პოლარული ნათება).

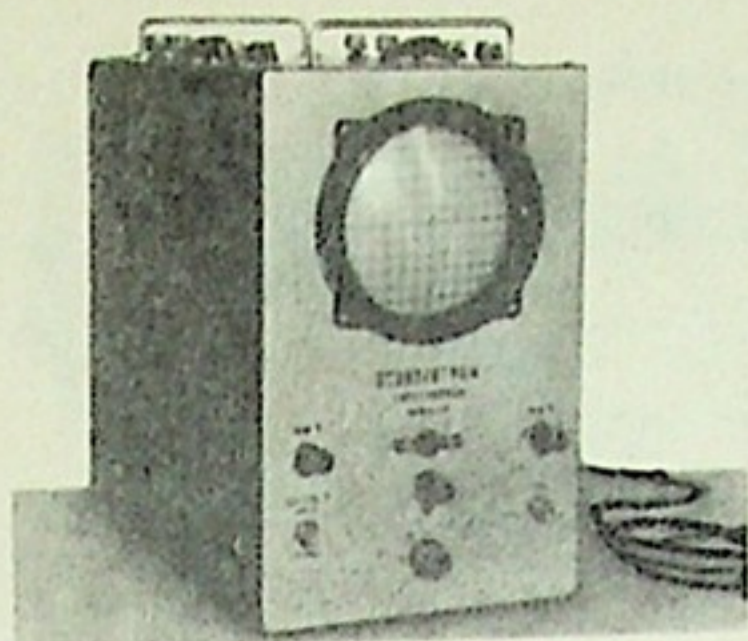


სურ. 172.

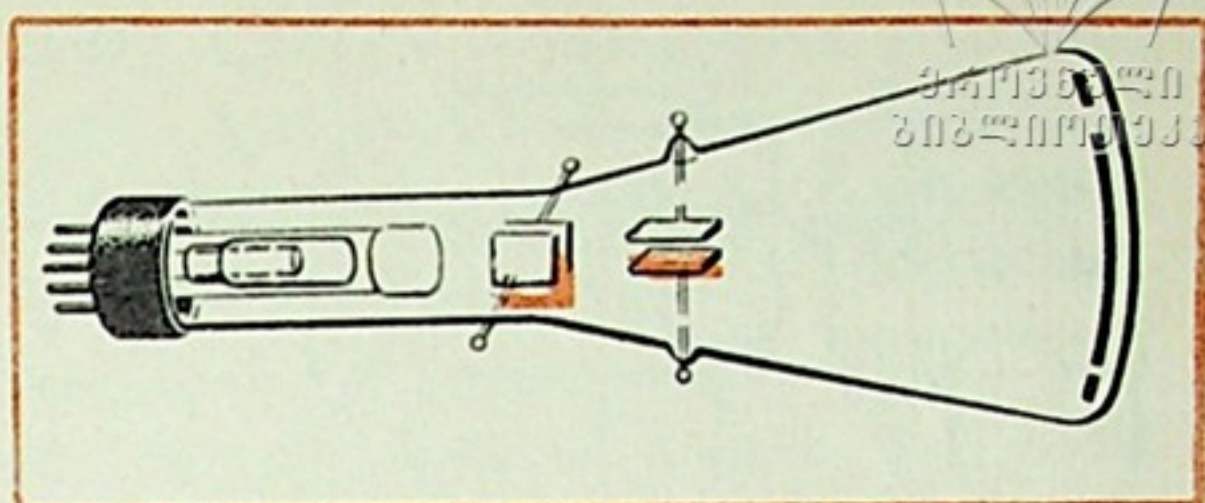


სურ. 173.





სურ. 174.



სურ. 175.

ელექტრული ან მაგნიტური ველით ელექტრონული კონის მართვა და კონის გავლენით ლუმინოფორიანი ეკრანის ნათება გამოყენებულია ელექტრონ-სხივურ მილაკში.

**ელექტრონ-სხივური მილაკი.** ელექტრონ-სხივური მილაკი ძირითადი ელემენტია ტელევიზორისა და ოსცილოგრაფისა<sup>1</sup>, რომელსაც ელექტრულ წრედში სწრაფცვლადი პროცესების კვლევისათვის იყენებენ (სურ. 174).

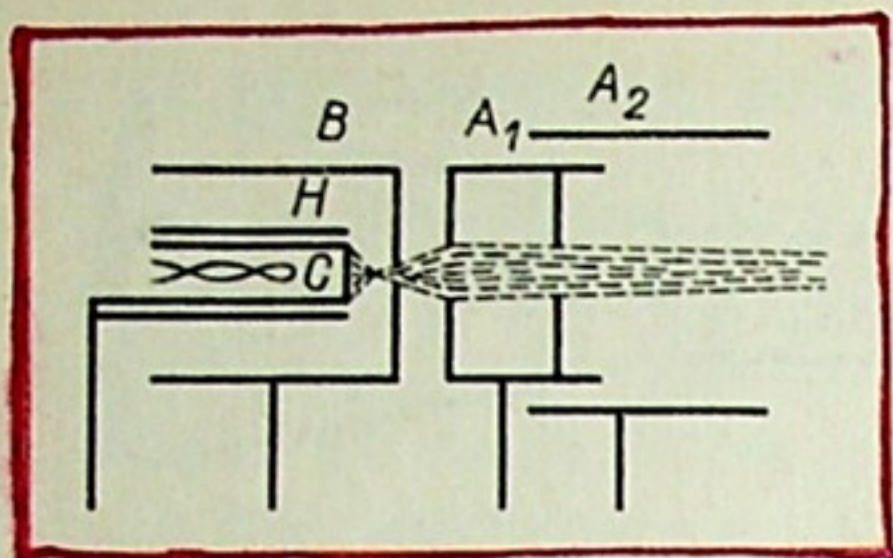
ელექტრონ-სხივური მილაკის მოწყობილობა ნაჩვენებია 175-ე სურათზე. მილაკი წარმოადგენს ვაკუუმ-ბალონს, რომლის ერთ-ერთი კედელი ეკრანის მოვალეობას ასრულებს. მილაკის ვიწრო ბოლოში მოთავსებულია სწრაფი ელექტრონების წყარო — ელექტრონთა სატყორცნი (სურ. 176). ის შედგება კათოდისა, მმართველი ელექტროდისა და ანოდისაგან (უფრო ხშირად რამდენიმე ანოდია განლაგებული ერთმანეთის მიყოლებით).

ელექტრონებს აფრქვევს გახურებული ოქსიდური შრე *C* ცილინდრული კათოდის ტორსიდან; კათოდი გარშემორტყმულია *H* თბოდაძაბვის ეკრანით. ელექტრონები გადიან ცილინდრული მმართველი ელექტროდის (ის არეგულირებს ელექტრონების რიცხვს კონაში) *B* ნახვრეტში. თითოეული ანოდი *A*<sub>1</sub> და *A*<sub>2</sub> შედგება მცირენახვრეტებიანი დისკოებისგან, რომლებიც ლითონის ცილინდრშია ჩადგმული. პირველ ანოდსა და კათოდს შორის ქმნიან ასობით ან ზოგჯერ ათასობით ვოლტამდე ძაბვას. ძლიერი ელექტრული ველი აჩქარებს ელექტრონებს და ისინი ღებულობენ დიდ სიჩქარეს.

ანოდების ფორმა, განლაგება და პოტენციალები ისეა შერჩეული, რომ ელექტრონების აჩქარებასთან ერთად მოხდეს ელექტრონული კონის ფოკუსირებაც, ე. ი. მისი განივკვეთის შემცირება ეკრანზე თითქმის წერტილის მიღებამდე.

ეკრანისაკენ მიმავალ გზაზე კონა თანამიმდევრულად გაივლის ორ წყვილ მმართველ ფირფიტას შორის, რომლებიც ბრტყელი კონდენსატორის ფირფიტებს მოგვაგონებს. თუ ფირფიტებს შორის ელექ-





სურ. 176.

ტრული ველი არ არის, კონა არ გადაიხრება და მნათი წერტილი ეკრანის ცენტრში მოთავსდება. თუ ვერტიკალურად განლაგებულ ფირფიტებს მოვდებთ პოტენციალთა სხვაობას, კონა ჰორიზონტალური მიმართულებით წაინაცვლებს, ხოლო თუ ჰორიზონტალურ ფირფიტებს მოვდებთ — ვერტიკალური მიმართულებით. ორივე წყვილი ფირფიტის ერთდროული გამოყენება შესაძლებლობას გვაძლევს მნათი წერტილი ეკრანზე ნებისმიერი მიმართულებით გადავაადგილოთ. რადგან ელექტრონის მასა ძალიან მცირეა, ამიტომ კონა მეყსეულად „გრძნობს“ მმართველი ფირფიტების პოტენციალთა სხვაობის შეცვლას.

ტელევიზორში გამოყენებულ ელექტრონ-სხივურ მილაკში (ე. წ. კინესკოპში), ელექტრონული სატყორცნით შექმნილი კონის მართვა მაგნიტური ველის მეშვეობით ხორციელდება. ამ ველს ქმნის კოჭები, რომლებიც მილაკის ყელზეა ჩამოცმული (სურ. 177).

ელექტრონ-სხივურ მილაკებს ფართო გამოყენება აქვს ელექტრონულ გამომთვლელ მანქანებზე (ეგმ) მისაერთებელ მოწყობილობაში — დისპლეიში. დისპლეის ეკრანზე, რომელიც ტელევიზორის ეკრანის მსგავსია, მიიღება გამომთვლელ მანქანაში ჩაწერილი და გადამუშავებული ინფორმაცია. შეიძლება უშუალოდ დავინახოთ ნებისმიერ ენაზე დაწერილი ტექსტი, სხვადასხვა პროცესის გრაფიკი, რეალური ობიექტების გამოსახულება, აგრეთვე წარმოსახვითი ობიექტები, რომლებიც ეგმ-ის პროგრამაში ჩაწერილ კანონებს ემორჩილება.

- 9 1. რა მიზნით ქმნიან ვაკუუმს ელექტრონ-სხივურ მილაკსა და ელექტრონულ მილაკებში? 2. როგორაა მოწყობილი დიოდის? 3. დახაზეთ დიოდის ვოლტ-ამპერული მახასიათებელი და ახსენით მისი თავისებურება. 4. როგორ ხორციელდება ელექტრონული კონების მართვა? 5. როგორაა მოწყობილი ელექტრონ-სხივური მილაკი?

## 77. ელექტრონული დენი ნახევარგამტარში

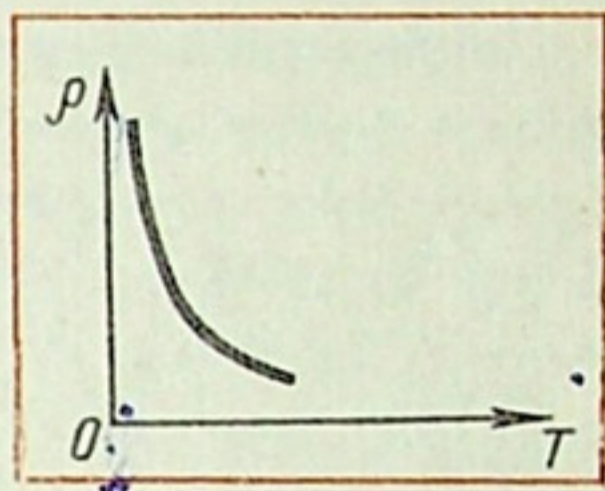
ნახევარგამტარს გამტარისაგან ყველაზე მკაფიოდ გამტარობის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების ხასიათი განასხვავებს. გაზომვები გვიჩვენებს, რომ ბევრი ელემენტისა (სილიციუმი, გერმანიუმი, სე-



ლენი და სხვ.) და ნაერთის (PbS, CdS და სხვ.) კუთრი წინალობა ლითონის მსგავსად კი არ იზრდება ტემპერატურის ზრდასთან ერთად (იხ. სურ. 140), არამედ პირიქით მკვეთრად მცირდება (სურ. 178). სწორედ ასეთ ნივთიერებას ეწოდება ნახევარგამტარი.

სურათზე გამოსახული გრაფიკიდან ჩანს, რომ აბსოლუტური ნულის მახლობელ ტემპერატურაზე ნახევარგამტარის კუთრი წინალობა ძალიან დიდია. ეს ნიშნავს, რომ დაბალ ტემპერატურაზე ნახევარგამტარი იგივე დიელექტრიკია. ტემპერატურის ზრდისას კუთრი წინალობა სწრაფად იკლებს. რა არის ამის მიზეზი?

**ნახევარგამტარის აგებულება.** იმისათვის, რომ გავარკვიოთ ნახევარგამტარის გამტარობის მექანიზმი, აუცილებელია ვიცოდეთ ნახევარგამტარის კრისტალის აგებულება და იმ კავშირის ბუნება, რომელიც კრისტალის ატომებს აკავებს ერთმანეთის მახლობლად. მაგალითისათვის განვიხილოთ სილიციუმის კრისტალი.



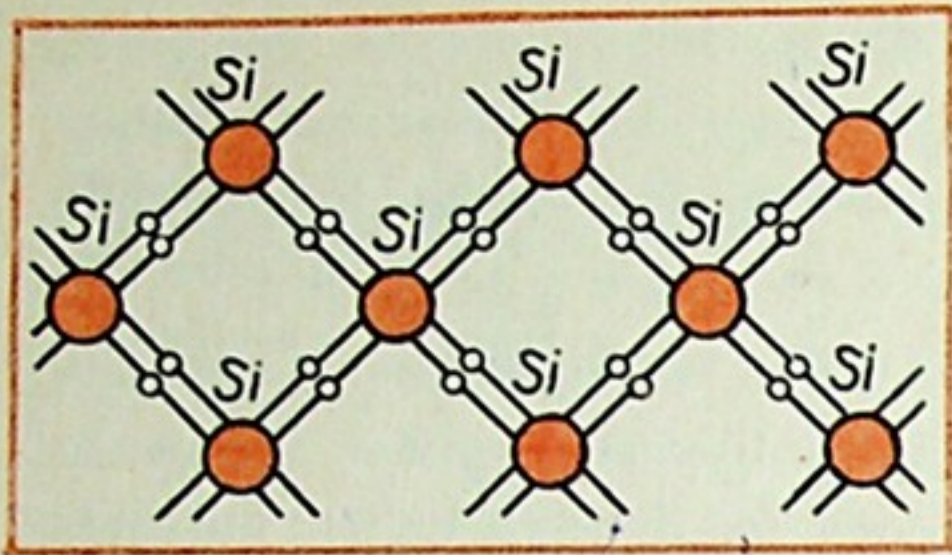
სურ. 178.

სილიციუმი ოთხვალენტიანი ელემენტია. ეს ნიშნავს, რომ ატომის გარეთა შრეში ოთხი ელექტრონია, რომლებიც შედარებით სუსტადაა დაკავშირებული ბირთვთან. სილიციუმის თითოეული ატომის უახლოეს მეზობელ ატომთან რიცხვიც ოთხის ტოლია. სილიციუმის კრისტალის სტრუქტურის ბრტყელი სქემა გამოსახულია 179-ე სურათზე.

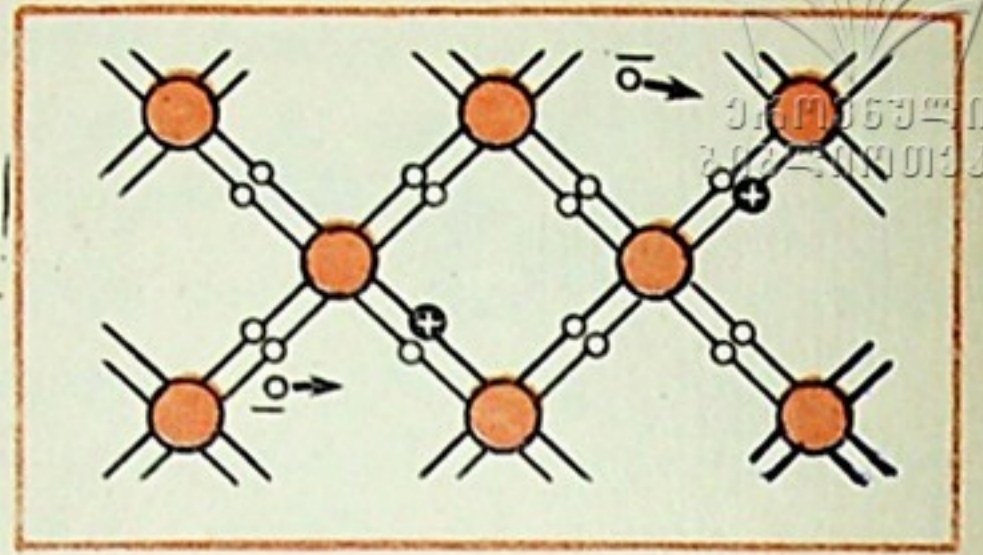
მეზობელი ატომების წყვილთა ურთიერთქმედება წყვილელექტრონული კავშირით, ანუ ე. წ. კოვალენტური კავშირით ხორციელდება (იხ. სახელმძღვანელო „არაორგანული ქიმია“ VIII — IX კლასებისათვის). (ამ კავშირის შექმნაში თითოეული ატომიდან თითო სავალენტო ელექტრონი მონაწილეობს. ეს ელექტრონი წყდება ატომს (საერთო ხდება კრისტალისათვის) და მოძრაობის დროს უმეტეს ნაწილს მეზობელ ატომებს შორის არსებულ სივრცეში ატარებს. მისი უარყოფითი მუხტი სილიციუმის დადებით იონებს ერთმანეთის მახლობლად აკავებს.

არ უნდა ვიფიქროთ, რომ საერთო ელექტრონთა წყვილი მხოლოდ ორ ატომს ეკუთვნის. თითოეული ატომი მეზობელ ატომებთან ქმნის ოთხ კავშირს და მოცემული სავალენტო ელექტრონი შეიძლება ნებისმიერ მათგანში მოძრაობდეს. (მეზობელ ატომამდე მისული, ის შეიძლება გადავიდეს მომდევნოში, და ასე გადაინაცვლოს მთელი კრისტალის გასწვრივ. საერთო სავალენტო ელექტრონი მთელ კრისტალს ეკუთვნის.





სურ. 179.



სურ. 180.

სილიციუმის წყვილელექტრონული კავშირი საკმაოდ მტკიცეა და დაბალ ტემპერატურაზე არ წყდება. ამიტომ სილიციუმი დაბალ ტემპერატურაზე ელექტრულ დენს არ ატარებს. ატომთა კავშირში მონაწილე სავალენტო ელექტრონები მჭიდროდაა დაკავშირებული კრისტალურ მესერთან და გარე ელექტრული ველი ვერ ახდენს შესამჩნევ გავლენას მათ მოძრაობაზე. მსგავსი აგებულება აქვს გერმანიუმის კრისტალსაც.

**ელექტრონული გამტარობა.** სილიციუმის გახურებისას სავალენტო ელექტრონის კინეტიკური ენერგია მატულობს და ცალკეული კავშირები ირღვევა. ზოგიერთი ელექტრონი ტოვებს თავის „გათელილ გზას“ და ხდება თავისუფალი — ლითონის ელექტრონების მსგავსად. ელექტრულ ველში ისინი გადაადგილდებიან მესრის კვანძებს შორის და ქმნიან ელექტრულ დენს (სურ. 180).

ნახევარგამტარის გამტარობას, რომელიც განპირობებულია მასში თავისუფალი ელექტრონების არსებობით, ელექტრონული გამტარობა ეწოდება. ტემპერატურის ზრდასთან ერთად იზრდება გაწყვეტილ კავშირთა და, მაშასადამე, თავისუფალ ელექტრონთა რაოდენობაც.

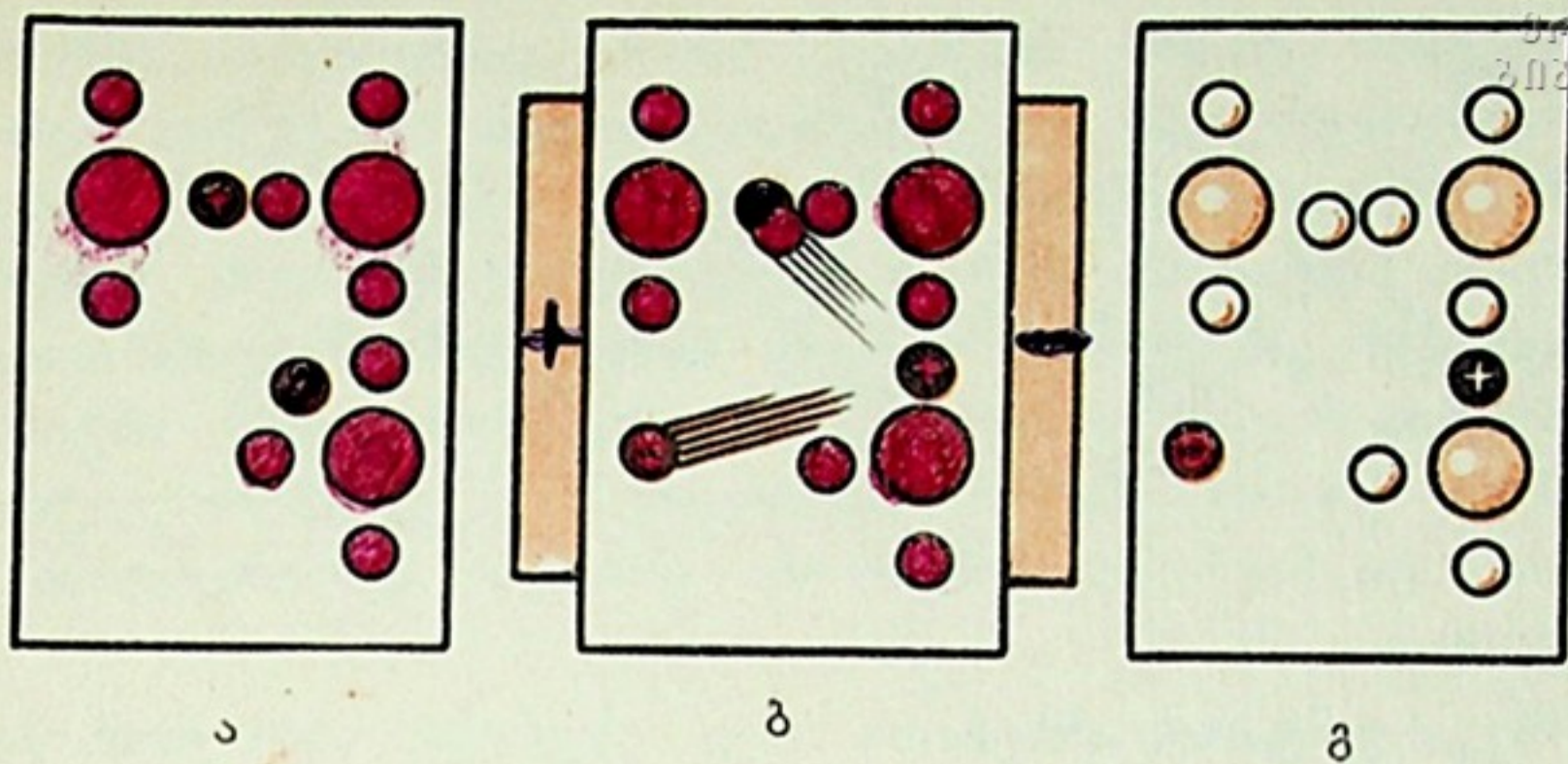
300-დან 700 K-მდე გათბობის დროს მუხტის თავისუფალ გადამტანთა რიცხვი იზრდება  $10^{17}$  1/მ<sup>3</sup>-დან  $10^{24}$  1/მ<sup>3</sup>-მდე.

ეს ამცირებს წინაღობას.

**ხვრელური გამტარობა.** კავშირის გაწყვეტისას იქმნება ვაკანტური ადგილი, რომელსაც აკლია ელექტრონი. მას ხვრელი ეწოდება. ხვრელში არის ქარბი დადებითი მუხტი დანარჩენ, ნორმალურ კავშირებთან შედარებით (სურ. 180).

კრისტალში ხვრელის მდებარეობა უცვლელი როდია. უწყვეტად მიმდინარეობს შემდეგი პროცესი. შექმნილი ხვრელის ადგილს იკავებს ერთ-ერთი იმ ელექტრონიდან, რომლებიც ატომებს აკავშირებდა და აღადგენს აქ წყვილელექტრონულ კავშირს. იმ ადგილას, საიდან „გადმოხტა“ ელექტრონი, იქმნება ახალი ხვრელი. ამრიგად, ხვრელი გადაადგილდება მთელ კრისტალში.





სურ. 181. ელექტრონული და ხვრელური გამტარობის მექანიზმი: ველის არარსებობისას არის ერთი თავისუფალი ელექტრონი (-) და ერთი ხვრელი (+) (ა). ველის ზედდებისას ხდება ელექტრონთა გადაადგილება. თავისუფალი ელექტრონი გადაადგილდება ველის დაძაბულობის საპირისპიროდ. ამავე მიმართულებით გადაადგილდება ერთი ბმული ელექტრონთაგანი (ბ); ისე გამოდის თითქოსდა ხვრელი გადაადგილდება ველის მიმართულებით (გ).

თუ ელექტრული ველის დაძაბულობა საცდელ ნიმუშში ნულის ტოლია, მაშინ ხვრელების გადაადგილება, რაც დადებითი მუხტების გადაადგილების ტოლფასია, ქაოსურია და ამიტომ ელექტრულ დენს ვერ ქმნის. მაგრამ თუ საცდელ ნიმუშში ელექტრული ველი არსებობს, მაშინ ხვრელები მოწესრიგებულად გადაადგილდება და, ამგვარად, თავისუფალი ელექტრონების ელექტრულ დენს დაემატება ხვრელების მოწესრიგებული მოძრაობით შექმნილი ელექტრული დენი. ხვრელების მოძრაობის მიმართულება ელექტრონთა მოძრაობის მიმართულების საპირისპიროა. ელექტრონული და ხვრელური გამტარობის მექანიზმი ვანმარტებულია **181-ე სურათზე**.

ამრიგად, ნახევარგამტარში არის მუხტის ორი ტიპის გადამტანი: ელექტრონი და ხვრელი. ამიტომ ნახევარგამტარს ახასიათებს არამარტო ელექტრონული, არამედ ხვრელური გამტარობაც.

ჩვენ განვიხილეთ იდეალურ ნახევარგამტართა გამტარობის მექანიზმი. გამტარობას ამ შემთხვევაში ნახევარგამტართა საკუთარი გამტარობა ეწოდება.

### 78 ნახევარგამტარის ელექტრული გამტარობა მინარევის არსებობის დროს

ნახევარგამტარის საკუთარი გამტარობა ჩვეულებრივ დიდი არაა, რადგან მასში თავისუფალი ელექტრონები ცოტაა. მაგალითად, გერმანიუმში ოთახის ტემპერატურაზე  $n_e = 3 \cdot 10^{13} \text{ სმ}^{-3}$ . ამავე დროს

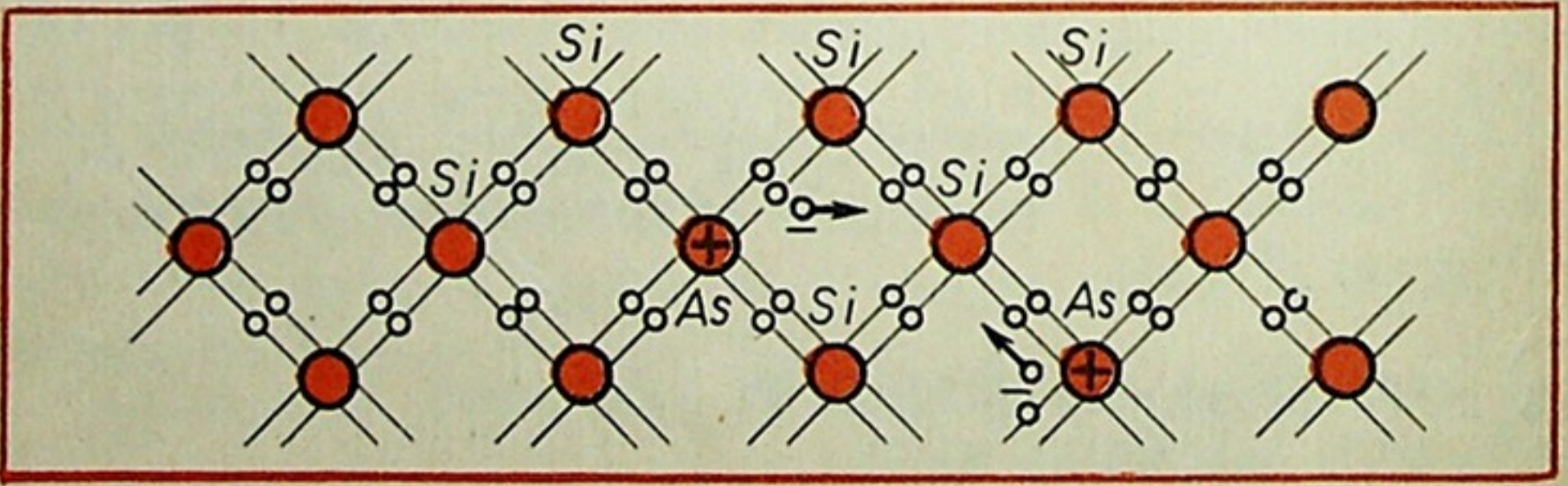




გერმანიუმის ატომთა რიცხვი  $1 \text{ სმ}^3$ -ში დაახლოებით  $10^{23}$  რიცხვსა. ასე, რომ თავისუფალ ელექტრონთა რაოდენობა ატომთა საერთო რაოდენობის დაახლოებით მეათმილიარდედი ნაწილია. ნახევარგამტარის საკუთარი გამტარობა ძალიან ჰგავს ელექტროლიტის წყალხსნარის ან ნაღნობის გამტარობას. ორივე შემთხვევაში მუხტის თავისუფალ გადამტანთა რიცხვი იზრდება სითბური მოძრაობის ინტენსივობის ზრდასთან ერთად. ამიტომ ნახევარგამტარის, ელექტროლიტის წყალხსნარისა და ნაღნობის გამტარობა იზრდება ტემპერატურის ზრდასთან ერთად.

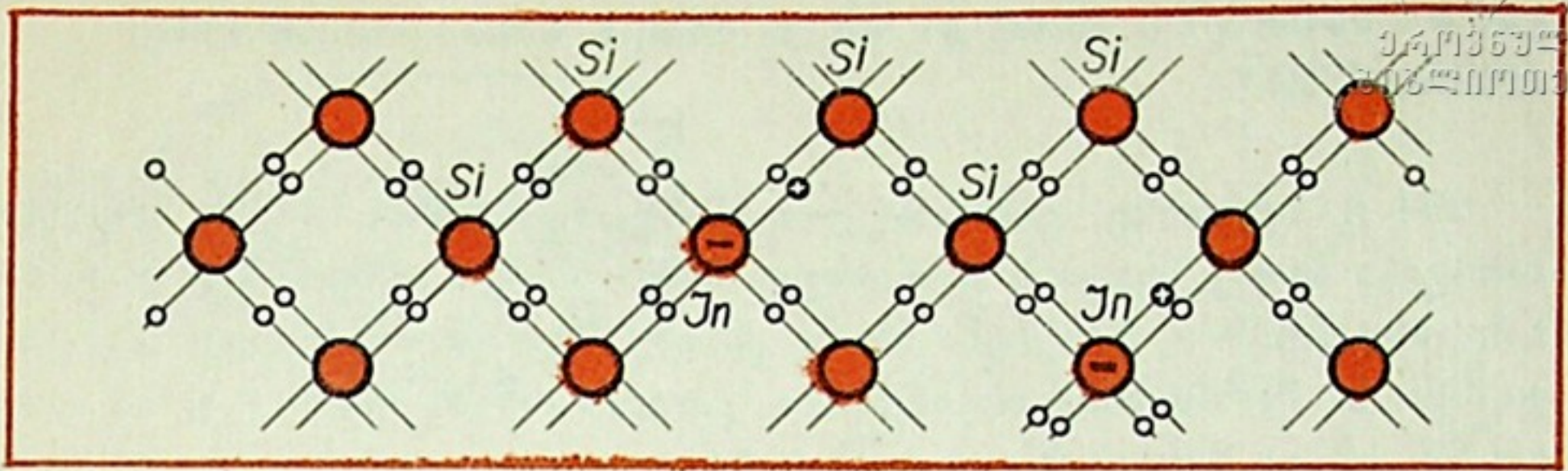
ნახევარგამტარის არსებითი თავისებურება ისაა, რომ მასში მინარევების არსებობისას საკუთარ გამტარობასთან ერთად იქმნება დამატებითი — მინარევი ელექტრონთა გამტარობა. მინარევის კონცენტრაციის შეცვლით შეიძლება საგრძნობლად ვცვალოთ ამა თუ იმ ნიშნის მუხტის გადამტანთა რაოდენობა. ამის შედეგად შეიძლება დავამზადოთ ნახევარგამტარი, რომელშიც გვექნება უარყოფითი ან დადებითი მუხტის გადამტანების უპირატესი კონცენტრაცია. ნახევარგამტარის სწორედ ეს თავისებურება ქმნის მისი პრაქტიკული გამოყენების ფართო შესაძლებლობას.

**დონორული მინარევი.** გამოიკვამ, რომ, თუ ნახევარგამტარში არის მინარევი, მაგალითად, დარიშხანის ატომები (ძალიან მცირე კონცენტრაციის დროსაც კი), მაშინ მასში თავისუფალი ელექტრონების რიცხვი მეტისმეტად იზრდება. ეს ხდება შემდეგი მიზეზის გამო. დარიშხანის ატომს აქვს ხუთი სავალენტო ელექტრონი. ოთხი მათგანი მონაწილეობს მოცემული ატომის გარემომცველ ატომებთან, მაგალითად, სილიციუმის ატომებთან, კოვალენტურ კავშირში. მეხუთე სავალენტო ელექტრონი სუსტად არის დაკავშირებული ატომთან. ის ადვილად ტოვებს დარიშხანის ატომს და ხდება თავისუფალი (სურ. 182).



სურ. 182.





სურ. 183.

თუ დამატებული დარიშხანის ატომების რიცხვი ერთი მეათმილიონედი ნაწილი იქნება სილიციუმის ატომების რიცხვისა, მაშინ თავისუფალი ელექტრონების კონცენტრაცია ტოლი გახდება  $10^{16} \text{სმ}^{-3}$ -სა. ეს ათასჯერ მეტია სუფთა ნახევარგამტარის თავისუფალი ელექტრონების კონცენტრაციაზე.

✓ **ღ**იმ მინარევს, რომელიც ადვილად გასცემს ელექტრონებს და, მაშასადამე, ზრდის თავისუფალი ელექტრონების რიცხვს, დონორული (გამცემი) მინარევი ეწოდება. **ღ**

✓ **ღ**რადგან დონორული მინარევის შემცველ ნახევარგამტარში თავისუფალი ელექტრონები გაცილებით მეტია, ვიდრე ხვრელები, მას *n*-ტიპის (სიტყვიდან negativ—უარყოფითი) ნახევარგამტარს უწოდებენ. *n*-ტიპის ნახევარგამტარში ელექტრონები მუხტის ძირითადი გადამტანებია, ხვრელები კი — არაძირითადი. **ღ**

**აქცეპტორული მინარევი.** **ღ**თუ მინარევად ინდიუმს გამოვიყენებთ, რომლის ატომი სამვალენტიანია, ნახევარგამტარის გამტარობის ხასიათი შეიცვლება. ამ შემთხვევაში მეზობლებთან ნორმალური წყვილ-ელექტრონული კავშირების შესაქმნელად ინდიუმის ატომს აკლია ერთი ელექტრონი. ამის შედეგად იქმნება ხვრელი. ხვრელების რიცხვი კრისტალში ტოლი იქნება მინარევის ატომთა რიცხვისა (სურ. 183). **ღ**

**ღ**ამგვარ მინარევს აქცეპტორული (მიმღები) მინარევი ეწოდება. **ღ**

ელექტრულ ველში ხვრელები გადაადგილდება ველის მიმართულებით და, ამრიგად, იქმნება ხვრელური გამტარობა. **ღ**ნახევარგამტარს, რომლის ხვრელური გამტარობა მეტია ელექტრონულთან შედარებით, *p*-ტიპის (სიტყვისაგან positiv — დადებითი) ნახევარგამტარი ეწოდება. **ღ***p*-ტიპის ნახევარგამტარში ხვრელები მუხტის ძირითადი გადამტანებია, ელექტრონები კი — არაძირითადი. **ღ**

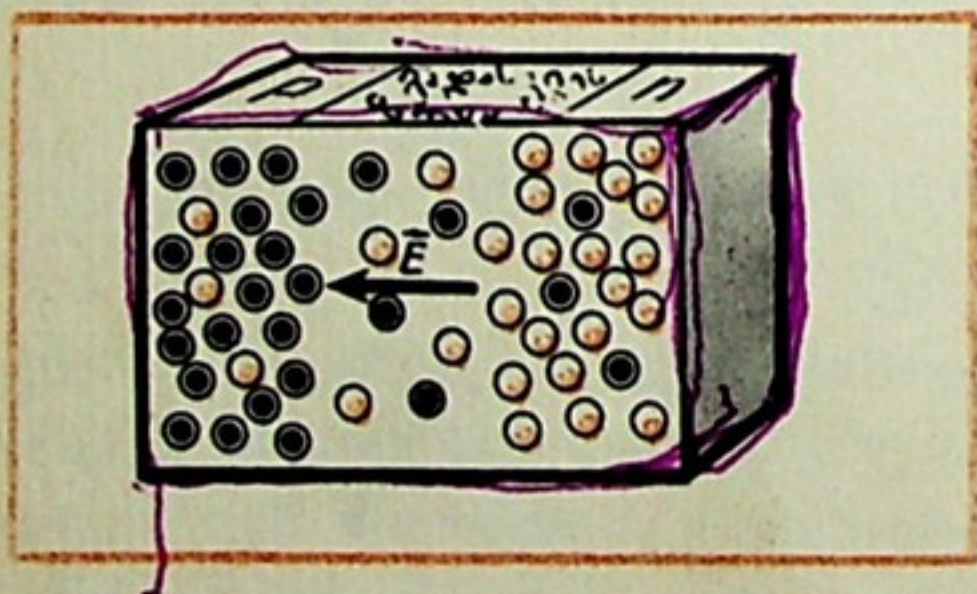


184-ე სურათზე გამოსახულია ნახევარგამტარის სქემა, რომლის მარჯვენა მხარე შეიცავს დონორულ მინარევს და ამიტომ იგი  $n$ -ტიპის ნახევარგამტარია, მარცხენა მხარე კი აქცეპტორულ მინარევს შეიცავს და იგი  $p$ - ტიპის ნახევარგამტარია. ელექტრონები გამოსახულია თეთრი წრეებით, ხვრელები კი — შავით. სხვადასხვა ტიპის ორი ნახევარგამტარის კონტაქტს  $p-n$  გადასვლა ეწოდება.

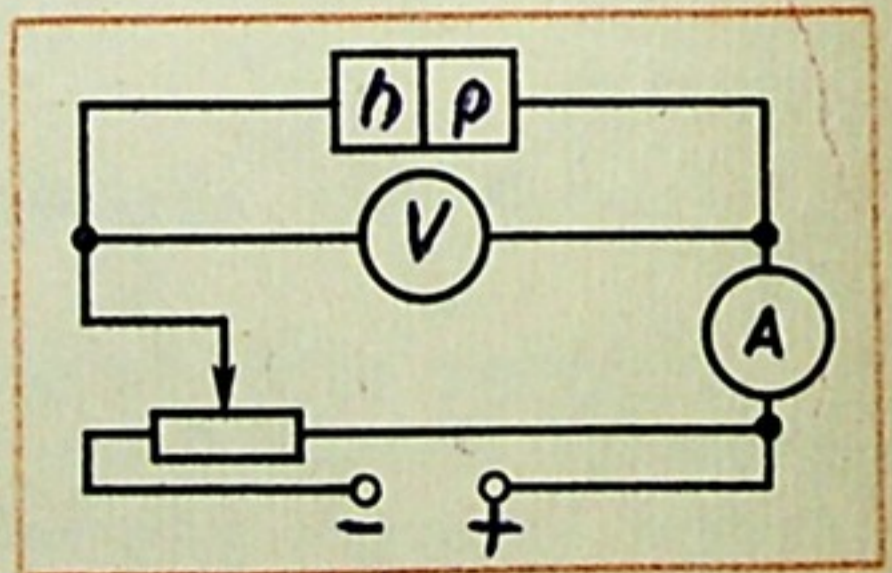
კონტაქტის წარმოქმნისას ელექტრონები ნაწილობრივ  $n$ -ტიპის ნახევარგამტარიდან  $p$ -ტიპის ნახევარგამტარში გადადიან, ხვრელები კი საპირისპიროდ მოძრაობს. ხდება დიფუზია, რაც მოგვარებს ასეთივე მოვლენას აირში: ორი სხვადასხვა აირის ურთიერთშეხებისას სითბური მოძრაობის გამო მათი მოლეკულების ერთმანეთში შერევის. ამის შედეგად  $n$ -ტიპის ნახევარგამტარი იმუხტება დადებითად,  $p$ -ტიპისა კი — უარყოფითად. დიფუზია წყდება მას შემდეგ, რაც გადასვლის ზონაში აღძრული ველი ხელს უშლის ელექტრონებისა და ხვრელების შემდგომ გადაადგილებას.

ჩავრთოთ  $p-n$  გადასვლის მქონე ნახევარგამტარი ელექტრულ წრედში (სურ. 185) ისე, რომ  $p$ -ტიპის ნახევარგამტარის პოტენციალი დადებითი იყოს,  $n$ -ტიპისა კი — უარყოფითი. ამ დროს  $p-n$  გადასვლა განხორციელდება ძირითადი გადამტანებით:  $n$  უბნიდან  $p$  უბანში ელექტრონებით, ხოლო  $p$ -დან  $n$ -ში ხვრელებით (სურ. 186). ამის გამო მთელი ნიმუშის გამტარობა იქნება დიდი, წინააღობა კი — მცირე.

აქ განხილულ გადასვლას პირდაპირი გადასვლა ეწოდება. დენის ძალის დამოკიდებულება პოტენციალთა სხვაობაზე — ვოლტამპერული მახასიათებელი — პირდაპირი გადასვლისათვის გამოსახულია 187-ე სურათზე უწყვეტი წიხით.

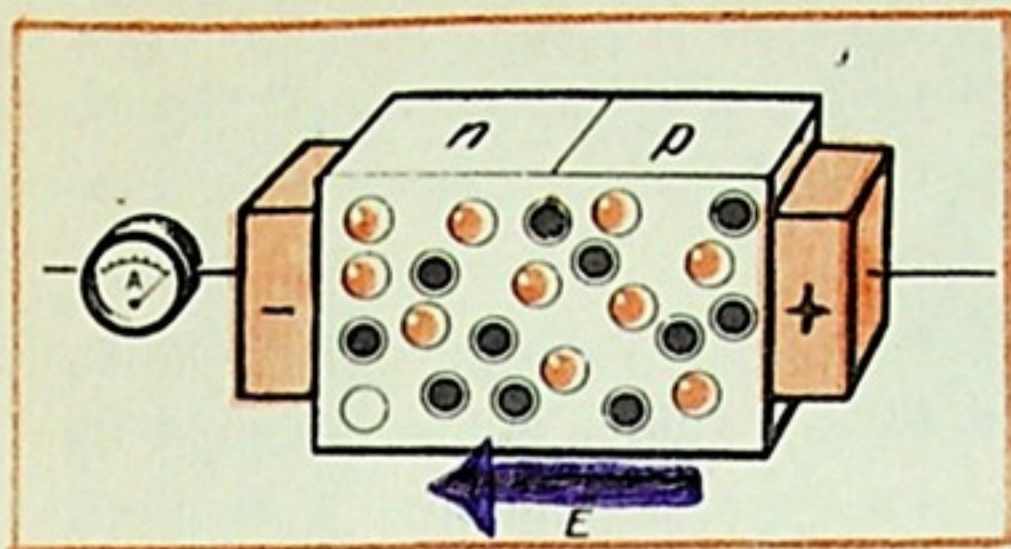


სურ. 184.

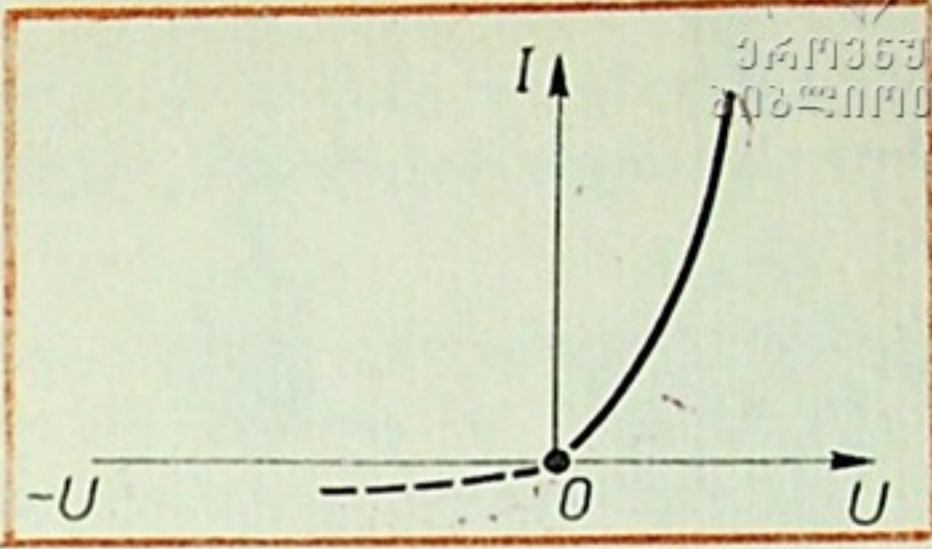


სურ. 185.



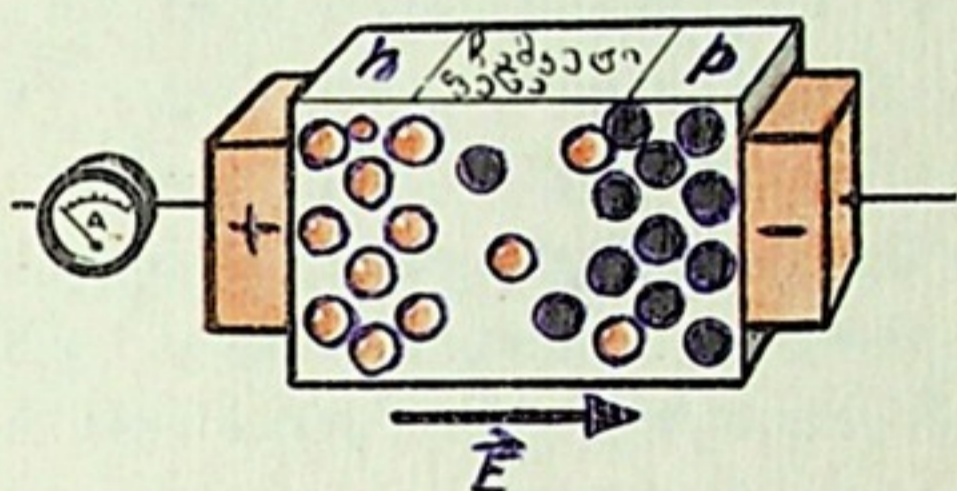


სურ. 186.



სურ. 187.

გადავრთოთ ბატარეის პოლუსები. ჯმაშინ იმავე პოტენციალთა სხვაობისას დენის ძალა წრედში საგრძნობლად ნაკლები აღმოჩნდება, ვიდრე პირდაპირი გადასვლის დროს იყო. ეს განპირობებულია შემდეგით: ელექტრონები კონტაქტზე ახლა გადის  $p$  უბნიდან  $n$  უბანში, ხვრელები კი —  $n$ -დან  $p$ -ში. ჯმაგრამ  $p$ -ტიპის ნახევარ-



სურ. 188.

გამტარში ცოტაა თავისუფალი ელექტრონი,  $n$ -ტიპისაში კი ცოტაა ხვრელები. ახლა კონტაქტზე გადასვლა ხორციელდება არაძირითადი გადამტანებით, რომელთა რიცხვი მცირეა (სურ. 188). ამის გამოტანი-მუშის გამტარობა იქნება უმნიშვნელო, წინაღობა კი — დიდი. იქმნება ე.წ. ჩამკეტი შრე. ამ გადასვლას შექცეული გადასვლა ეწოდება. მისი ვოლტამპერული მახასიათებელი გამოსახულია 187-ე სურათზე პუნქტირწირით.

ამრიგად  $p-n$  გადასვლა დენის მიმართ არასიმეტრიულია: პირდაპირი მიმართულებით წინაღობა საგრძნობლად ნაკლებია, ვიდრე შექცეული მიმართულებით.  $p-n$  გადასვლის ეს თვისება გამოყენებულია ცვლადი დენის გამართვისათვის. ნახევარპერიოდის განმავლობაში, როცა  $p$ -ტიპის ნახევარგამტარის პოტენციალი დადებითია, დენი თავისუფლად გადის  $p-n$  გადასვლაზე. პერიოდის შემდეგ ნახევარში დენი პრაქტიკულად ნულის ტოლია.

80. ნახევარგამტარული დიოდი.

ელექტრული დენის გასამართავად, ჯორელექტროდიან ელექტრონი-მილაკებთან ერთად, ტრადიოსქემებში ამჟამად სულ უფრო მეტად იყენებენ ნახევარგამტარულ დიოდებს. მათ ბევრი უპირატესობა აქვთ.



სელექტრონ-მილაკში მუხტის გადამტანები — ელექტრონები თერ-  
მოელექტრონული ემისიის შედეგად წარმოიქმნება. კათოდის დადებით  
გახურებისათვის საჭიროა ელექტრული ენერგიის სპეციალური წყა-  
რო.

$p-n$  გადასვლაზე მუხტის გადამტანები შეიქმნება კრისტალში  
აქცეპტორული ან დონორული მინარევის შეტანით. ჯამრიგად, აქ  
მუხტის თავისუფალი გადამტანების მისაღებად საჭირო არ არის  
ენერგიის წყარო. რთულ სქემებში ამ გზით დაზოგილი ენერგიის რა-  
ოდენობა ფრიად მნიშვნელოვანია.

გამართული დენის ერთი და იმავე მნიშვნელობის მისაღებად სა-  
ჭირო ნახევარგამტარული გამმართველი უფრო მინიატურულია, ვიდ-  
რე ელექტრონ-მილაკები. ამიტომ ნახევარგამტარებით აწყობილი რა-  
დიომიმლები უფრო კომპაქტურია.

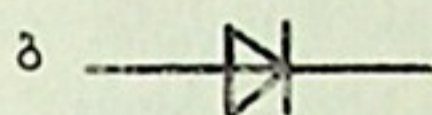
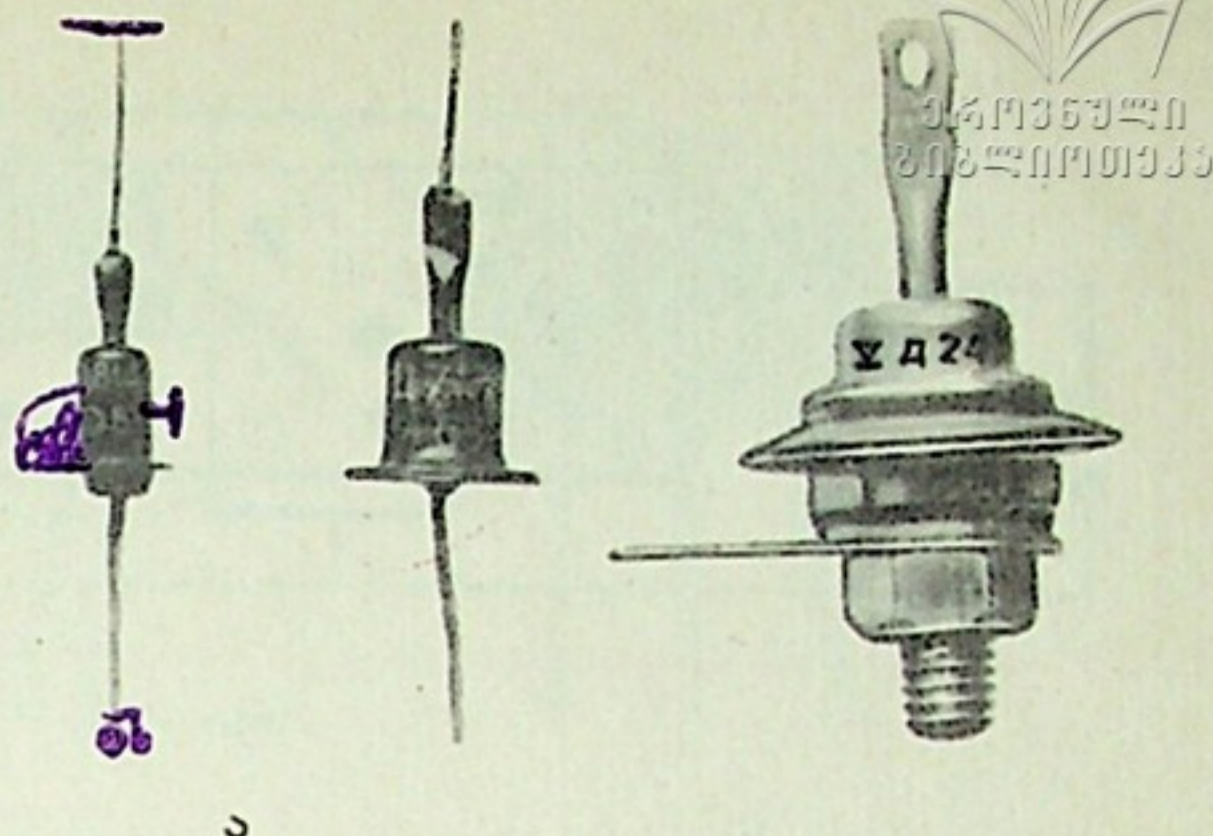
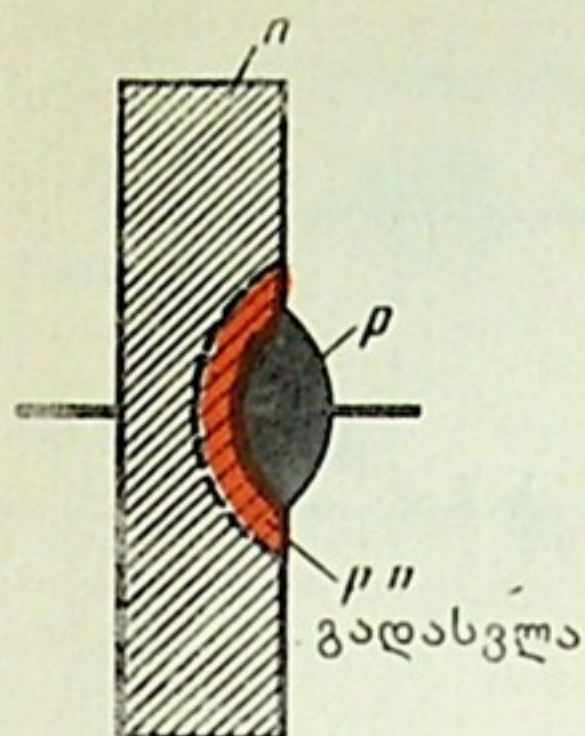
ნახევარგამტარული ელემენტების აღნიშნული უპირატესობა გან-  
საკუთრებით არსებითია მათი გამოყენებისას დედამიწის ხელოვ-  
ნურ თანამგზავრებში, კოსმოსურ ხომალდებში, ელექტრონულ-გამო-  
მთვლელ მანქანებში.

ნახევარგამტარულ დიოდებს ამზადებენ გერმანიუმის, სილიცი-  
უმის, სელენისა და სხვა ნივთიერებებისაგან. ]

განვიხილოთ, თუ როგორ იქმნება  $p-n$  გადასვლა გერმანიუმის  
დიოდში, რომელსაც  $n$ -ტიპის გამტარობა ახასიათებს მონორული მი-  
ნარევის მცირე რაოდენობით დამატებისას. ამ გადასვლის მიღება არ  
ხერხდება სხვადასხვა ტიპის გამტარობის ორი ნახევარგამტარის მე-  
ქანიკური შეერთებით. ამ დროს ნახევარგამტარებს შორის ვდებუ-  
ლობთ ძალიან დიდ ღრეჩოს.  $p-n$  გადასვლის სისქე კი, არ უნდა  
აღემატებოდეს ატომთა შორის მანძილს. ამიტომ ნიმუშის ერთ-ერთ  
ზედაპირში შეადნობენ ინდიუმს. ინდიუმის ატომების დიფუზიის შე-  
დეგად გერმანიუმის მონოკრისტალში გერმანიუმის ზედაპირთან შეიქმ-  
ნება  $p$ -ტიპის გამტარობის უბანი. გერმანიუმის ნიმუშის დანარჩენ  
ნაწილს, რომელშიც ინდიუმის ატომებმა ვერ შეაღწიეს, წინანდებუ-  
რად  $n$ -ტიპის გამტარობა ექნება. ამ უბანს შორის, რომლებსაც სხვა-  
დასხვა ტიპის გამტარობა აქვს, შეიქმნება  $p-n$  გადასვლა (სურ. 189).  
ნახევარგამტარულ დიოდში გერმანიუმი კათოღია, ინდიუმი კი —  
ანოდი. ]

ჰაერისა და სინათლის მავნე გავლენის თავიდან აცილების მიზნით  
გერმანიუმის კრისტალს ათავსებენ ლითონის ჰერმეტიკულ კორპუსში  
(სურ. 190). დიოდის სქემატური გამოსახულება მოცემულია 190-ე, ბ  
სურათზე.





სურ. 189.

სურ. 190.

ნახევარგამტარულ გამმართველს აქვს მაღალი საიმედოობა და ვარგისიანობის დიდი ვადა. მაგრამ ისინი მუშაობენ მხოლოდ შემოსაზღვრულ ტემპერატურულ შუალედში (დაახლოებით — 70-დან 125°C-მდე).

### 81. ტრანზისტორი

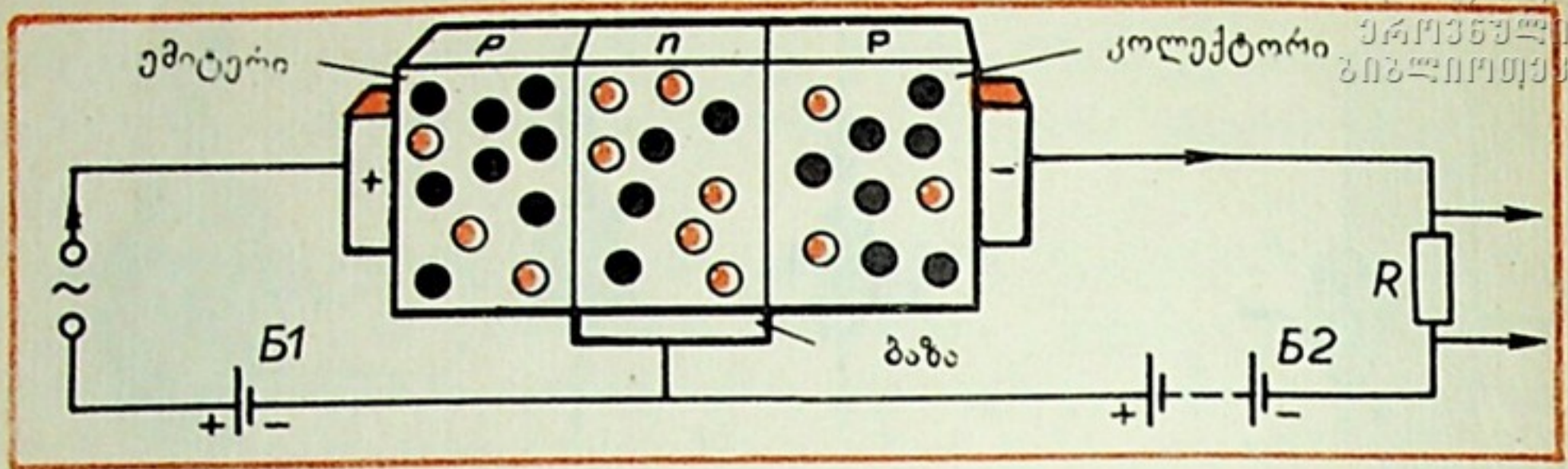
ნახევარგამტარში  $p-n$  გადასვლის თვისებები გამოყენებულია ელექტრული რხევების გაძლიერებისა და გენერაციისათვის. ამჟამად უმთავრესად გამოყენებულია მოწყობილობა, რომელსაც ნახევარგამტარული ტრიოდი ანუ ტრანზისტორი<sup>1</sup> ეწოდება.

განვიხილოთ ერთ-ერთი სახის ტრანზისტორი გერმანიუმისა ან სილიციუმისა, რომლებშიც შეტანილია დონორული და აქცეპტორული მინარევეები. მინარევის განაწილება ისეთია, რომ  $p$ -ტიპის ნახევარგამტარის ორ შრეს შორის იქმნება ძალიან თხელი (რამდენიმე მიკრომეტრის რიგის)  $n$ -ტიპის ნახევარგამტარული შუა შრე (სურ. 191); ამ თხელ შუა შრეს ფუნქციონირება ანუ ბაზას უწოდებენ.

კრისტალში იქმნება ორი  $p-n$  გადასვლა, რომელთა პირდაპირი მიმართულებანი საპირისპიროა. სამი გამომყვანი, სხვადასხვა ტიპის გამტარობის უბნებიდან, საშუალებას იძლევა ტრანზისტორი ჩავროთოთ 191-ე სურათზე გამოსახულ სქემაში. ამ ჩართვისას მარცხენა  $p-n$  გადასვლა პირდაპირია და ბაზას გამოყოფს  $p$ -ტიპის გამტარობის უბნიდან, რომელსაც ემიტერს უწოდებენ. რომ არ ყო-

<sup>1</sup> ინგლისური სიტყვებისაგან „transfer“ — გადატანა, „resistor“ — წინაღობა.





სურ. 191.

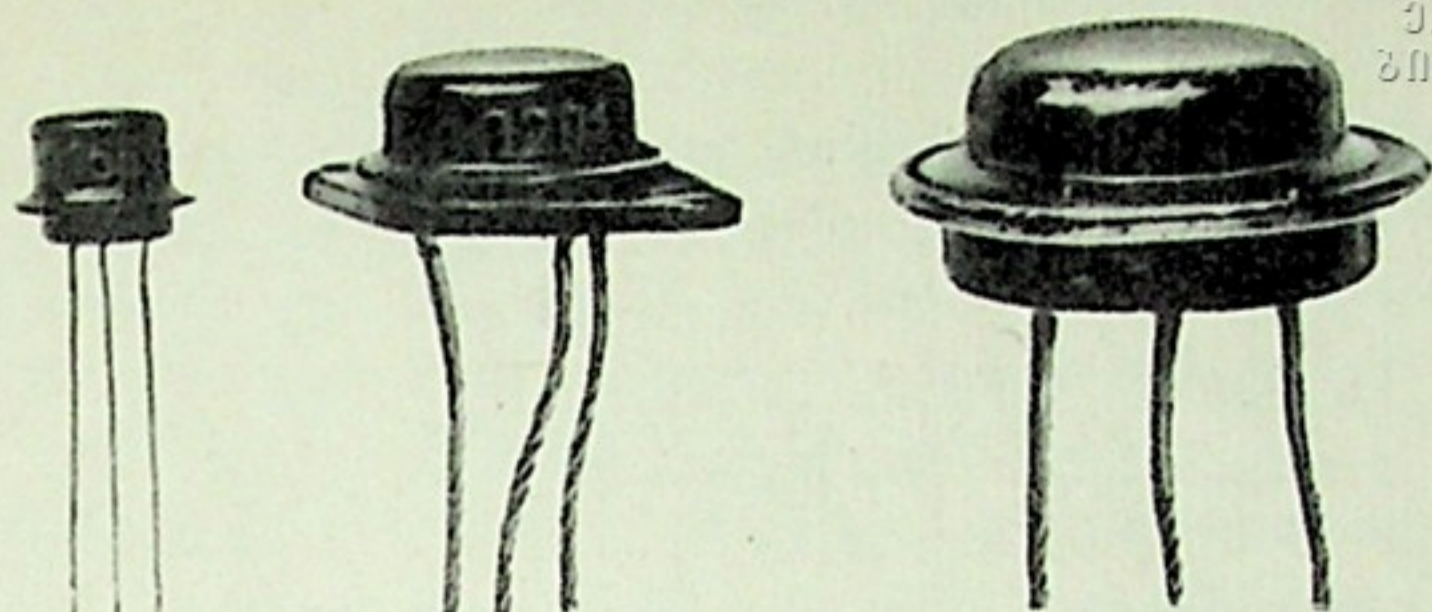
ფილიყო მარჯვენა  $p-n$  გადასვლა, წრედში „ემიტერი-ბაზა“ იარსებებდა დენი, რომელიც დამოკიდებული იქნებოდა წყაროების (1 ბატარეის და ცვლადი ძაბვის წყაროს) ძაბვაზე და წრედის წინალობაზე („ემიტერ-ბაზა“ პირდაპირი გადასვლის მცირე წინალობის ჩათვლით).

2 ბატარეა ისეა ჩართული, რომ მარჯვენა  $p-n$  გადასვლა სქემაში (სურ. 191) შექცეულია. ის ბაზას გამოყოფს  $p$ -ტიპის გამტარობის მარჯვენა უბნიდან, რომელსაც კოლექტორი ეწოდება. რომ არ ყოფილიყო მარჯვენა  $p-n$  გადასვლა, მაშინ დენის ძალა კოლექტორის წრედში ნულთან ახლოს იქნებოდა (შექცეული გადასვლის წინალობა ძალიან დიდია). მარჯვენა  $p-n$  გადასვლაში დენის არსებობისას კი დენი აღმოჩნდება კოლექტორის წრედშიც, ამასთან ამ დენის ძალა ოდნავ ნაკლები იქნება ემიტერში გამავალ დენის ძალაზე<sup>1</sup>.

ეს შემდეგნაირად შეიძლება აიხსნას. როცა იქმნება ძაბვა ემიტერსა და ბაზას შორის,  $p$ -ტიპის ნახევარგამტარის მუხტის ძირითადი გადამტანები — ხვრელები — შეაღწევენ ბაზაში, სადაც ისინი უკვე არაძირითადი გადამტანებია. რადგან ბაზის სისქე ძალიან მცირეა და ძირითად გადამტანთა (ელექტრონთა) რიცხვი აქ დიდი არ არის, მასში მოხვედრილი ხვრელები თითქმის არ რეკომბინირებენ ბაზის ელექტრონებთან და კოლექტორში შეაღწევენ დიფუზიის გამო. მარჯვენა  $p-n$  გადასვლა დაკეტილია ბაზის მუხტის ძირითადი გადამტანებისათვის — ელექტრონებისათვის, მაგრამ არა ხვრელებისათვის. კოლექტორში ხვრელები წარიტაცება ელექტრული ველით და წრედი შეიკვრება. ბაზიდან ემიტერის წრედში განშტოებული დენის ძალა ძალიან მცირეა, რადგან ბაზის კვეთის ფართობი ჰორიზონტალურ (191-ე სურათის მიხედვით) სიბრტყეში ბევრად ნაკლებია, ვიდრე ვერტიკალურ სიბრტყეში.

<sup>1</sup> თუ ემიტერზე მოდებულია უარყოფითი ძაბვა, მაშინ მარჯვენა  $p-n$  გადასვლა იქნება შებრუნებული და დენი ემიტერისა და კოლექტორის წრედებში პრაქტიკულად აღარ იარსებებს.





სურ. 192

დენის ძალა კოლექტორში (პრაქტიკულად იგივეა, რაც ემიტერში) იცვლება ემიტერში გამავალ დენთან ერთად.  $R$  რეზისტორის წინაღობა მცირე გავლენას ახდენს კოლექტორის დენის ძალაზე და ეს წინაღობა საკმაოდ დიდი შეიძლება გავხადოთ. თუ ვმართავთ ემიტერის დენს ცვლადი ძაბვის წყაროს საშუალებით, რომელიც მის წრედშია ჩართული, მივიღებთ ძაბვის სინქრონულ ცვლილებას  $R$  რეზისტორზე. რეზისტორის დიდი წინაღობის დროს მასზე ძაბვის ცვლილება შეიძლება ათეულ ათასჯერ მეტი იყოს სიგნალის ძაბვის ცვლილებაზე ემიტერის წრედში. ეს ნიშნავს ძაბვის გაძლიერებას. ამავე დროს  $R$  დატვირთვაში გამოყოფილი სიმძლავრეც საგრძნობლად მეტი იქნება სიმძლავრეზე, რომელიც ემიტერის წრედში იხარჯება. გაძლიერება ხდება სიმძლავრის მიხედვითაც.

**ტრანზისტორის გამოყენება.** ტრანზისტორი (სურ. 192) ფართოდ გამოიყენება თანამედროვე ტექნიკაში. იგი ცვლის ელექტრონულ მილაკს სამეცნიერო, სამრეწველო და საყოფაცხოვრებო აპარატურის ბევრ ელექტრულ წრედში. პორტატულ რადიომიმღებს, რომელშიც ეს ხელსაწყოებია გამოყენებული, ჩვეულებრივ, „ტრანზისტორს“ უწოდებენ.

ტრანზისტორის უპირატესობა ელექტრონულ მილაკთან შედარებით, ისევე როგორც ნახევარგამტარული დიოდისა, პირველ ყოვლისა ისაა, რომ მასში არ არის გახურებული კათოდი, რომელიც მოითხოვს მნიშვნელოვან სიმძლავრეს და საჭიროებს დროს გახურებისათვის. გარდა ამისა, ეს ხელსაწყო გაცილებით პატარაა და მსუბუქიც ელექტრონულ მილაკზე. იგი უფრო დაბალ ძაბვაზე მუშაობს.

ტრანზისტორის ნაკლი იგივეა, რაც ნახევარგამტარული დიოდისა. იგი ძალიან გრძნობიერია ტემპერატურის აწევის, ელექტრული გადატვირთვისა და ძლიერ გამჭოლი გამოსხივებისადმი.



## 82. თერმისტორი და ფოტორეზისტორი

**თერმისტორი.** ნახევარგამტარის ელექტრული წინაღობა საგრძნობლად დაამოკიდებული ტემპერატურაზე. ეს თვისება საშუალებას იძლევა ტემპერატურა გაიზომოს იმის მიხედვით, თუ როგორია დენის ძალა ნახევარგამტარის შემცველ წრედში. ასეთ ხელსაწყოებს თერმისტორი ანუ თერმორეზისტორი ეწოდება.

თერმისტორი ერთ-ერთი ყველაზე მარტივი ნახევარგამტარული ხელსაწყოა. თერმისტორს ამზადებენ რამდენიმე მიკრომეტრიდან რამდენიმე სანტიმეტრამდე ზომის ღეროს, მილის, დისკოს, საყელურის ან მძივის მარცვლის სახით (სურ. 193).

თერმისტორთა უმრავლესობისათვის გასაზომი ტემპერატურის დიაპაზონი მოქცეულია 170-დან 570 K-მდე შუალედში. მაგრამ არსებობს თერმისტორი, როგორც ძალიან მაღალი ( $\approx 1300$  K), ისე ძალიან დაბალი ( $\approx 4 - 80$  K) ტემპერატურის გასაზომად.

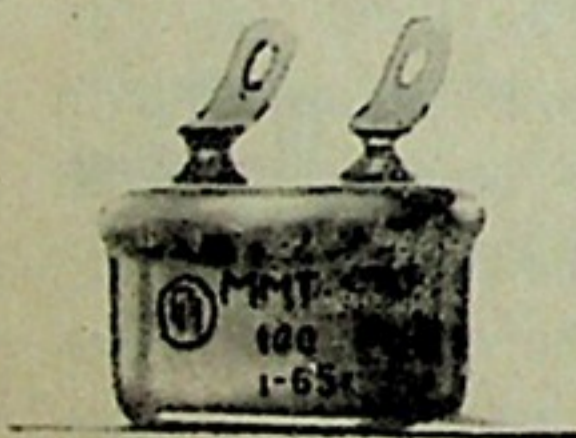
თერმისტორს იყენებენ ტემპერატურის დისტანციური გაზომვისათვის, ხანძარსაწინააღმდეგო სიგნალიზაციისათვის და ა. შ.

**ფოტორეზისტორი.** ნახევარგამტართა ელექტრული გამტარობა მატულობს არა მარტო გათბობით, არამედ განათებითაც.

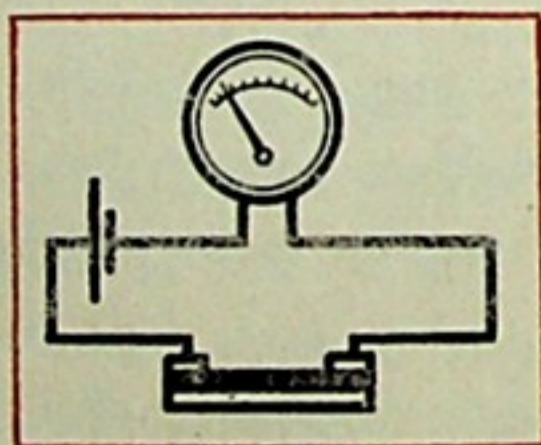
ამაში შეიძლება დავრწმუნდეთ დანადგარის საშუალებით. რომლის სქემა გამოსახულია 194-ე სურათზე. შევამჩნევთ, რომ ნახევარგამტარის განათებისას (სურ. 195) დენი წრედში საგრძნობლად იზრდება. ეს გვიჩვენებს, რომ სინათლის გავლენით ნახევარგამტარის გამტარობა იზრდება (წინაღობა კლებულობს). ეს ეფექტი გათბობასთან არაა დაკავშირებული, რადგან შეინიშნება უცვლელი ტემპერატურის დროსაც.

ელექტრული გამტარობა მატულობს იმის გამო, რომ ნახევარგამტარზე დაცემული სინათლის ენერჯის ხარჯზე ირღვევა კავშირები და იქმნება თავისუფალი ელექტრონები და ხვრელები. ამ მოვლენას ფოტოელექტრულ ეფექტს უწოდებენ.

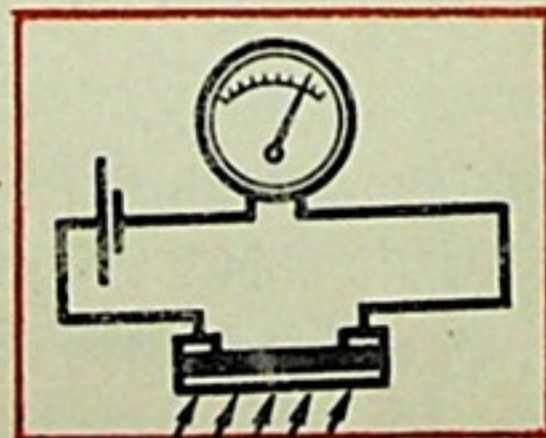
ხელსაწყოს, რომელშიც გამოყენებულია ნახევარგამტარში მომხდარი ფოტოელექტრული ეფექტი, ფოტორეზისტორს ან ფოტოწინაღობას უწოდებენ. მინიატურულობისა და მაღალი



სურ. 193.



სურ. 194.



სურ. 195.





მგრძობიარობის გამო ფოტორეზისტორი გამოყენებულია მეცნიერებისა და ტექნიკის მრავალ დარგში სინათლის სუსტ ნაკადთა რეგისტრაციისა და გაზომვისათვის. ფოტორეზისტორის საშუალებით საზღვრავენ ზედაპირის ხარისხს, აკონტროლებენ ნაკეთობათა ზომებს და სხვ.

- 9
1. რით განსხვავდება ნახევარგამტარისა და ლითონის წინაღობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე? 2. მუხტის რა მოძრაობა გადამტანება სუფთა ნახევარგამტარში? 3. რა მოხდება ელექტრონისა და ხვრელის შეხვედრისას? 4. რატომაა ასე ძალიან დამოკიდებული ნახევარგამტარის წინაღობა მინარევის არსებობაზე? 5. როგორი მინარევი — დონორული და აქცეპტორული — უნდა შევიტანოთ, რომ მივიღოთ  $n$ -ტიპის ნახევარგამტარი? 6. დაასახელოთ მუხტის ძირითადი და არაძირითადი გადამტანები აქცეპტორული მინარევის მქონე ნახევარგამტარში. 7. რა უპირატესობები აქვს ნახევარგამტარულ დიოდს ვაკუუმიანთან შედარებით?

### ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები

რაოდენობრივი კანონზომიერებანი ელექტრული დენისათვის ყველაზე მარტივია ლითონებსა და ელექტროლიტებში. ამოცანები :ომის კანონზე, რომელიც ამ გამტარებისათვის სრულდება, წინა თავში იყო მოყვანილი. ამ თავში უპირატესად განიხილება ამოცანები, რომლებშიც გამოყენებულია ელექტროლიზის კანონები.

1.  $R=5$  სმ რადიუსის გამტარი სფერო მოთავსებულია ელექტროლიტურ აბაზანაში, რომელიც ავსებულია შაბიამნის ხსნარით. რამდენით გაიზრდება სფეროს მასა, თუ სპილენძით დაფარვა გრძელდება  $t=30$  წუთს და წამში სფეროს ზედაპირის თითოეულ კვადრატულ სანტიმეტრზე მოსული მუხტი ტოლია  $0,01$  კ-სა? სპილენძის მოლური მასა  $M=0,0635$  კგ/მოლ.

ამოხსნა. გარე ზედაპირის ფართობი  $S=4\pi R^2=314$  სმ<sup>2</sup>. ამიტომ, იონებით გადატანილი მუხტი  $z=30$  წთ  $=1800$  წმ დროში ტოლია  $\Delta q=0,01$  კ/(სმ<sup>2</sup>·წმ)· $314$  სმ<sup>2</sup>· $1800$  წმ  $=5652$  კ. გამოყოფილი სპილენძის მასა ტოლია:

$$m = \frac{M}{neN_A} \Delta q = 2 \cdot 10^{-3} \text{ კგ.}$$

### სავარჯიშო 13

1. ლითონის ნაკეთობის თუთიით დაფარვისათვის ელექტროლიტურ აბაზანაში მოთავსებულია  $m=0,01$  კგ მასის თუთიის ელექტროდი.

რა მუხტი უნდა გავიდეს აბაზანაში, რომ ელექტროდი მთლიანად დაიხარჯოს? თუთიის ელექტროქიმიური ეკვივალენტი  $k=3,4 \cdot 10^{-7}$  კგ/კ.

2. 1,6 ა დენის დროს ელექტროლიტური აბაზანის კათოდზე 10 წუთში დაილექა 0,316 გ სპილენძი. განსაზღვრეთ სპილენძის ელექტროქიმიური ეკვივალენტი.

3. როგორ უნდა განვალაგოთ ელექტროდები, რომ ელექტროლიტური ხერხის გამოყენებით დავფაროთ ლითონის დრუ საგნის შიდა ზედაპირი?



4. დეტალის მონიკელებისას აბაზანაში 25 ა დენი გადიოდა 2 საათის განმავლობაში. ნიკელის ელექტროქიმიური ეკვივალენტია  $3 \cdot 10^{-7}$  კგ/კ, მისი სიმკვრივე —  $8,9 \cdot 10^3$  კგ/მ<sup>3</sup>. რას უდრის ნიკელის ფენის სისქე, თუ დეტალის ფართობია 0,2 მ<sup>2</sup>?

5.  $\vec{E}$  დაძაბულობის ერთგვაროვანი ელექტრული ველი შექმნილია ლითონსა და ვაკუუმში. ერთნაირ მანძილს გაივლის თუ არა ელექტრონი ერთსა და იმავე დროის შუალედში ორივე შემთხვევაში? ელექტრონის საწყისი სიჩქარე ნულის ტოლია.

6. იპოვეთ ელექტრონთა სიჩქარე ელექტრონული სატყორცნიდან გამოსვლის დროს, თუ ანოდსა და კათოდს შორის პოტენციალთა სხვაობა 500 და 5000 ვ.

## მოკლე დასკვნა

ლითონის ელექტროგამტარობა განპირობებულია თავისუფალი ელექტრონებით (ელექტრონული გამტარობა).

ელექტროლიტთა წყალხსნარების ელექტროგამტარობა განპირობებულია დადებითი და უარყოფითი იონებით (იონური გამტარობა).

იონური გამტარობისას დენის გავლას თან ახლავს ელექტროლიტის შემადგენლობაში შემავალ ნივთიერებათა გამოყოფა ელექტროდებზე. ამ პროცესს, რომელსაც ფართოდ იყენებენ ტექნიკაში, ელექტროლიზი ეწოდება.

ელექტროლიზის დროს  $\Delta t$  დროში გამოყოფილი ნივთიერების მასა ტოლია:  $\frac{M}{enN_A} I \Delta t$ , სადაც  $M$  ნივთიერების მოლური მასაა,  $n$  — ვალენტობა,  $N_A$  — ავოგადროს მუდმივა,  $e$  — ელექტრონის მუხტი.

ოთახის ტემპერატურასთან ახლო ტემპერატურაზე, აირი შედგება ნეიტრალური მოლეკულებისაგან და დიელექტრიკია. გათბობისას, აგრეთვე გამოსხივებისა და სხვა ფაქტორების გავლენით, ხდება აირის იონიზაცია. ის გამტარად გადაიქცევა.

აირის გამტარობა ძირითადად განპირობებულია დადებითი იონებით და ელექტრონებით. განმუხტვას, რომელიც წყდება იონიზატორის გამოთიშვისას, არათავისთავადი ეწოდება.

განმუხტვა თავისთავადია, თუ ის არსებობს იონიზატორის მოქმედების გარეშე. თავისთავადი განმუხტვისას იონებსა და ელექტრონებს წარმოქმნის ელექტრონების დარტყმით გამოწვეული იონიზაცია, თერმოელექტრონული ემისია და ა. შ.

ვაკუუმში დენის მისაღებად საჭიროა ვაკუუმიან მილში შევიტანოთ ელექტრონების წყარო — გახურებული კათოდი.

რადიოტექნიკაში ფართო გამოყენება ჰპოვა ნახევარგამტარმა, რომლის წინაღობა კლებულობს ტემპერატურის გადიდებით და ძლიერაა დამოკიდებული მინარევების არსებობაზე. ნახევარგამტართა გამტარობის მართვის სიადვილე საშუალებას იძლევა ისინი გამოვიყენოთ





ნახევარგამტარულ დიოდსა და ტრანზისტორში, ხელსაწყოებში, რომლებიც ელექტრული რხევების გაძლიერებასა და გენერაციას ემსახურება.

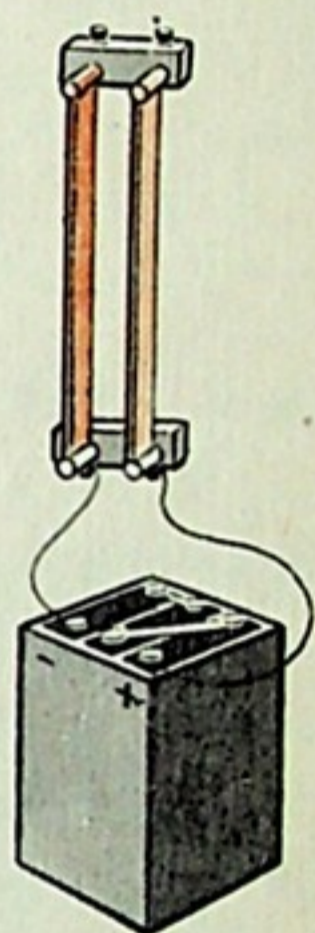
XI თავი

მაგნიტური ველი

83. დენების ურთიერთქმედება. მაგნიტური ველი

უძრავი ელექტრული მუხტების ურთიერთქმედების ძალები კულონის კანონით განისაზღვრება. ახლოქმედების თეორიის მიხედვით ეს ურთიერთმოქმედება ასე ხორციელდება: თითოეული მუხტი ქმნის ელექტრულ ველს; ერთი მუხტის ველი მოქმედებს მეორე მუხტზე და პირიქით.

მაგრამ ელექტრულ მუხტებს შორის შეიძლება მოქმედებდეს სხვა ბუნების ძალებიც. მათ აღმოვაჩინეთ შემდეგი ცდით: ავიღოთ ორი მოქნილი გამტარი, დავამაგროთ ისინი ვერტიკალურად და ქვედა ბოლოები მივუერთოთ დენის წყაროს პოლუსებს (სურ. 196). ამ შემთხვევაში გამტარების ურთიერთმიზიდვა ან განზიდვა არ შეიმჩნევა<sup>1</sup>. მაგრამ, თუ გამტართა მეორე ბოლოებსაც შევაერთებთ, მაშინ გამტარები ერთმანეთისაგან განიზიდება, თუ მათში საპირისპირო მიმართულების დენი გადის (სურ. 197) და ურთიერთმიზიდება, თუ დენებს ერთი და იგივე მიმართულება აქვს (სურ. 198).



სურ. 196

დენიან გამტარებს შორის ურთიერთქმედებას, ე. ი. მოძრავ ელექტრულ მუხტებს შორის ურთიერთქმედებას, მაგნიტური ეწოდება. ძალას, რომლითაც დენიანი გამტარები ერთმანეთზე მოქმედებენ, მაგნიტური ძალა ეწოდება. მაგნიტურ ურთიერთქმედებას გავეცანით VIII კლასის ფიზიკის კურსში. X კლასში მაგნიტურ ურთიერთქმედებას უფრო დაწვრილებით შევისწავლით.

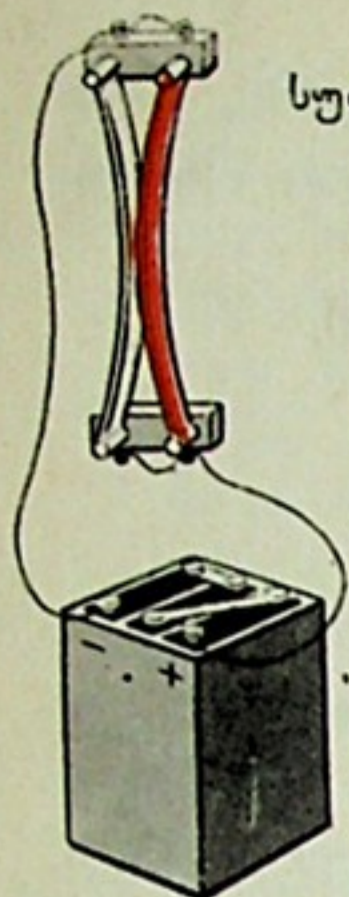


სურ. 197

**მაგნიტური ველი.** ახლოქმედების თეორიის მიხედვით ერთ გამტარში გამავალი დენი უშუალოდ არ მოქმედებს მეორე დენზე.

<sup>1</sup> გამტარები იმუხტება დენის წყაროდან, მაგრამ გამტართა მუხტები, როცა მათ შორის პოტენციალთა სხვაობა რამდენიმე ვოლტია, უაღრესად მცირეა. ამიტომ კულონური ძალა არაფრით არ გამოვლინდება.





სურ. 198.

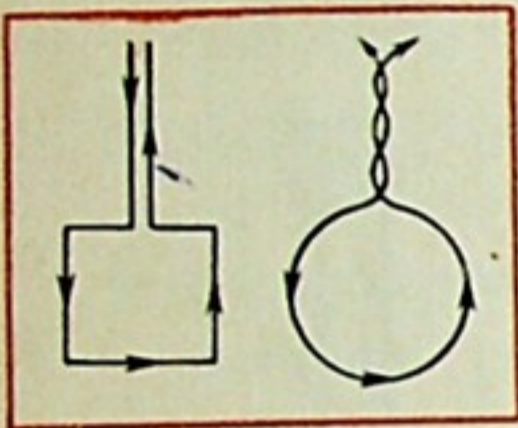
ისევე, როგორც უძრავი ელექტრული მუხტების გარემომცველ სივრცეში აღიძვრება ელექტრული ველი, [დენის გარემომცველ სივრცეში აღიძვრება ველი, რომელსაც მაგნიტური ველი ეწოდება.]

ერთ გამტარში არსებული დენი თავის გარშემო ქმნის, მაგნიტურ ველს, რომელიც მოქმედებს მეორე გამტარში არსებულ დენზე. მეორე დენით შექმნილი მაგნიტური ველი კი მოქმედებს პირველზე.

მაგნიტური ველი არის მატერიის განსაკუთრებული ფორმა, რომლის საშუალებითაც ურთიერთქმედებენ ელექტრულად დამუხტული ნაწილაკები.

მაგნიტური ველის ძირითადი თვისებები, რომლებიც ექსპერიმენტულად აღმოაჩინეს, შემდეგია:

1. მაგნიტურ ველს ქმნის ელექტრული დენი (მოძრავი მუხტები).



სურ. 199.

2. მაგნიტური ველი მუდამ ახლავს დენს (მოძრავ მუხტებზე) მოქმედებით.

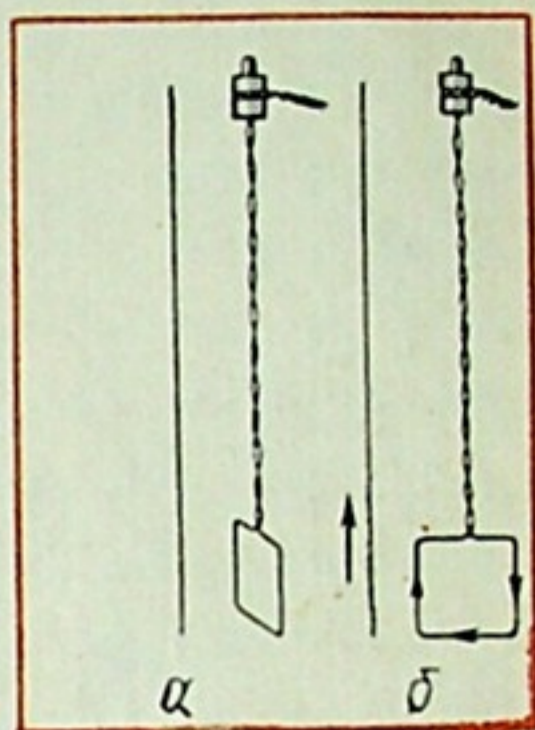
ელექტრული ველის მსგავსად, მაგნიტური ველი არსებობს რეალურად, ჩვენგან დამოუკიდებლად, ამის მიუხედავად, ვიცით თუ არა მისი არსებობის შესახებ. მაგნიტური ველის რეალურობას ისევე როგორც ელექტრული ველისას, ექსპერიმენტულად ადასტურებს ელექტრომაგნიტური ტალღების არსებობა (იხ. § 41).

დენიანი შეკრული კონტური მაგნიტურ ველში. მაგნიტური ველის გამოსაკვლევად თითქოს მოსახერხებელი უნდა იყოს დენის ძალიან მცირე ელემენტის, ე. ი. წვრილი დენიანი გამტარის პატარა მონაკვეთის აღება მსგავსად იმისა, როგორც ელექტრული ველის შესასწავლად გამოვიყენეთ მცირე ზომის დამუხტული სხეული. მაგრამ გამტარის მონაკვეთში მუდმივი დენი არ შეიძლება არსებობდეს, რადგან ნებისმიერი წრედი, რომელშიც მუდმივი დენი არსებობს ყოველთვის შეკრულია.

მაგნიტური ველის შესასწავლად უმჯობესია ავიღოთ შეკრული კონტური რომლის ზომები მცირეა იმ მანძილებთან შედარებით, რომლებზეც მაგნიტური ველი შესამჩნევად იცვლება). მაგალითად, შეიძლება ავიღოთ მავთულის ნებისმიერი ფორმის პატარა ბრტყელი ჩარჩო (სურ. 199). დენის მიმყვანი სადენები უნდა მოვათავსოთ ერთმანეთთან ახლოს ან გადავაგრიხოთ. მაშინ მაჯამებელი ძალა, რომლითაც მაგნიტური ველი ამ გამტარებზე მოქმედებს, ნულის ტოლი იქნება.]

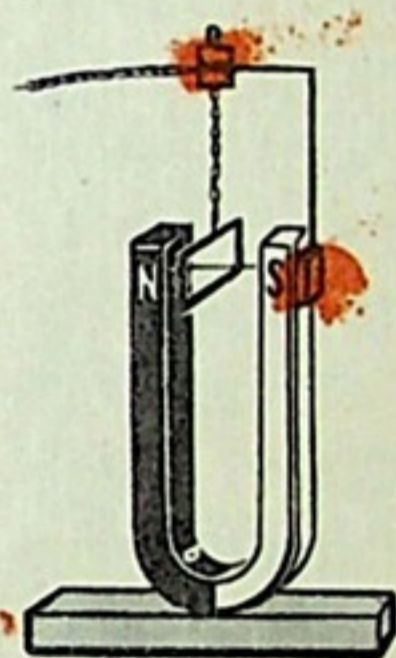


დენიან კონტურზე მაგნიტური ველის მოქმედების ხასიათი შეიძლება შემდეგი ცდით გამოვარკვიოთ. ერთმანეთზე გადაგრეხილ, წვრილ მოქნილ გამტარებზე დავკიდოთ პატარა ბრტყელი ჩარჩო, რომელიც მავთულის რამდენიმე ხვიისაგან შედგება. მისგან მოშორებით (მანძილზე, რომელიც საგრძნობლად აღემატება ჩარჩოს ზომებს) ვერტიკალურად მოვათავსოთ გამტარი (სურ. 200, ა). გამტარსა და ჩარჩოში ელექტრული დენის გავლისას ჩარჩო შემობრუნდება და დადგება ისე, რომ გამტარი აღმოჩნდება ჩარჩოს სიბრტყეში (სურ. 200, ბ). გამტარში დენის მიმართულების შეცვლისას, ჩარჩო შემობრუნდება  $180^\circ$ -ით.



სურ. 200.

VIII კლასის ფიზიკის კურსიდან ვიცით, რომ მაგნიტურ ველს ქმნის არა მარტო ელექტრული დენი, არამედ მუდმივი მაგნიტიც. თუ მაგნიტის პოლუსებს შორის მოვათავსებთ მოქნილ სადენებზე დაკიდებულ დენიან ჩარჩოს, მაშინ ჩარჩო შემობრუნდება მანამ, სანამ მისი სიბრტყე მართობული არ გახდება მაგნიტის პოლუსების შემაერთებელი წრფისა (სურ. 201). ამრიგად, მაგნიტური ველი დენიან ჩარჩოზე მაორიენტირებელ გავლენას ახდენს<sup>1</sup>.



სურ. 201.

#### 84. მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი

ელექტრული ველი ხასიათდება ვექტორული სიდიდით — ელექტრული ველის დაძაბულობით. მაგნიტური ველის დასახასიათებლად საჭიროა შემოვიღოთ განსაკუთრებული ფიზიკური სიდიდე.

<sup>1</sup> ერთგვაროვანი მაგნიტური ველი (ე. ი. ველი, რომელიც სივრცის ყველა წერტილში ერთნაირია), რომელშიც დენიანი ჩარჩო მდებარეობს, როგორც ცდა გვიჩვენებს, ჩარჩოზე მხოლოდ მაორიენტირებელ მოქმედებას ახდენს. არაერთგვაროვან ველში ჩარჩო, ამას გარდა, გადატანით მოძრაობასაც შეასრულებს (მიეზიდება ან განეზიდება დენიან გამტარს).





ამ სიდიდეს მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი ეწოდება და აღინიშნება  $\vec{B}$  ასოთი.

**მაგნიტური ისარი.** ვნახეთ, რომ მოქნილ საკიდზე დაკიდებული დენიანი ჩარჩო (მასზე საკიდის მხრიდან არ მოქმედებს დრეკადობის ძალა, რომელიც ხელს უშლის ჩარჩოს ორიენტაციას) შემობრუნდება მანამ, სანამ არ დადგება სრულიად განსაზღვრულ მდებარეობაში. VIII კლასის ფიზიკის კურსიდან ვიცით, რომ ასევე იქცევა მაგნიტური ისარი. ისარი პატარა მოგრძო მაგნიტია, რომელსაც ბოლოებზე აქვს ორი პოლუსი: სამხრეთი S და ჩრდილოეთი N.

**მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მიმართულება.** მაგნიტური ველის მაორიენტირებელი მოქმედება მაგნიტურ ისარზე ან დენიან ჩარჩოზე გამოყენებულია მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მიმართულების განსაზღვრისათვის.

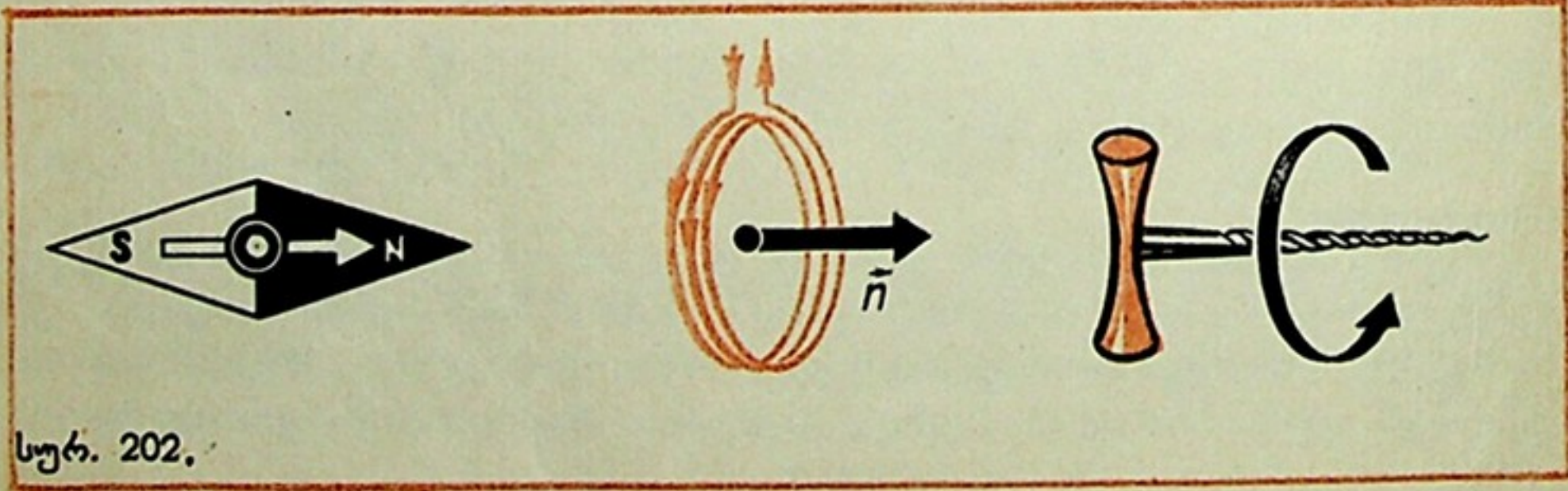
მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მიმართულებად მიღებულია მაგნიტურ ველში თავისუფლად მბრუნავი მაგნიტური ისრის მიმართულება S სამხრეთი პოლუსიდან N ჩრდილოეთი პოლუსისკენ. ეს მიმართულება ემთხვევა დენიანი ჩაკეტილი კონტურის დადებითი ნორმალის მიმართულებას (სურ. 202).

დადებითი ნორმალი მიმართულია იმ მხარეს, საითაც გადაადგილდება ბურღი (მარჯვენა ნაჭდევით), თუ მას ვაბრუნებთ ჩარჩოში გამავალი დენის მიმართულებით.

თუ გვექნება დენიანი ჩარჩო ან მაგნიტური ისარი, გავიგებთ მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მიმართულებას ველის ნებისმიერ წერტილში.

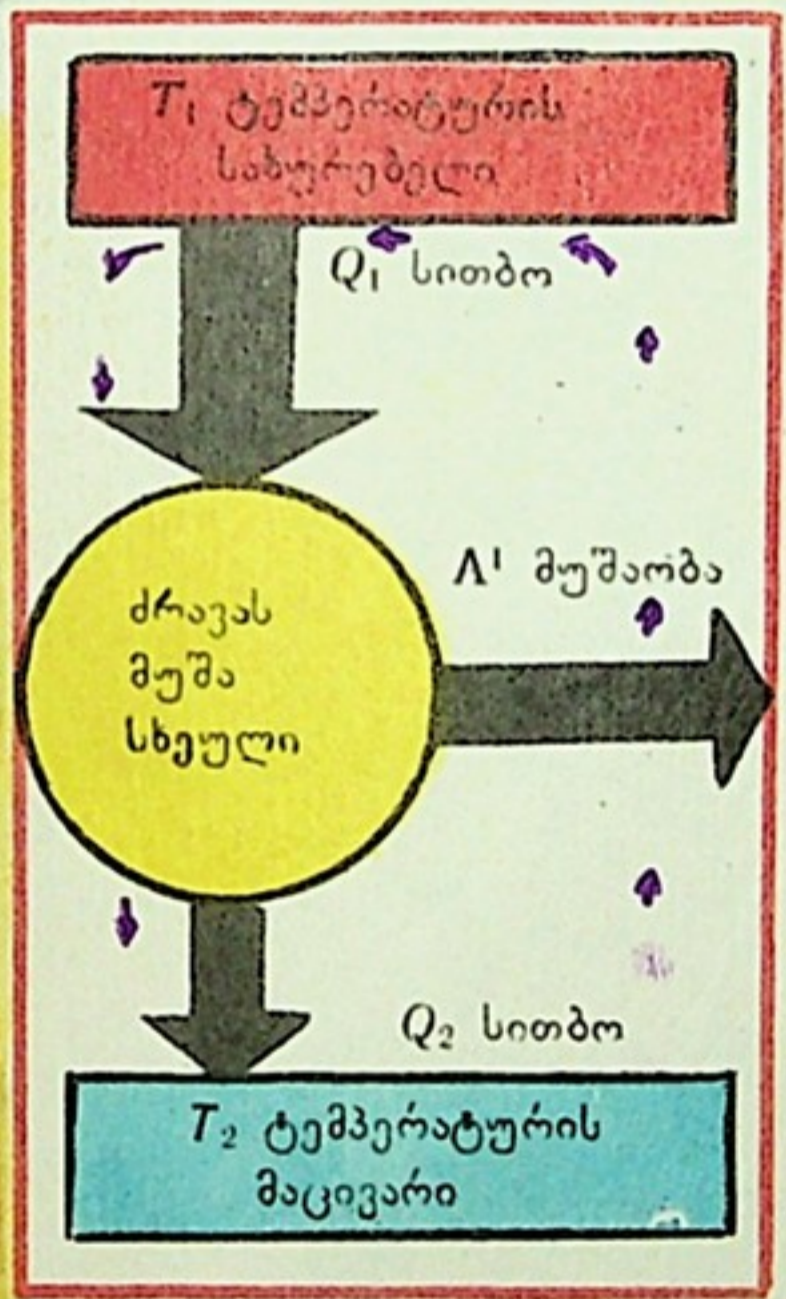
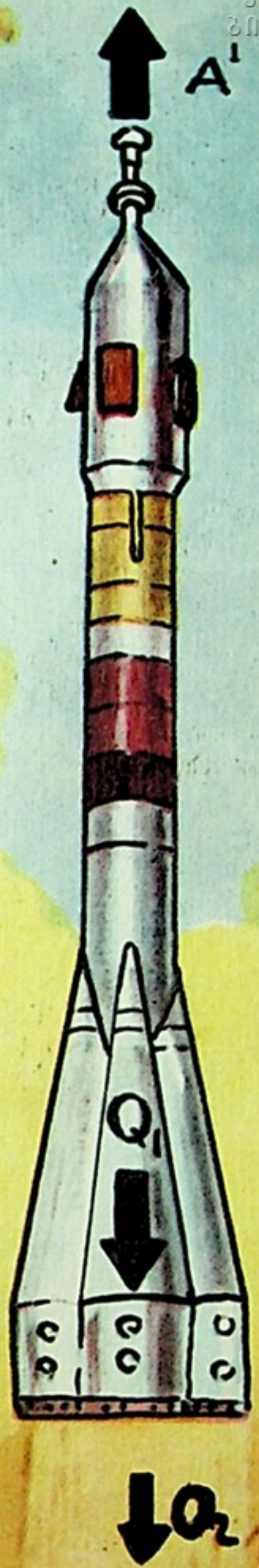
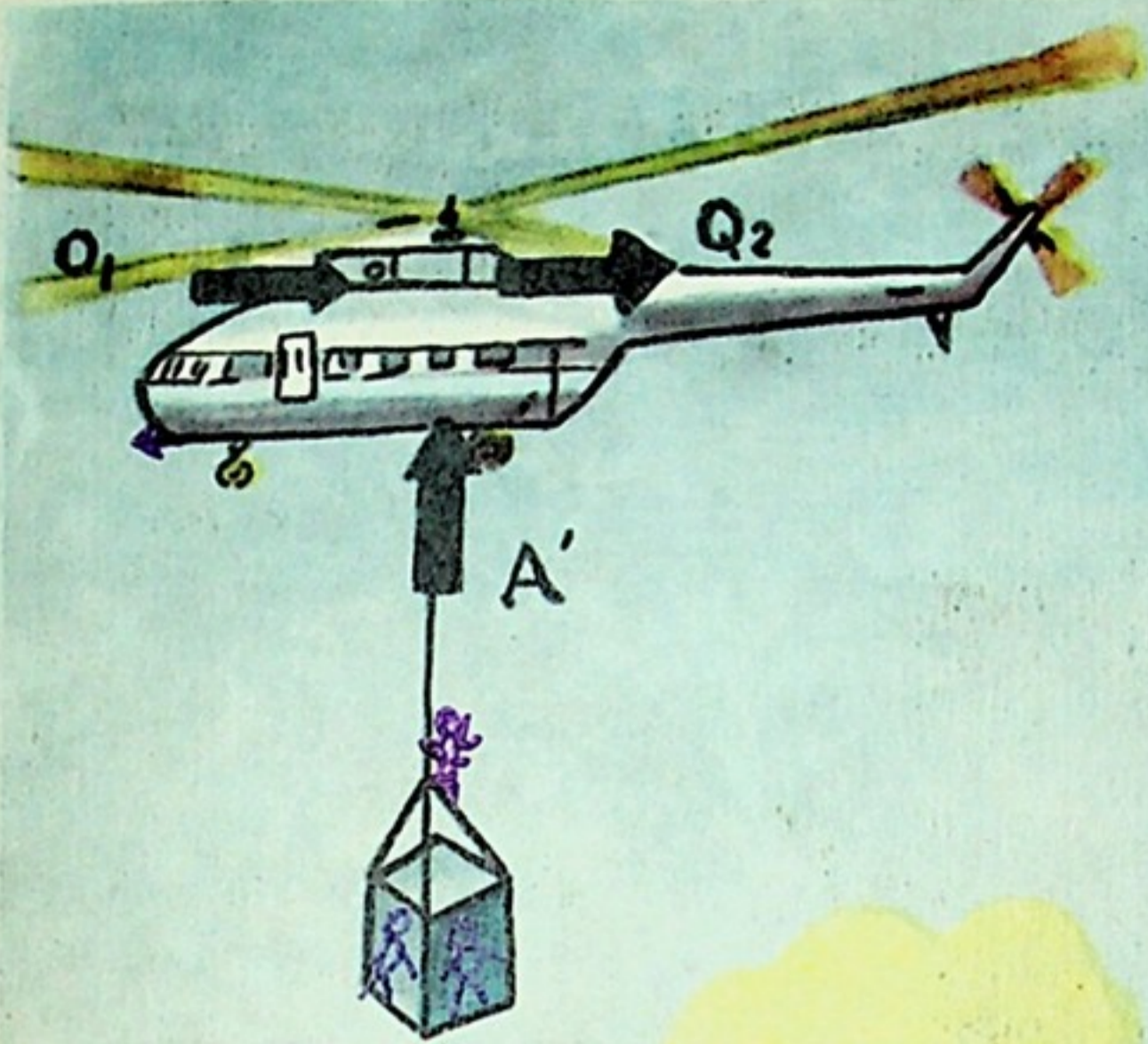
203-ე და 204-ე სურათებზე ნაჩვენებია ცდები მაგნიტური ისრით; ისინი გამეორებაა ცდებისა დენიანი ჩარჩოს გამოყენებით (სურ. 200 და 201).

წრფივი დენიანი გამტარის მაგნიტურ ველში ისარი დგება წრეწირის მხების მიმართულებით (სურ. 204). წრეწირის სიბრტყე გამტარის მართობია, მისი ცენტრი კი მდებარეობს გამტარის ღერძზე. დენის მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მიმართულებას იგებენ ბურღის წესის მეშვეობით.



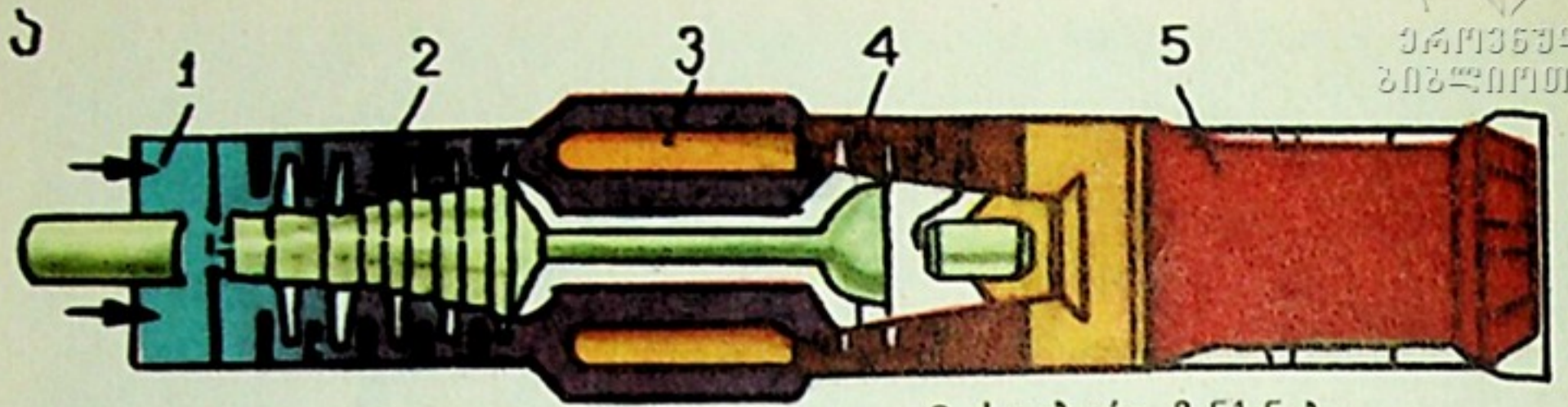
სურ. 202.



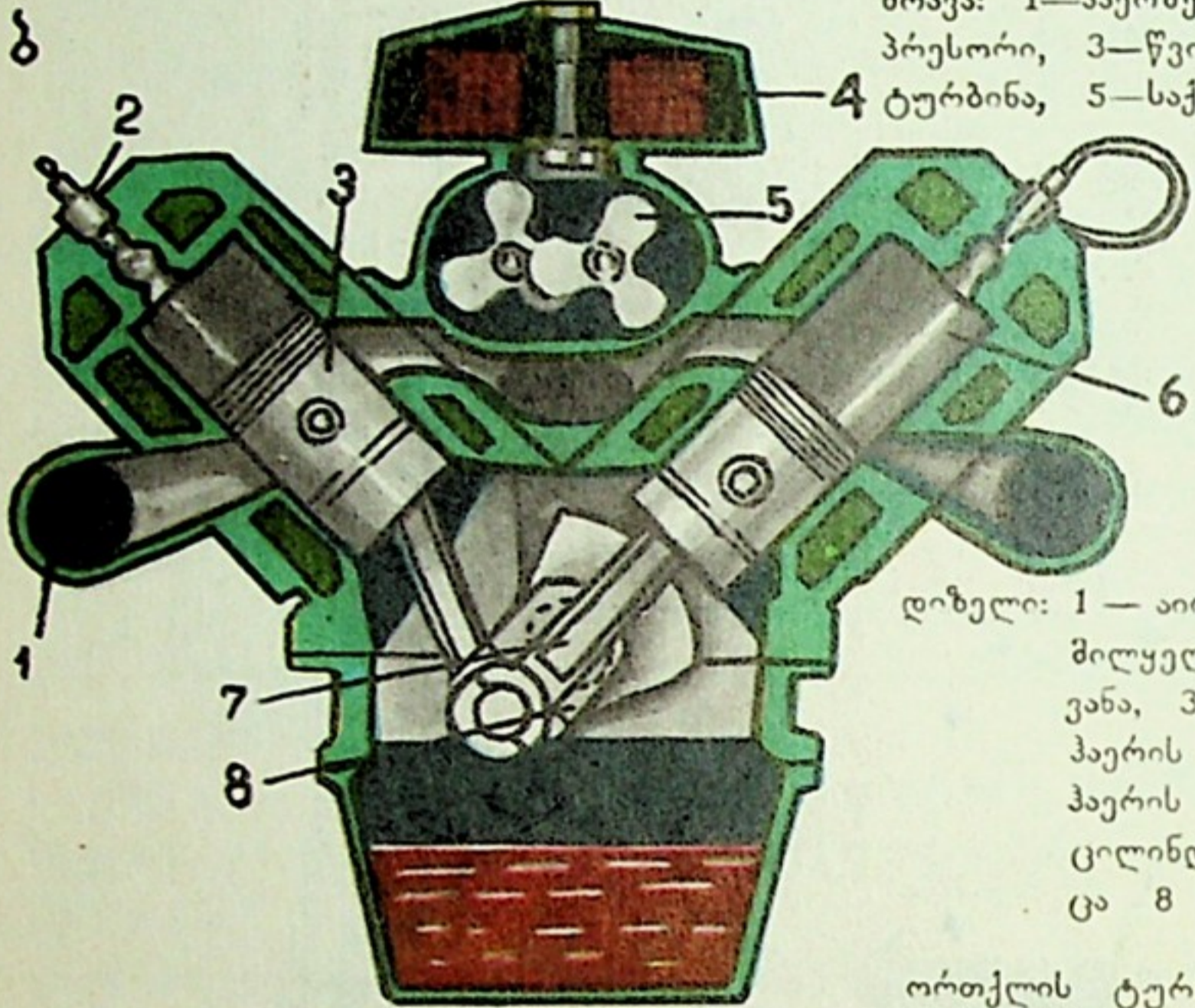


1. სითბური მანქანები: შიდაწვის ძრავა; რაკეტის ძრავა.  
მუშაობისას სითბური მანქანა იღებს  $Q_1$  სითბოს რაოდენობას, გასცემს  $Q_2$ -ს შესრულებული მუშაობა  $A = Q_1 - Q_2$ .



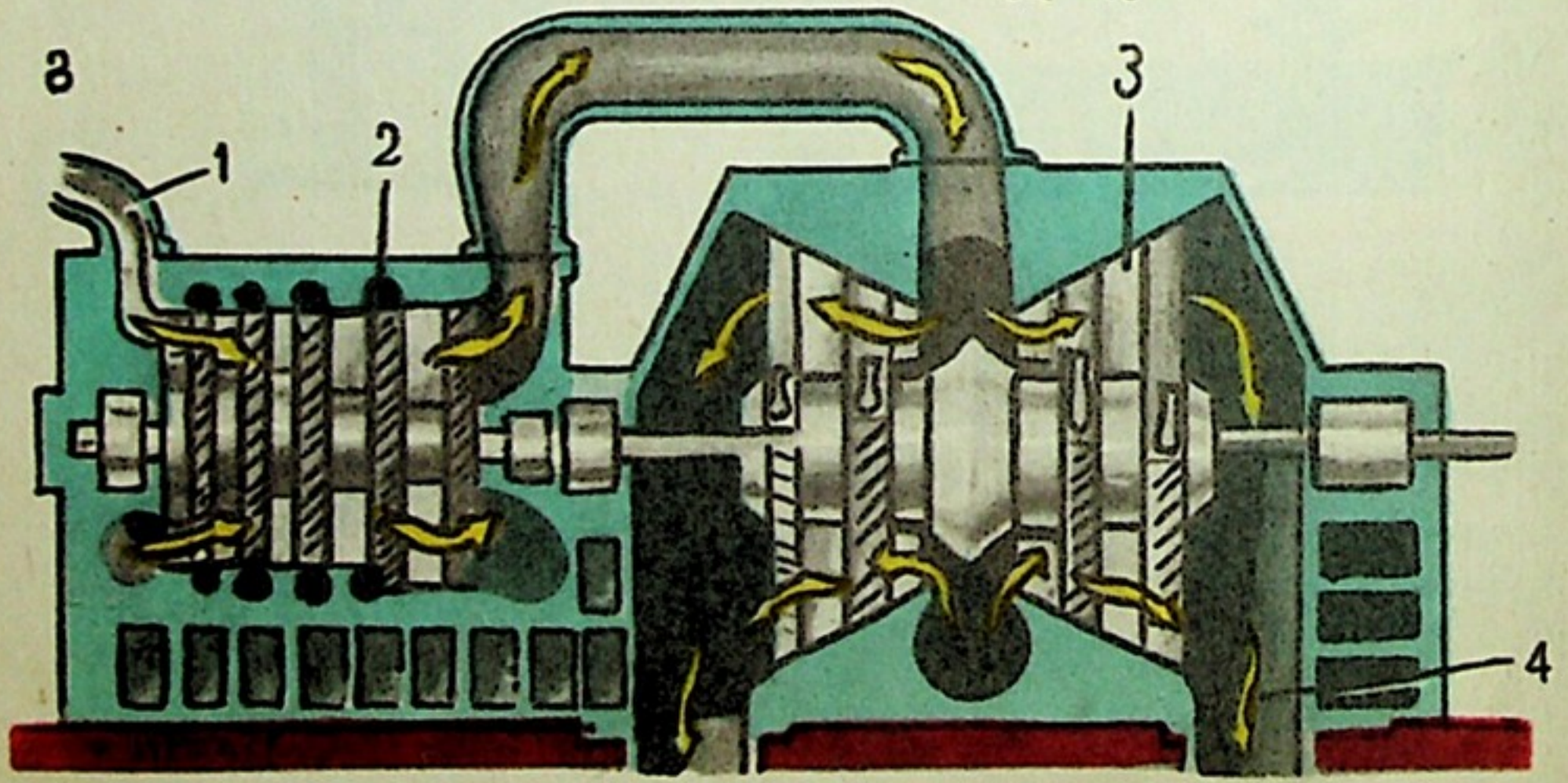


2. სითბური მანქანები  
საავიაციო ტურბორეაქტიული  
ძრავა: 1—ჰაერშემწოვი, 2—კომ-  
პრესორი, 3—წვის კამერა, 4—  
ტურბინა, 5—საქშენი.



დიზელი: 1 — აიოთა გამოსაშვები  
შილყელი, 2—ფრქვე-  
ვანა, 3— დგუში, 4—  
ჰაერის ფილტრი, 5 —  
ჰაერის საკირხნი, 6 —  
ცილინდრი, 7—ბარბა-  
ცა 8 მუხლა ლილვი.

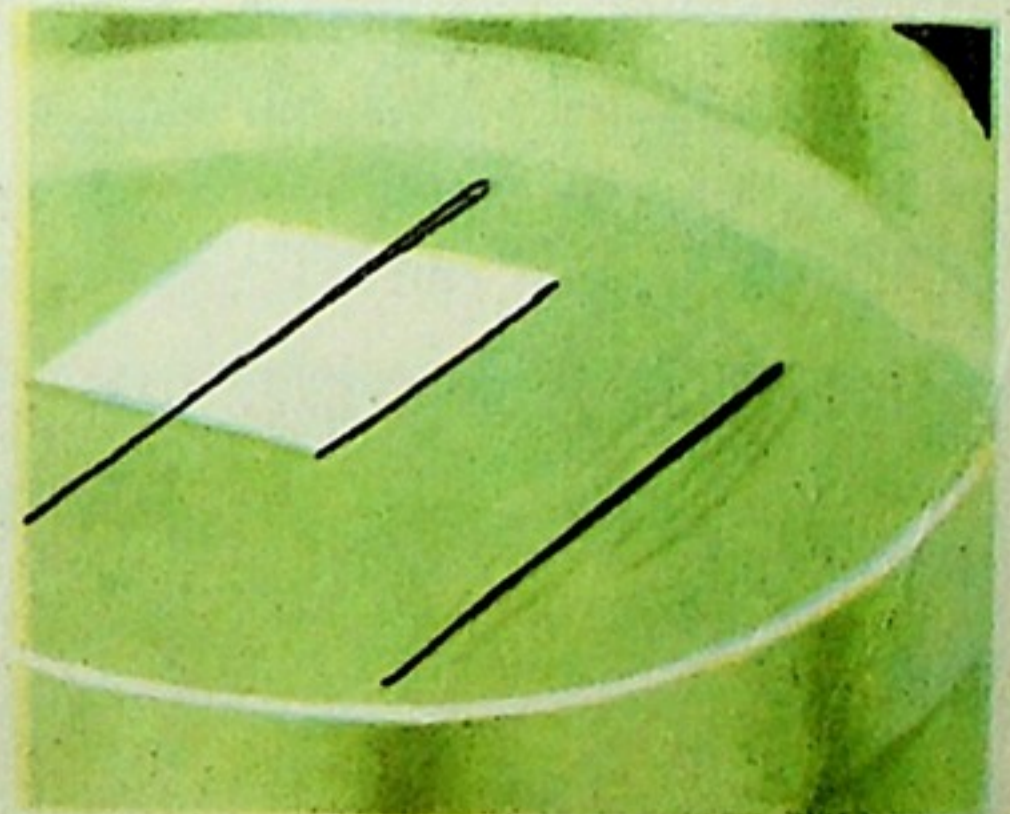
ორთქლის ტურბინა: 1—შესავა-  
ლი შილყელი, 2—ტურბინის მუ-  
შა თვალი, 3—ტურბინის მიმმარ-  
თველი ნიჩბები, 4—გამოსავალი  
ორთქლსადენი.



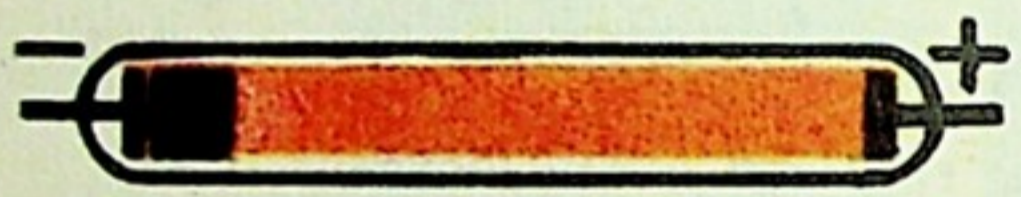
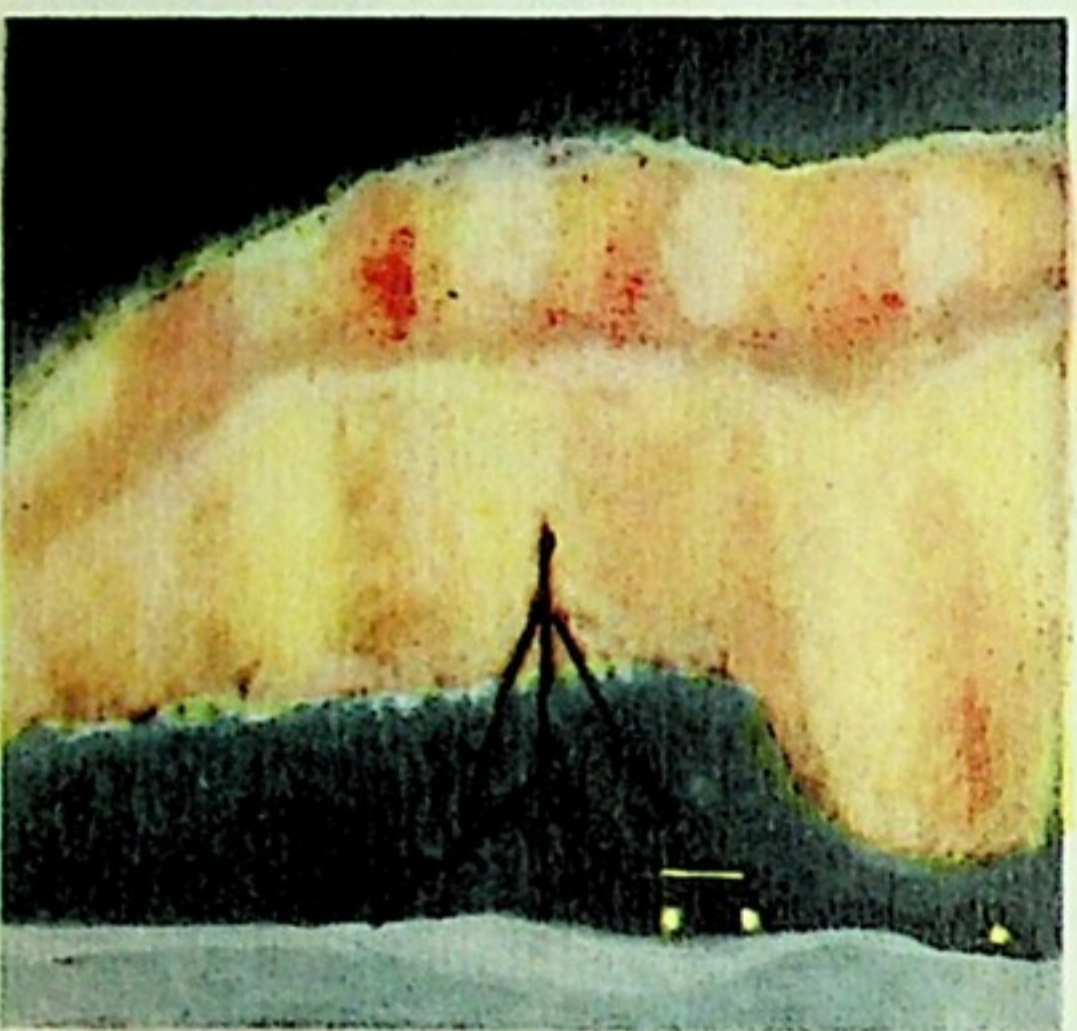
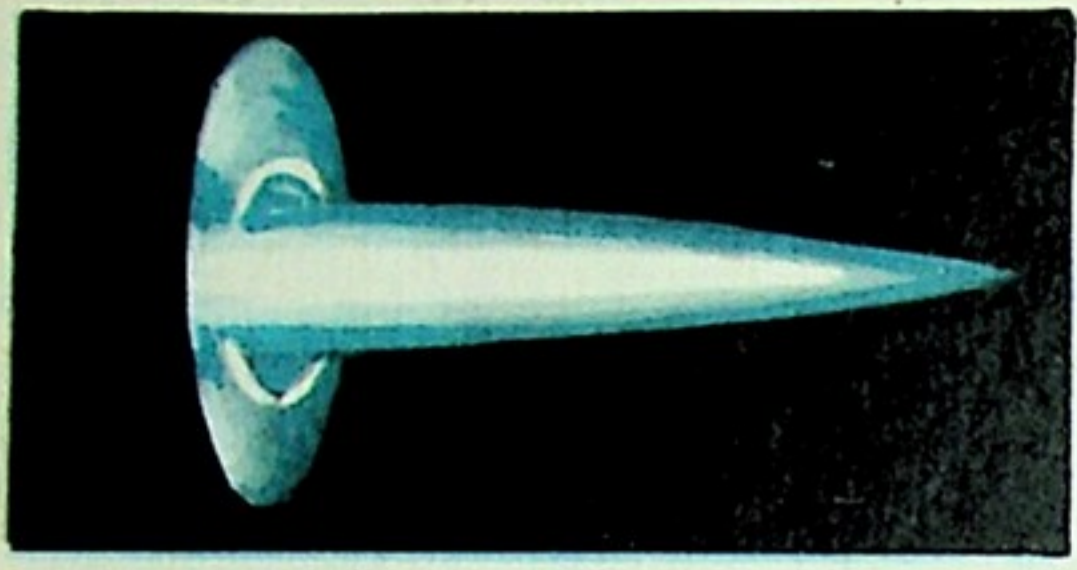




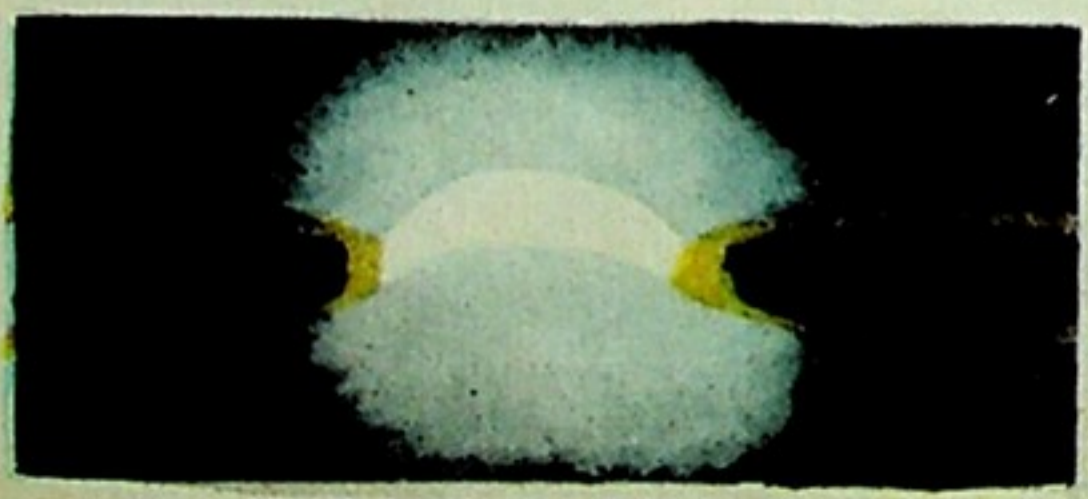
3. ზედაპირული დაკიმულობის ძალა ფოლადის ნემსსა და წყალმზომელას იკავებს წყლის ზედაპირზე. ეს ძალა განსაზღვრავს საპნის ბუშტისა და სითხის წვეთის ფორმასა და თვისებებს.



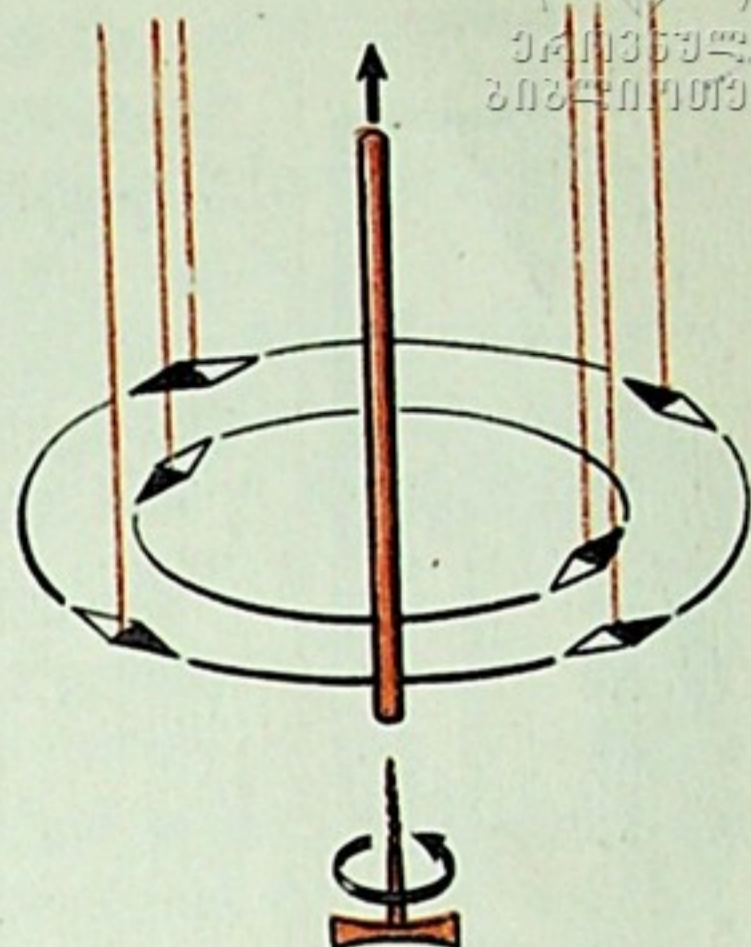
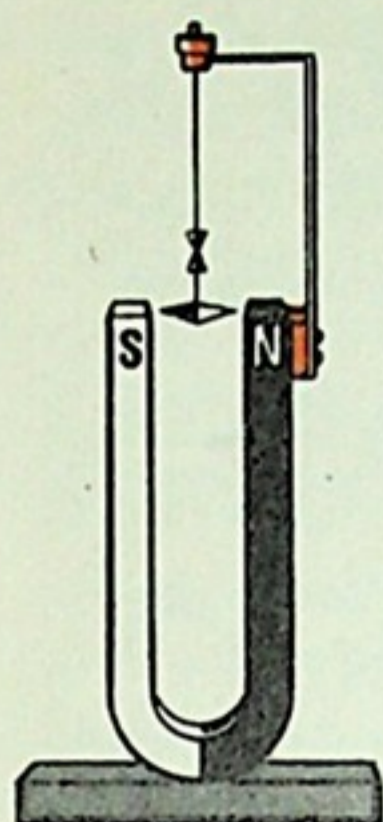




4. აირული განმუხტვის მაგალითები: პლაზმის ჭავლი, რომელიც გამოდის პლაზმოტრონის საქშენიდან; ატმოსფეროს ზედა ფენების ნათება დამუხტული კოსმოსური ნაწილაკების ბომბარდირებით (პოლარული ნათება); მღვივარი განმუხტვა მილში; ელექტრული რკალი; გიგანტური ნაპერწკლური განმუხტვა (ელვა); გვიოგვინისებრი განმუხტვა (წმინდა ელმას ცეცხლი).







სურ. 203.

203

სურ. 204.

ბურღის წესი ასეთია: თუ ბურღის გადატანით მოძრაობის მიმართულემა გამტარში დენის მიმართულემას ემთხვევა, მაშინ ბურღის ტარის ბრუნვის მიმართულემა მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მიმართულემას ემთხვევა.

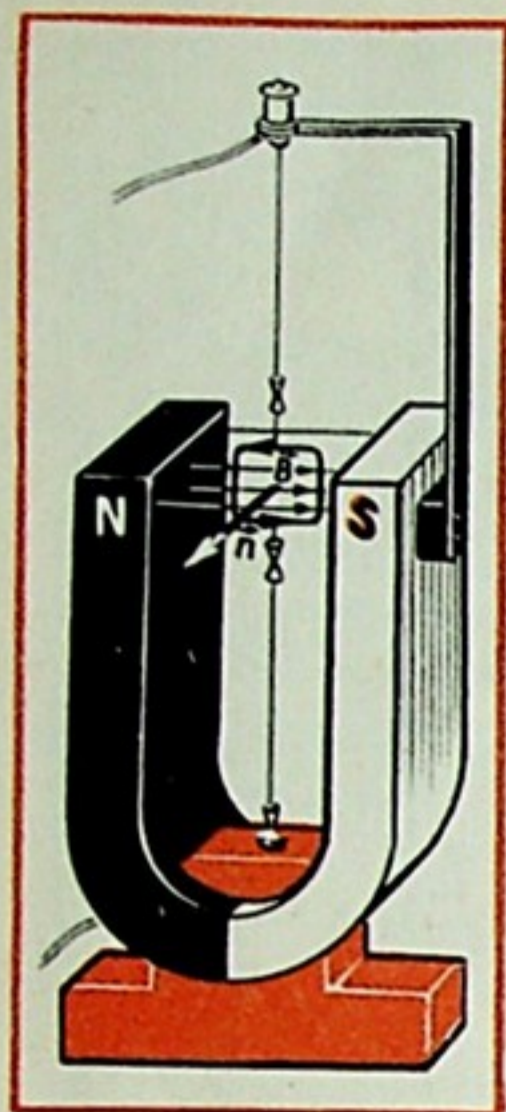
კომპასით ორიენტირებისას, ფაქტიურად ტარდება ცდა, რომლის მიზანია დედამიწის მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორის მიმართულეების დადგენა.

### 85. მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდული

დენიან კონტურზე მოქმედ ძალთა მომენტი. ერთგვაროვანი მაგნიტური ველი არ იწვევს დენიანი ჩარჩოს ან მაგნიტური ისრის გადატანით მოძრაობას. მექანიკის კანონების თანახმად ეს ნიშნავს, რომ ჩარჩოზე ან ისარზე მოქმედ ძალთა ვექტორული ჯამი ნულის ტოლია. მაგრამ ჩარჩო წონასწორობაში არ არის, თუ ჩარჩოს ნორმალ მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მიმართულემას არ ემთხვევა. ეს იმაზე მიუთითებს, რომ ჩარჩოზე მოქმედ ძალთა მომენტი ნულისაგან განსხვავდება<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> გავიხსენოთ, რომ ძალის მომენტი ეწოდება ძალის მოდულის ნამრავლს მხარზე — იმ მართობის სიგრძეზე, რომელიც დაშვებულია ღერძიდან ძალის მოქმედების წრფეზე. ძალის მომენტი სხეულის ბრუნვას იწვევს.





სურ. 205.

ამ მომენტის სიდიდე იცვლება მაშინაც, როცა ჩარჩოში გამავალი დენის ძალა მუდმივია. იგი და-  
მოკიდებულია ჩარჩოს სიბრტყის ორიენტაციაზე  $\vec{B}$  ვექტორის მიმართ. როცა ჩარჩოს სიბრტყე მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მართობულია — ძალთა მომენტი ნულის ტოლია.

ჩარჩოზე მოქმედი ძალთა მომენტის გაზომვა შესაძლებელია. ამისათვის იყენებენ ხელსაწყოს, რომელიც კულონის გრებიტი სასწორის მსგავსია. წვრილ დრეკად მავთულზე ნაცვლად უღლისა, რომელზეც დამუხტული ბურთულაა დამაგრებული დაკიდებულია დენიანი კონტური. იმისათვის, რომ დენის გავლისას კონტური საწყის მდებარეობაში იყოს, მავთული უნდა დავგრიხოთ გარკვეული კუთხით. მავთულის გრების კუთხის მიხედვით განისაზღვრება ჩარჩოზე მოქმედი ძალების მომენტი. ეს მომენტი მაქსიმალურია, როცა ჩარჩოს

ნორმალი  $\vec{B}$  ვექტორის მართობულია (სურ. 205).

მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდული. [თუ ჩარჩოში ვცვლით დენის ძალას და ცდის დროს სხვადასხვა  $S$  ფართობის ჩარჩოს ავიღებთ, დავადგენთ მნიშვნელოვან ფაქტს: მაგნიტური ველის მხრივ დენიანი ჩარჩოზე მოქმედი ძალთა მომენტის მაქსიმალური მნიშვნელობა პროპორციულია დენის ძალისა და ჩარჩოს ფართობის ნამრავლისა:

$$M \sim IS. \quad ]$$

ეს ცდისეული ფაქტი შეიძლება გამოვიყენოთ მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდულის განსასაზღვრავად. მართლაც, რადგან

$$M \sim IS. \quad \frac{M}{IS} \text{ არ იქნება დამოკიდებული არც დენის ძალაზე, არც}$$

ჩარჩოს ფართობზე. ეს შეფარდება ახასიათებს მაგნიტურ ველს იმ ადგილზე, სადაც ჩარჩოა მოთავსებული. ]

მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდული არის წილადი, რომლის მრიცხველია დენიანი კონტურზე მოქმედი ძალთა მაქსიმალური მომენტი, მნიშვნელი კი დენის ძალისა და კონტურის ფართობის ნამრავლი:

$$B = \frac{M}{IS}. \quad ] \quad (11.1)$$

მაგნიტური ველი სრულად ხასიათდება  $\vec{B}$  მაგნიტური ინდუქციის ვექტორით. ველის თითოეულ წერტილში მაგნიტური ინდუქციის ვექ-



ტორის მიმართულება და მისი მოდული შეიძლება განისაზღვროს დენიან კონტურზე მოქმედ ძალთა მომენტის გაზომვით.

დენის მცირე ელემენტის მაგნიტური ინდუქციის განმსაზღვრელი კანონი საკმაოდ რთულია, ამიტომ მას არ განვიხილავთ.

**მაგნიტური ინდუქციის ერთეული.** მაგნიტური ინდუქციის ერთეულად მიღებულია ისეთი ველის მაგნიტური ინდუქცია, რომელშიც 1 მ<sup>2</sup> ფართობის ჩარჩოზე 1 ა დენის გავლისას ველი  $M=1$  ნ.მ მაქსიმალური ძალთა მომენტით მოქმედებს:

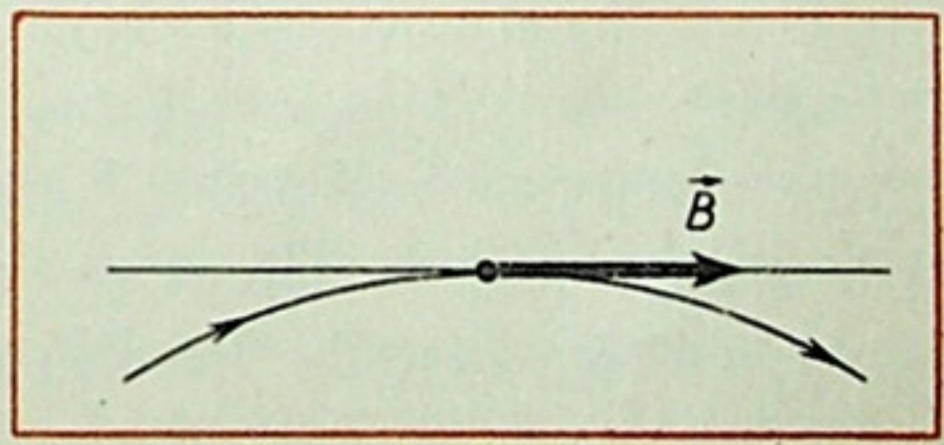
$$\text{მაგნიტური ინდუქციის 1 ერთ.} = 1 \frac{\text{ნ.მ}}{\text{ა.მ}^2} = 1 \frac{\text{ნ}}{\text{ა.მ}}$$

მაგნიტური ინდუქციის ერთეულს ტესლა ეწოდება (აღინიშნება ტლ) იუგოსლაველი მეცნიერის, ელექტროტექნიკოსის ნ. ტესლას პატივსაცემად.

**მაგნიტომეტრი.** პრაქტიკაში მაგნიტური ინდუქციის გამზომ ხელსაწყოებში — მაგნიტომეტრებში — დენიანი კონტურის ნაცვლად მცირე ზომის მაგნიტს იყენებენ. მაგნიტური ინდუქციის სიდიდეზე მსჯელობენ იმ ძალთა მომენტის მიხედვით, რომლითაც მაგნიტური ველი მოქმედებს მაგნიტზე.

### 86. მაგნიტური ინდუქციის წირები. მაგნიტური ნაკადი

**მაგნიტური ინდუქციის წირები.** მაგნიტური ველის თვალსაჩინო სურათს მივიღებთ, თუ გავავლებთ ე. წ. მაგნიტური ინდუქციის წირებს. მაგნიტური ინდუქციის წირები ეწოდება ისეთ წირებს, რომელთა მხები ისეა მიმართული, როგორც  $\vec{B}$  ვექტორი ველის მოცემულ წერტილში (სურ. 206).

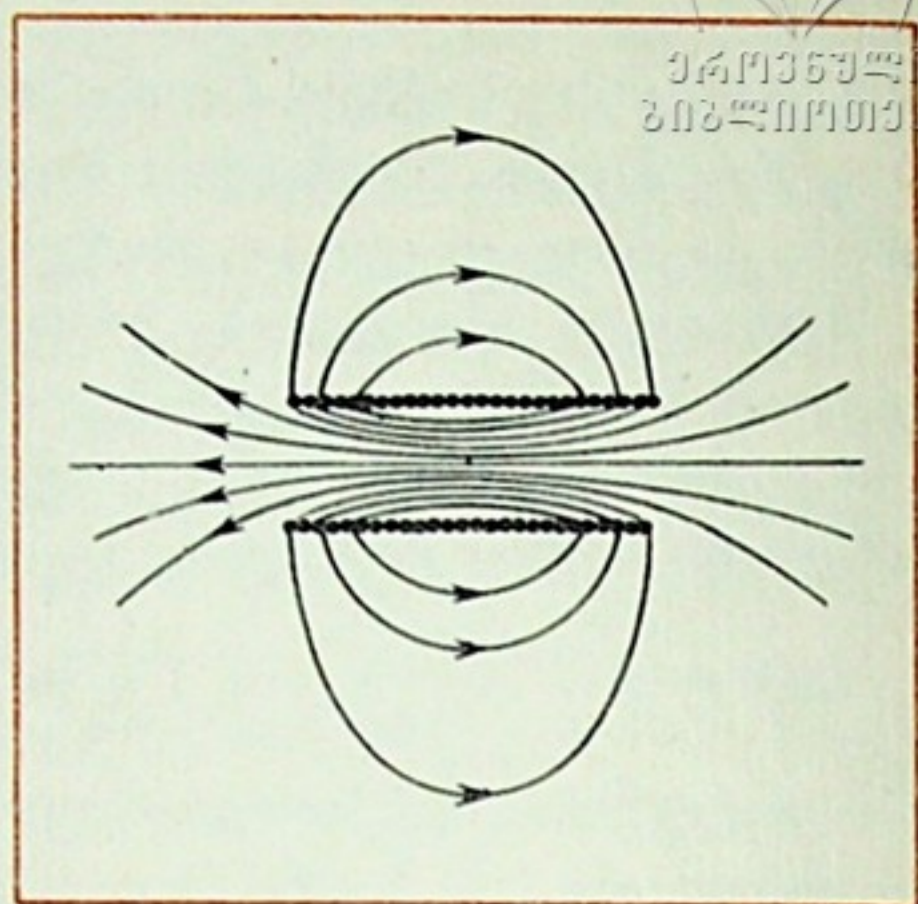
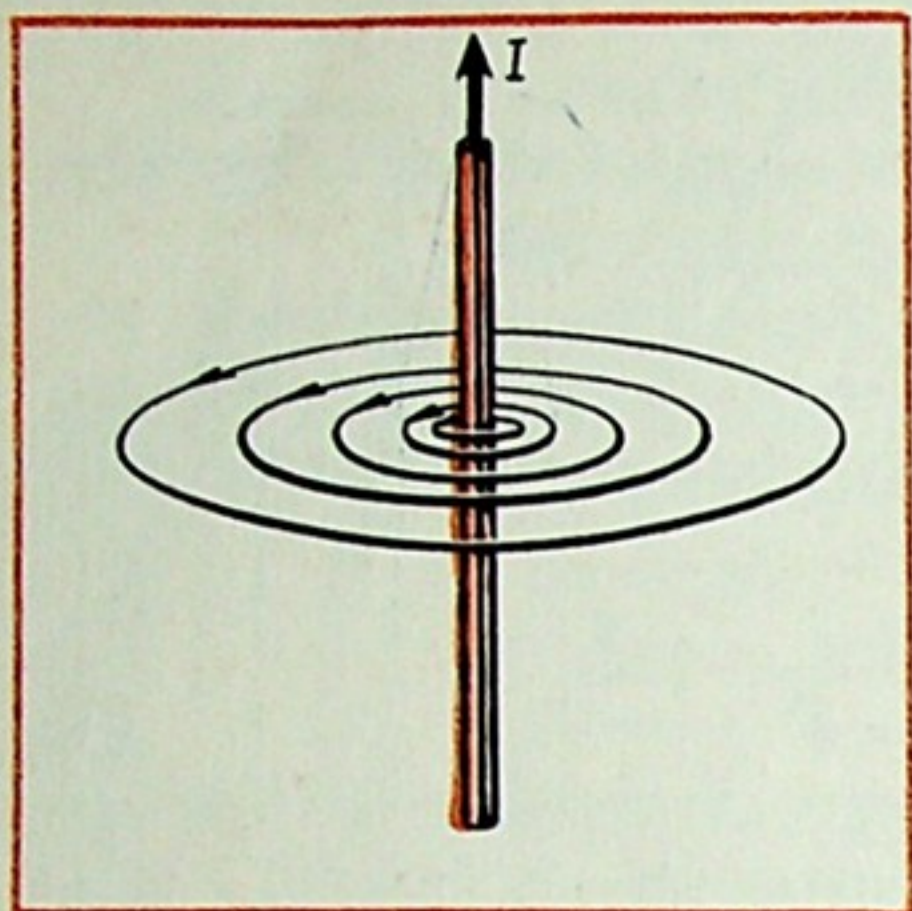


სურ. 206.

ამ მხრივ მაგნიტური ინდუქციის წირები ელექტროსტატიკური ველის დაძაბულობის წირების ანალოგიურია.

გავავლოთ მაგნიტური ინდუქციის წირები წრფივი დენიანი გამტარის მაგნიტური ველისათვის. ადრე აღწერილი ცდებიდან გამომდინარეობს, რომ ამ შემთხვევაში მაგნიტური ინდუქციის წირები დენიანი გამტარის მართობ სიბრტყეში მდებარე კონცენტრული წრეწირებია. წრეწირთა ცენტრი გამტარის ღერძზე მდებარეობს (სურ. 207). წირზე ისარი მიუთითებს, თუ რომელ მხარესაა მიმართული ინდუქციის ვექტორი — მხები მო-





სურ. 207.

სურ. 208.

ცემული წირისა. როგორც ელექტრული ველის დაძაბულობის შემთხვევაში მაგნიტური ინდუქციის წირებს ისე ავლებენ, რომ მათი სიხშირე მით მეტი იყოს, რაც უფრო ძლიერია ველი სივრცის მოცემულ უბანში.

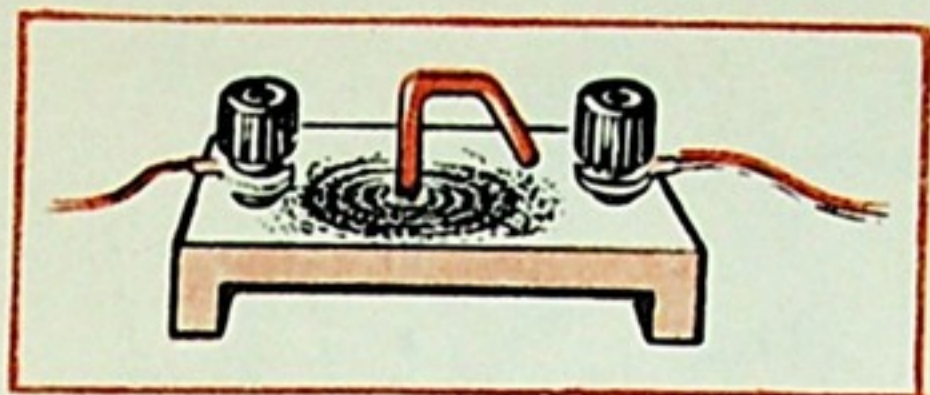
განვიხილოთ დენიანი კოჭას (სოლენოიდის) მაგნიტური ველის სურათი. 208-ე სურათზე. ნაჩვენებია მაგნიტური ინდუქციის წირთა სურათი, რომელიც აგებულია მაგნიტური ისრების ან პატარა დენიანი კონტურების მეშვეობით (სოლენოიდი მოცემულია კვეთაში). თუ სოლენოიდის სიგრძე გაცილებით მეტია მის დიამეტრზე, მაშინ ველი სოლენოიდის შიგნით ერთგვაროვნად შეიძლება ჩავთვალოთ. **ესე**თი ველის მაგნიტური ინდუქციის წირები პარალელურია, მათი სიხშირე ყველგან ერთნაირია. **ქ**

მაგნიტური ინდუქციის წირთა სურათი შეიძლება გავხადოთ „ხილული“, თუ ვისარგებლებთ რკინის წვრილი ნაქლიბით. ეს მეთოდი ჩვენთვის ცნობილია VIII კლასის ფიზიკის კურსიდან.

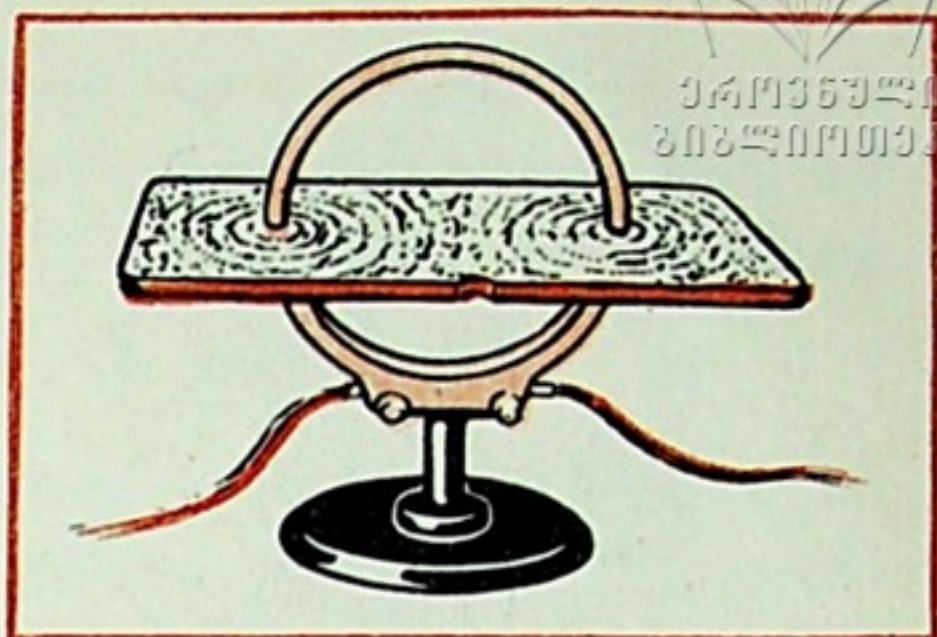
მუყაოს ფურცელზე მიმოხეული ნაქლიბის თითოეული ნაწილაკი მაგნიტურ ველში მაგნიტდება და ისე იქცევა, როგორც პატარა მაგნიტური ისარი. ბევრი ასეთი ისრის არსებობა საშუალებას გვაძლევს ველის მრავალ წერტილში განვსაზღვროთ მაგნიტური ველის მიმართულება და ამრიგად, უფრო ზუსტად გავარკვიოთ მაგნიტური ინდუქციის წირების განლაგება. ზოგიერთი მაგნიტური ველის წირთა სურათი მოცემულია 209—212-ე სურათებზე.

**გრიგალური ველი.** მაგნიტური ინდუქციის წირთა მნიშვნელოვანი თავისებურება ისაა, რომ მათ არა აქვთ არც დასაწყისი და არც დასასრული.

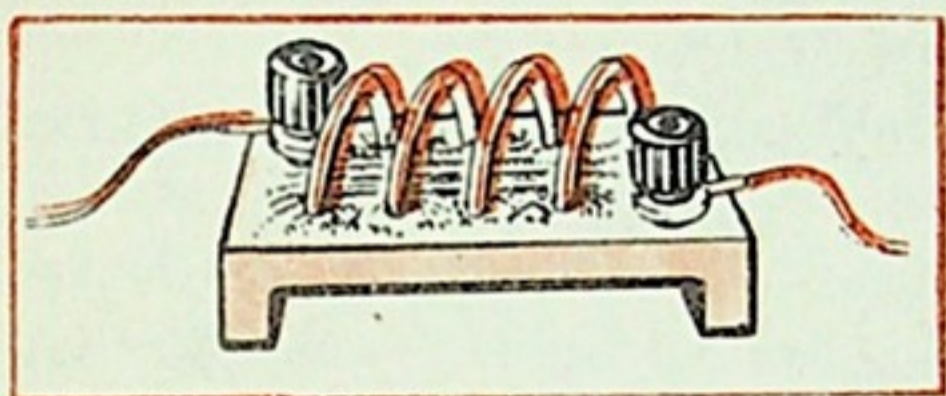




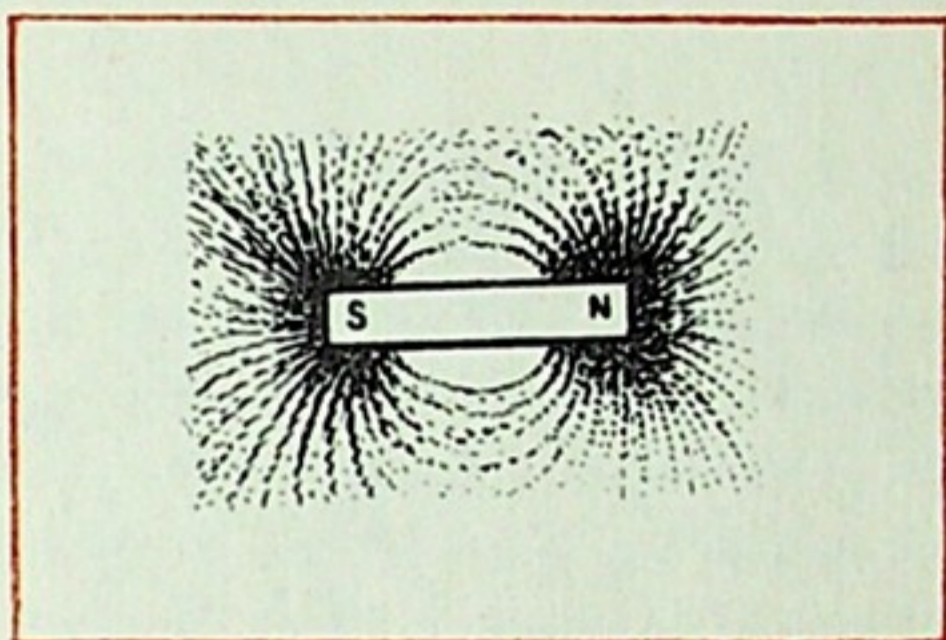
სურ. 209.



სურ. 210.



სურ. 211.



სურ. 212.

რისინი ყოველთვის შეკრულია. ჯავიხსენოთ, რომ ელექტრული ველის შემთხვევაში სხვა ვითარებაა. მისი ძალწირები ყოველთვის იწყება დადებით მუხტზე და მთავრდება უარყოფითზე.

ველს, რომელიც შეკრული ძალწირებით ხასიათდება, გრიგალური ველი ეწოდება. მაგნიტური ველი გრიგალურია.

მაგნიტური ინდუქციის წირების ჩაკეტილობა მაგნიტური ველის ფუნდამენტური თვისებაა. ეს გამოხატულებაა იმისა, რომ მაგნიტურ ველს არა აქვს წყარო. ელექტრული მუხტის მსგავსი მაგნიტური მუხტი ბუნებაში არ არსებობს.

**მაგნიტური ნაკადი.** მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი მაგნიტურ ველს ახასიათებს სივრცის თითოეულ წერტილში. შემოვიღოთ კიდევ ერთი სიდიდე, რომელიც დამოკიდებულია ვექტორის მოდულის მნიშვნელობაზე ოღონდ არა ერთ წერტილში, არამედ იმ ზედაპირის ყველა წერტილში, რომელიც ბრტყელი ჩაკეტილი კონტურით არის შემოსაზღვრული.

ამისათვის განვიხილოთ ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მოთავსებული ბრტყელი შეკრული გამტარი (კონტური), რომლის ზედაპირის ფართობია  $S$ . გამტარის სიბრტყის  $\vec{n}$  ნორმალ მაგნიტური ინდუქციის  $\vec{B}$  ვექტორის მიმართულებასთან  $\alpha$  კუთხეს ქმნის (სურ. 213). ზედაპირის გამჭოლი  $\Phi$  მაგნიტური ინდუქციის ნაკადი ეწოდება სიდიდეს, რომელიც ტოლია მაგნიტური ინდუქციის  $\vec{B}$  ვექტორის მო-



დულის ნამრავლისა  $S$  ფართობსა და  $\vec{B}$  და  $\vec{n}$ -ს (ზედაპირის ნორმალს) შორის არსებული  $\alpha$  კუთხის კოსინუსზე:

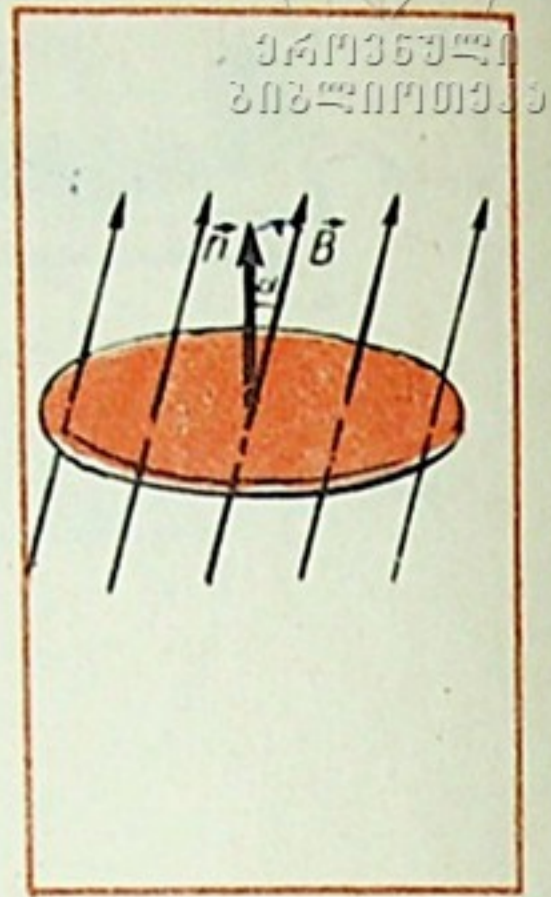
$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (11.2)$$

$B \cos \alpha = B_n$  ნამრავლი არის მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის გეგმილი კონტურის სიბრტყის ნორმალზე. ამიტომ

$$\Phi = B_n S. \quad (11.3)$$

მაგნიტური ნაკადი შეიძლება განვმარტოთ როგორც სიდიდე, რომელიც ზედაპირის  $S$  ფართობის გამჭოლ მაგნიტური ინდუქციის წიბთა რაოდენობის პროპორციულია.

მაგნიტური ნაკადის ერთეულია ვებერი. 1 ვებერი (1 ვბ) მაგნიტური ნაკადი იქმნება 1 ტლ ინდუქციის მქონე ერთგვაროვანი მაგნიტური ველით 1 მ<sup>2</sup> ფართობის ზედაპირზე, რომელიც მართობულია მაგნიტური ინდუქციისადმი.



სურ. 213.

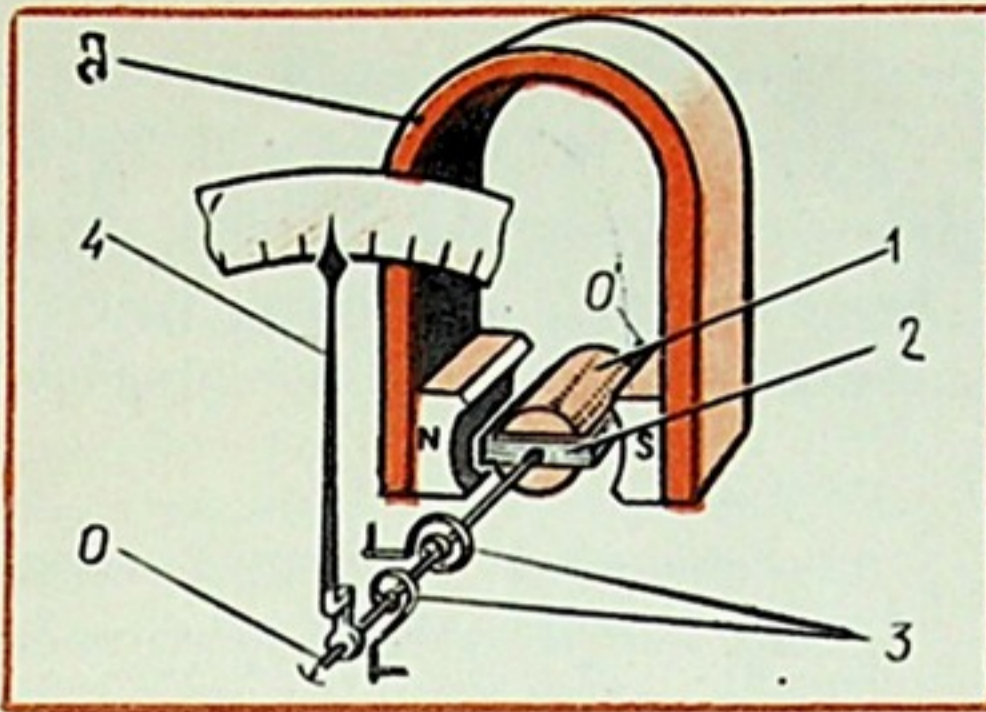
## 87. ელექტროგამზომი ხელსაწყოები

დენიან კონტურზე მაგნიტური ველის მაორიენტირებელი მოქმედება გამოყენებულია მაგნიტოელექტრული სისტემის ელექტროგამზომ ხელსაწყოებში — ამპერმეტრსა და ვოლტმეტრში.

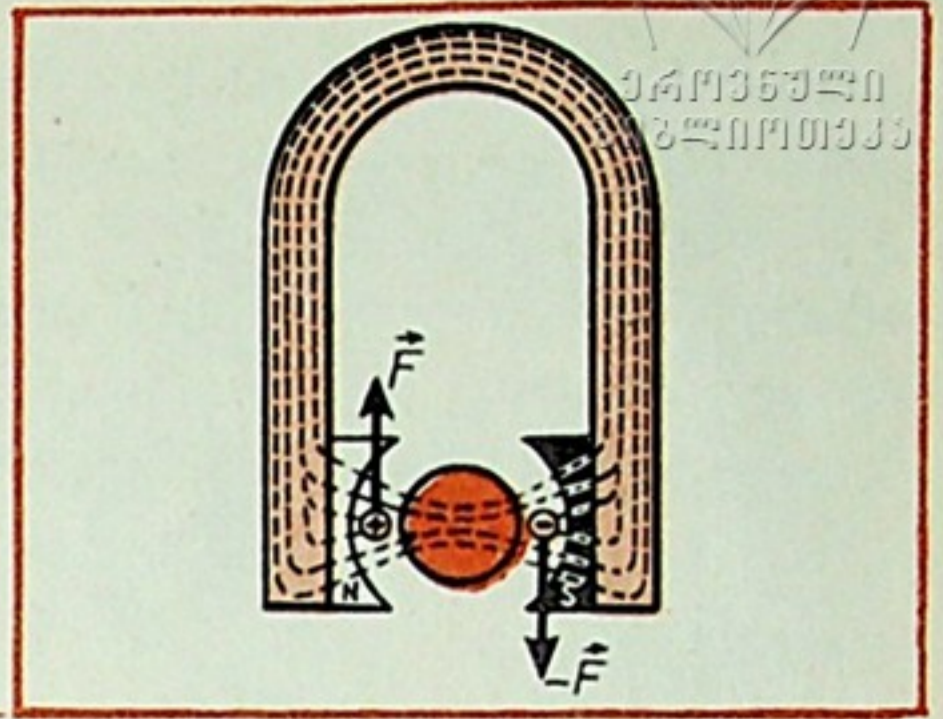
ამ სისტემის გამზომი ხელსაწყო შემდეგნაირად არის მოწყობილი (სურ. 214). მართკუთხა ფორმის ალუმინის მსუბუქ ჩარჩოზე (2), რომელზედაც მიმაგრებულია ისარი (4), დახვეულია კოჭა. ჩარჩო დამაგრებულია ორ ნახევარღერძზე (00'). წონასწორობის მდებარეობაში მას აკავებს წვრილი სპირალური ზამბარები (3). ზამბარის მხრივ მოქმედი დრეკადობის ძალთა მომენტი, რომელიც კოჭას წონასწორობის მდებარეობაში აბრუნებს, პროპორციულია წონასწორობის მდებარეობიდან ისრის გადახრის კუთხისა. კოჭას ათავსებენ სპეციალური ფორმის ბუნიკებიან მუდმივი მაგნიტის პოლუსებს შორის.

კოჭას შიგნით რბილი რკინისგან დამზადებული ცილინდრია მოთავსებული (1). ასეთი კონსტრუქცია უზრუნველყოფს მაგნიტური ინდუქციის წირების რადიალურ მიმართულებას იმ არეში, სადაც კოჭას ხვდება მოთავსებული (სურ. 215). ამის შედეგად კოჭას ნებისმიერ მდებარეობაში მაგნიტური ველის მხრივ მასზე მოქმედი მომენტი მაქსიმალურია და დენის ძალის მუდმივობისას ერთი და იგივეა.





სურ. 214.



სურ. 215.

$\vec{F}$  და  $-\vec{F}$  ვექტორები გამოსახავს ძალებს, რომლითაც მაგნიტური ველი მოქმედებს კოჭაზე და ქმნის კოჭას მბრუნებელ მომენტს. დენიანი კოჭა შემობრუნდება მანამდე, სანამ ზამბარის მხრივ მოქმედი დრეკადობის ძალთა მომენტი არ გააწონასწორებს იმ ძალთა მომენტს, რომლითაც მაგნიტური ველი მოქმედებს ჩარჩოზე<sup>1</sup>. ვნახავთ, რომ დენის ძალის ორჯერ გადიდებით ისარი შემობრუნდება ორჯერ მეტი კუთხით და ა. შ. ეს იმიტომ ხდება, რომ მაგნიტური ველის მხრივ კოჭაზე მოქმედი  $M$  მაქსიმალური მომენტი დენის ძალის პროპორციულია:  $M \sim I$ . ეს საშუალებას გვაძლევს სათანადოდ დაგრაღუირებული ხელსაწყოთი გავზომოთ დენის ძალა კოჭას შემობრუნების კუთხით. დაგრაღუირებისათვის საჭიროა დავადგინოთ, თუ ისრის შემობრუნების რა კუთხეებს შეესაბამება დენის ძალის ცნობილი მნიშვნელობები.

- 9 1. როგორ ძალას ეწოდება მაგნიტური? 2. ჩამოთვალეთ მაგნიტური ველის ძირითადი თვისებები. 3. როგორ მოძრაობს დენიანი ჩაკეტილი კონტური და მაგნიტური ისარი ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში? 4. რა წესით განისაზღვრება მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მიმართულება? 5. როგორ განისაზღვრება მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდული? 6. რას ეწოდება მაგნიტური ინდუქციის წირები? 7. როგორ ველს ეწოდება გარიგალური? 8. რას ეწოდება მაგნიტური ინდუქციის ნაკადი? 9. როგორია მაგნიტოელექტრული სისტემის გამზომი ხელსაწყოების მოქმედების პრინციპი?

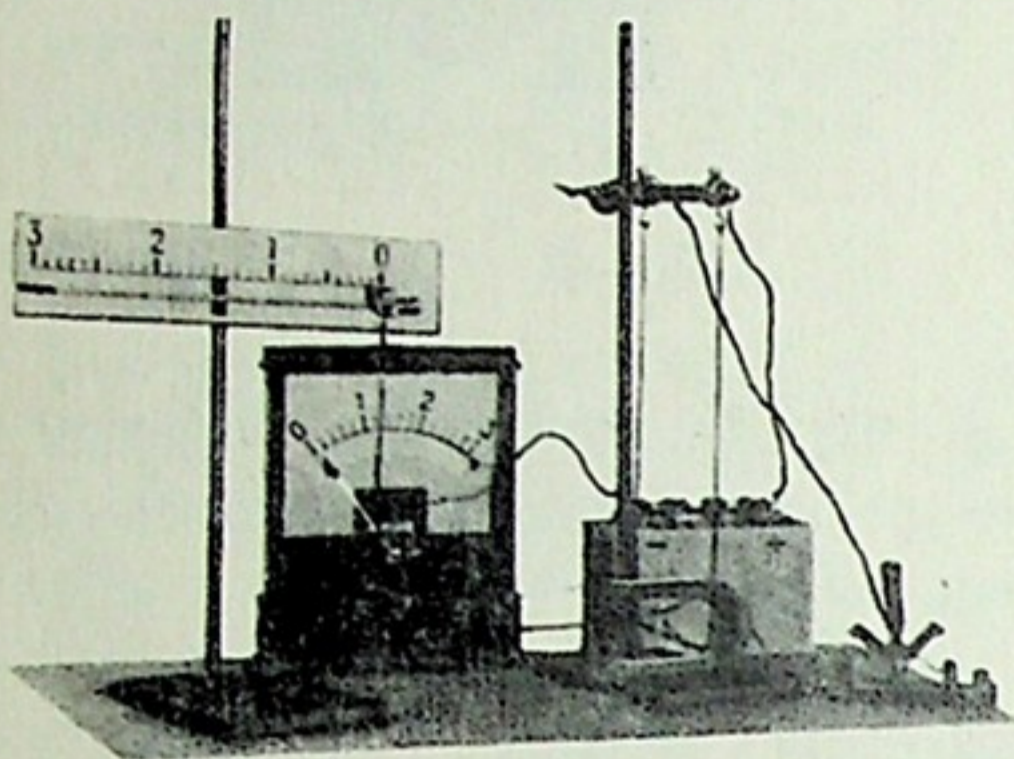
## 88. ამპერის კანონი

მაგნიტური ველი მოქმედებს დენიანი გამტარის ყველა უბანზე.

<sup>1</sup> თუ კონტური რამდენიმე ხვიისგან შედგება, მაშინ, ცხადია, კონტურზე მოქმედი ძალთა მომენტი ხვიათა  $N$  რიცხვის პროპორციული იქნება (მაგნიტური ველი თითოეულ ხვიაზე ერთნაირად მოქმედებს,  $N$  ხვიისგან შემდგარ კონტურზე იმოქმედებს  $N$ -ჯერ მეტი მომენტი).



გამტარის ცალკეულ უბანზე (დენის ელემენტზე) მოქმედი ძალის განმსაზღვრელი კანონი დაადგინა ამპერმა 1820 წ. ჩადგან დენის განცალკევებული ელემენტის შექმნა არ შეიძლება, ამპერი ცდებს ატარებდა შეკრული გამტარებით. ცდების დროს გამტართა ფორმისა და მდებარეობის შეცვლით მან დაადგინა დენის ცალკეულ ელემენტზე მოქმედი ძალის გამოსახულება.



სურ. 216.

**ამპერის ძალის მოდული.**  
 თუ რაზეა დამოკიდებული მაგნიტურ ველში დენიან გამტარზე მოქმედი ძალა, შეიძლება გამოვარკვიოთ 216-ე სურათზე გამოსახული დანადგარის საშუალებით.

მაგნიტური ველი იქმნება მუდმივი მაგნიტით და მოქმედებს ძირითადად პორიზონტალურ გამტარზე. ძალა იზომება სპეციალური სასწორით, რომელიც

მელიც გამტართან დაკავშირებულია ორი ღეროთი.

ეს დენის ძალას ორჯერ გავზრდით, შევამჩნევთ, რომ გამტარზე მოქმედი ძალაც ორჯერ გაიზრდება. კიდევ ერთი მაგნიტის დამატებით დაახლოებით ორჯერ გავადიდებთ გამტარის იმ ნაწილის სიგრძეს, რომელზეც მაგნიტური ველი მოქმედებს. ამ დროს ძალაც დაახლოებით ორჯერ გაიზრდება. სხვადასხვა მაგნიტის გამოყენებით დავადგენთ, რომ მაგნიტური ძალა, (ამპერის ძალა)  $\vec{F}$  ვექტორის მოდულის პირდაპირპროპორციულია.

დაბოლოს, ამპერის ძალა დამოკიდებულია კუთხეზე, რომელსაც  $\vec{B}$  ვექტორი ადგენს გამტართან. ამაში დავრწმუნდებით, თუ მაგნიტის ქვესადგამის დახრილობას ვცვლით ისე, რომ იცვლებოდეს კუთხე გამტარსა და მაგნიტური ინდუქციის წირებს შორის.

რა თქმა უნდა, ყველა ჩვენს დასკვნას თვისებრივი ხასიათი აქვს. ახლა კი ზუსტად ჩამოვაყალიბოთ ამპერის კანონი.

ვთქვათ,  $\vec{B}$  ვექტორი დენიანი გამტარის მონაკვეთის (დენის ელემენტის) მიმართულებასთან  $\alpha$  კუთხეს ადგენს (სურ. 217). (დენის ელემენტის მიმართულებად თვლიან გამტარში გამავალი დენის მიმართულებას). ცდა გვიჩვენებს, რომ მაგნიტური ველი, რომლის ინდუქციის ვექტორი დენიანი გამტარის გასწვრივ არის მიმართული, არ მოქმედებს დენზე. ამიტომ ძალის მოდული დამოკიდებულია მხო-



ანდრე მარი ამპერი (1775—1836) გამოჩენილი ფრანგი ფიზიკოსი და მათემატიკოსი. იგი ელექტროდინამიკის ერთ-ერთი ფუძემდებელია. ამპერმა ფიზიკაში შემოიტანა ცნება „ელექტრული დენი“ და ააგო მაგნეტიზმის პირველი თეორია, რომელიც მოლეკულური დენების ჰიპოთეზაზე იყო დამყარებული. მანვე აღმოაჩინა ელექტრული დენების მექანიკური ურთიერთქმედება და დაადგინა ამ ურთიერთქმედების ძალის რაოდენობრივი თანაფარდობანი. მაქსველმა ამპერს ელექტრობის „ნიუტონი“ უწოდა. ამპერი მუშაობდა აგრეთვე მექანიკის, ალბათობის თეორიისა და მათემატიკური ანალიზის საკითხებზე.



ლოდ გამტარისადმი  $\vec{B}$  ვექტორის მართობი მდგენელის მოდულზე, და არ არის დამოკიდებული გამტარის გასწვრივ მიმართულ  $\vec{B}$  მდგენელზე.  $\vec{B}$  ინდუქციის მაგნიტურ ველში დენიანი გამტარის მცირე  $\Delta l$  მონაკვეთზე მოქმედი ძალის  $F$  მოდული გამოისახება ფორმულით:

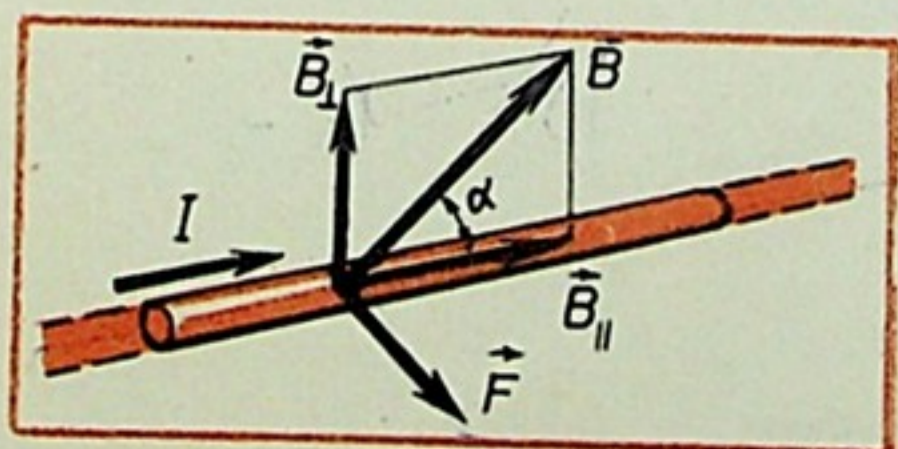
$$F = B I \Delta l \sin \alpha. \quad (11.4)$$

სადაც  $\alpha$  არის  $\vec{B}$  ვექტორის მიერ დენის ელემენტთან შედგენილი კუთხე. ამ გამოსახულებას ამპერის კანონი ეწოდება.

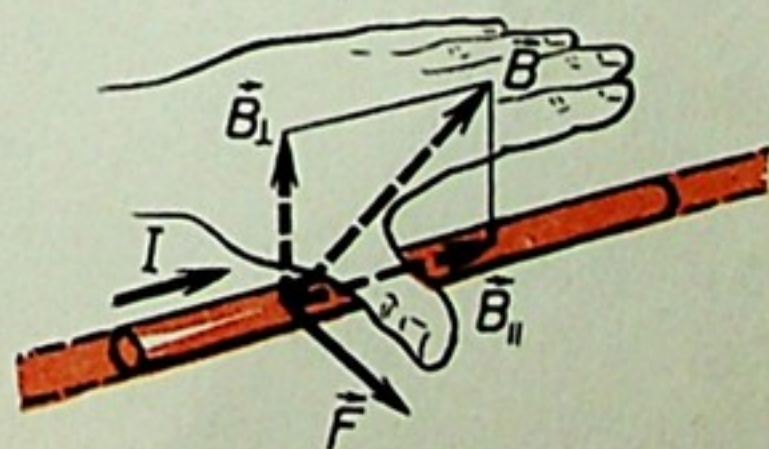
ამპერის ძალის მიმართულება, ზემოთ განხილულ ცდაში  $\vec{F}$  ვექტორი დენის ელემენტისა და  $\vec{B}$  ვექტორის მართობია.  $\vec{F}$ -ის მიმართულება მარცხენა ხელის წესით განისაზღვრება:

თუ მარცხენა ხელს ისე მოვათავსებთ, რომ ინდუქციის  $\vec{B}$  ვექტორის გამტარისადმი მართობი მდგენელი ხელის გულში შედიოდეს, ოთხი გაშლილი თითი კი დენის მიმართულებას გვიჩვენებდეს, მაშინ  $90^\circ$ -ით გაშლილი ცერი გამტარის მონაკვეთზე მოქმედი ძალის მიმართულებას გვიჩვენებს (სურ. 218).

ამპერის კანონის გამოყენება. თუ ვიცით გამტარის ნებისმიერ მონაკვეთზე მოქმედი ძალის მიმართულება და მოდული, შეიძლება



სურ. 217.



სურ. 218.



გამოვთვალოთ მთელ შეკრულ გამტარზე მოქმედი ძალა. ამისათვის საჭიროა ვიპოვოთ გამტარის ყველა უბანზე მოქმედ ძალთა ჯამი. ამპერის კანონის მართებულობას სავსებით ადასტურებს ის გარემოება, რომ ნებისმიერი შეკრულ გამტარისათვის ამ გზით გამოთვლილი მაჯამებელი ძალის მნიშვნელობა ემთხვევა ძალის ექსპერიმენტულად განსაზღვრულ მნიშვნელობას.

ამპერის კანონით სარგებლობენ იმ ძალის გამოთვლისას, რომელიც დენიან გამტარზე მოქმედებს ბევრ ტექნიკურ დანადგარში, კერძოდ, ელექტროძრავაში. ]

ყველა ელექტროძრავას მოქმედება დამყარებულია ამპერის ძალის გამოყენებაზე. ძრავას მბრუნავი ნაწილის (როტორის) გრაგნილში გადის ელექტრული დენი. მძლავრი ელექტრომაგნიტი ქმნის მაგნიტურ ველს, რომელიც დენიან გამტარზე მოქმედებს და აიძულებს მას იმოძრაოს. როტორს ამზადებენ ფოლადის ფირფიტებისაგან, ელექტრომაგნიტის პოლუსებს კი სპეციალურ ფორმას აძლევენ იმისათვის, რომ მაგნიტური ინდუქცია გააძლიეროს იმ ადგილებში, სადაც როტორის გრაგნილია მოთავსებული.

სპეციალური მოწყობილობის საშუალებით დენი ისეთ მიმართულებასღებულობს გრაგნილში, რომ მაგნიტური ურთიერთქმედება როტორის უწყვეტი ბრუნვის გამომწვევ ძალის მომენტს ქმნის.

### 89. მაგნიტური ველის მოქმედება მოძრავ მუხტზე. ლორენცის ძალა

ელექტრული დენი წარმოადგენს მოწესრიგებულად მოძრავ დამუხტულ ნაწილაკთა ერთობლიობას. ამიტომ დენიან გამტარზე მაგნიტური ველის მოქმედება შედეგია ველის მოქმედებისა მოძრავ დამუხტულ ნაწილაკებზე გამტარის შიგნით.

ძალას, რომლითაც მაგნიტური ველი მოქმედებს მოძრავ დამუხტულ ნაწილაკზე, ლორენცის ძალა ეწოდება. ძალას ასე ეწოდა დიდი პოლანდიელი ფიზიკოსის, ნივთიერების აგებულების ელექტრონული თეორიის ფუძემდებლის გ. ლორენცის პატივსაცემად. ეს ძალა შეიძლება ვიპოვოთ ამპერის კანონის მეშვეობით. ლორენცის ძალის მოდული ტოლია გამტარის  $\Delta l$  სიგრძის უბანზე მოქმედი ძალის მოდულის ფარდობისა ამ უბანში მოწესრიგებულად მოძრავი დამუხტული ნაწილაკების  $N$  რიცხვთან.

$$F_{\text{ლ}} = \frac{F}{N} \quad (11.5)$$



ტანვიხილოთ დენიანი, წვრილი წრფივი გამტარის მონაკვეთი (სურ. 219). ვთქვათ, გამტარის მონაკვეთის  $\Delta l$  სიგრძე და განვიცვეთის  $S$  ფართობი იმდენად მცირეა, რომ მაგნიტური ინდუქციის  $\vec{B}$  ვექტორი შეიძლება უცვლელად ჩავთვალოთ გამტარის მონაკვეთის ფარგლებში. გამტარში გაძვარი  $I$  დენის ძალა დაკავშირებულია  $q_0$  ნაწილაკის მუხტთან, დამუხტული ნაწილაკების  $n$  კონცენტრაციასთან. (მუხტების რიცხვთან მოცულობის ერთეულში) და მათი მოწესრიგებული მოძრაობის  $v$  სიჩქარესთან. (იხ. § 56):

$$I = q_0 n v S. \quad (11.6)$$

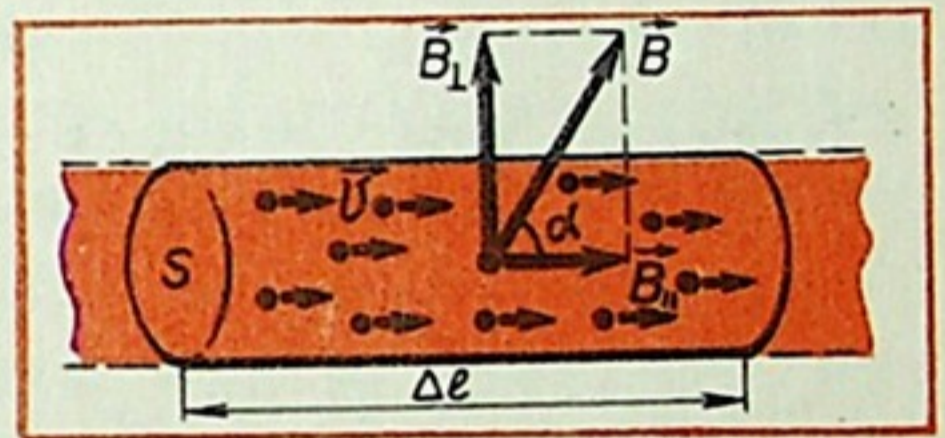
მაგნიტური ველის მხრივ დენის არჩეულ ელემენტზე მოქმედი ძალის მოდული ტოლია:

$$F = |I| \Delta l B \sin \alpha.$$

წავსვათ ამ ფორმულაში დენის ძალის (11.6) გამოსახულება, მივიღებთ:

$$F = |q_0| n v S \Delta l B \sin \alpha = \\ = v |q_0| N B \sin \alpha,$$

სადაც  $N = n S \Delta l$  დამუხტულ ნაწილაკთა რიცხვია განსახილველ მოცულობაში. მაშასადამე, თითოეულ მოძრავ მუხტზე მაგნიტური ველი მოქმედებს ლორენცის ძალით



სურ. 219.

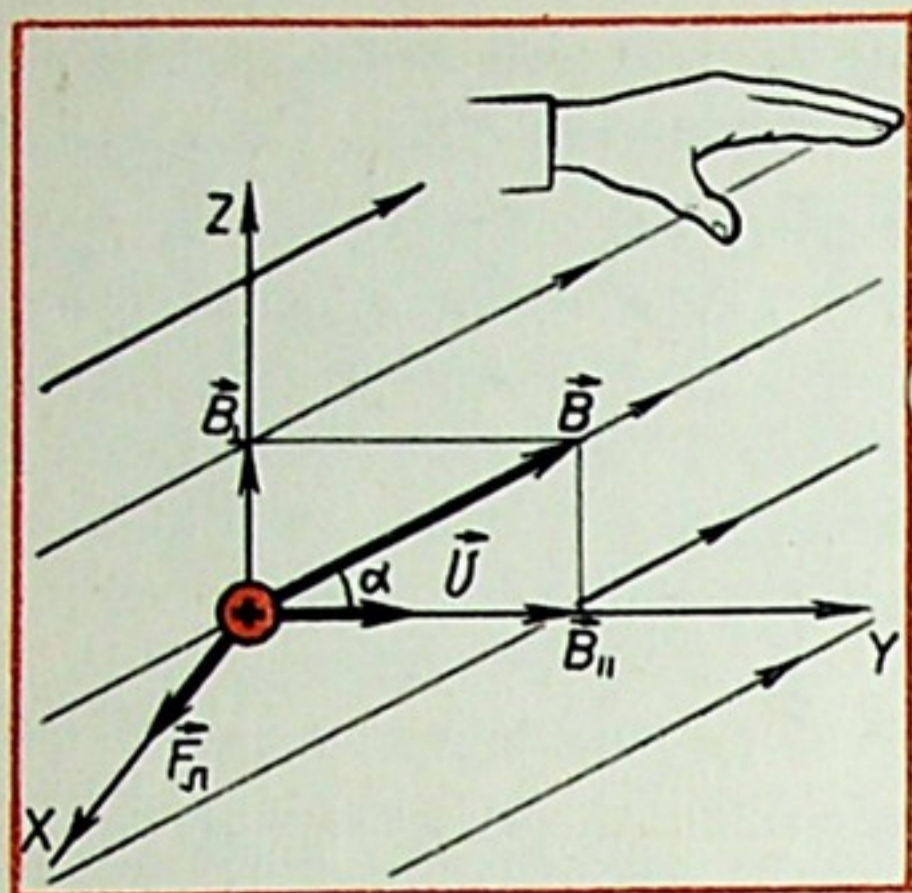
$$F_{\text{ლ}} = \frac{F}{N} = |q_0| v B \sin \alpha, \quad (11.7)$$

სადაც  $\alpha$  კუთხეა სიჩქარის ვექტორსა და მაგნიტური ინდუქციის ვექტორს შორის.

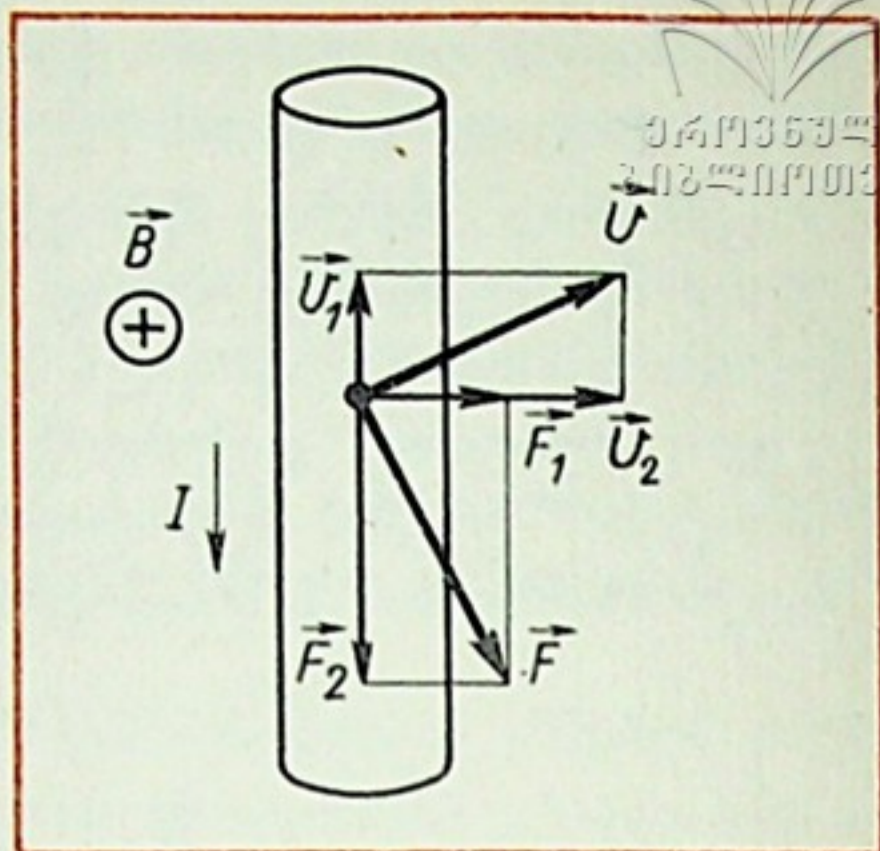
ლორენცის ძალა მართობია  $\vec{B}$  და  $\vec{v}$  ვექტორებისა და მისი მიმართულება განისაზღვრება მარცხენა ხელის იმავე წესით, რომლითაც ამპერის ძალის მიმართულება.

ესე მარცხენა ხელს ისე მოვათავსებთ, რომ  $\vec{B}$  ვექტორის მუხტის სიჩქარისადმი მართობი მდგენელი ხელის გულში შედიოდეს, ოთხი თითი კი მიმართული იყოს დადებითი მუხტის მოძრაობის მიმართულებით (უარყოფითის მოძრაობის საპირისპიროდ), მაშინ  $90^\circ$ -ით გაშლილი ცერი გვიჩვენებს მუხტზე მოქმედი  $F_{\text{ლ}}$  ლორენცის ძალის მიმართულებას (სურ. 220).





სურ. 220.



სურ. 221.

ელექტრული ველი  $q_0$  მუხტზე მოქმედებს  $\vec{F}_{\text{ელ}} = q_0 \vec{E}$  ძალით. მაშ, თუ არის ელექტრული ველიც და მაგნიტური ველიც, მუხტზე მოქმედი სრული ძალა<sup>1</sup> ტოლი იქნება:

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{ელ}} + \vec{F}_{\text{ლ}} \quad (11.8)$$

ზრადგანაც ლორენცის ძალა მართობია ნაწილაკის სიჩქარისა, ამიტომ იგი მუშაობას არ ასრულებს. კინეტიკური ენერჯის შესახებ არსებული თეორემის (იხ. IX კლასის ფიზიკის სახელმძღვანელო) თანახმად ეს ნიშნავს, რომ ლორენცის ძალა ნაწილაკის კინეტიკურ ენერჯიას არ ცვლის, მაშასადამე, არ ცვლის ნაწილაკის სიჩქარის მოდულს. ლორენცის ძალის მოქმედებით იცვლება მხოლოდ ნაწილაკის სიჩქარის მიმართულება. ისმის ბუნებრივი კითხვა: რატომღა ასრულებს ელექტროძრავა მუშაობას? ღუზის გრაგნილის გამტარებს ხომ მაგნიტური ძალები (სურ. 221) ამოძრავებს.

221-ე სურათზე გამოსახულია ელექტროძრავას ღუზის გამტარი მაგნიტურ ველში. ველის მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი მართობულია ნახაზის სიბრტყისა და მიმართულია ჩვენგან. გამტარში გადის  $I$  დენი ზევიდან ქვევით. ელექტრონები მოძრაობენ ქვევიდან ზევით  $\vec{v}_1$  სიჩქარით (გამტარის მიმართ). თვითონ გამტარი მოძრაობს მარჯვნივ  $\vec{v}_2$  სიჩქარით. ელექტრონის  $\vec{v}$  ჯამური სიჩქარე მიმართულია კუთხით გამტარისადმი.  $\vec{F}_{\text{ლ}}$  ლორენცის ძალა  $\vec{v}$  სიჩქარის მართობულია და მისი მუშაობა ნულის ტოლია. დავშალოთ ეს ძალა ორ

<sup>1</sup> ხშირად ლორენცის ძალას უწოდებენ (11.8) ფორმულით გამოსახულ სრულ ძალას, რომლითაც ელექტრომაგნიტური ველი მოქმედებს დამუხტულ ნაწილაკზე. ამ შემთხვევაში (11.7) ძალას ლორენცის ძალის მაგნიტური ნაწილი ეწოდება.



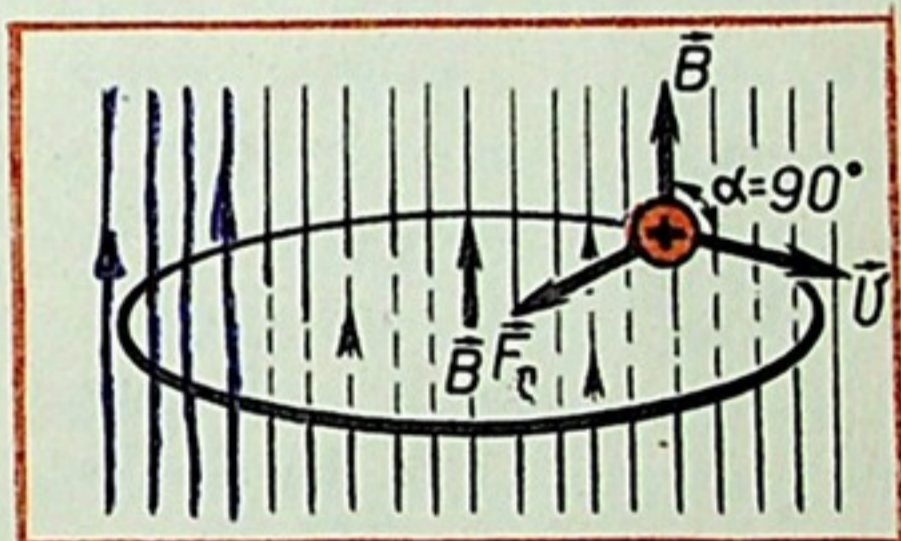
მდგენელად  $\vec{F}_2$  და  $\vec{F}_1$  გამტარის გასწვრივ და მართობულად.  $\vec{F}_1$  მდგენელი  $\vec{v}_2$  სიჩქარის მდგენელის გასწვრივაა მიმართული და დადებით მუშაობას ასრულებს გამტარის გადაადგილებაზე.  $\vec{F}_2$  ძალის  $\vec{F}_1$  მდგენელი ამუხრუჭებს ელექტრონებს და ასრულებს უარყოფით მუშაობას.  $\vec{F}_1$  ძალის დადებითი მუშაობა მოდულით  $\vec{F}_2$  ძალის უარყოფითი მუშაობის ტოლია.

ელექტრონები გამტარში დამუხრუჭებულად მოძრაობენ წყაროს მუშაობის ხარჯზე. სწორედ წყაროს ემ ძალა იძლევა ენერგიას, რომელიც საჭიროა ელექტროძრავას მიერ მუშაობის შესასრულებლად.

მოძრავ ელექტრონებზე ლორენცის ძალის მოქმედებას შევნიშნავთ, თუ ელექტრონ-სხივურ მილაკთან მივიტანთ ელექტრომაგნიტს (ან მუდმივ მაგნიტს). თუ დენს ვცვლით ელექტრომაგნიტში, შევამჩნევთ, რომ ელექტრონული სხივის გადახრა იზრდება მაგნიტური ინდუქციის  $B$  მოდულის ზრდასთან ერთად. ელექტრომაგნიტში დენის მიმართულების შეცვლისას სხივი მოპირდაპირე მხარეს გადაიხრება.

ლორენცის ძალის დამოკიდებულება  $\vec{B}$  და  $\vec{v}$  ვექტორებს შორის შექმნილ  $\alpha$  კუთხეზე ცხადი გახდება, თუ დავაკვირდებით ელექტრონული სხივის წანაცვლებას კუთხის ცვლილებისას მაგნიტის ღერძსა და ელექტრონული მილაკის ღერძს შორის.

დამუხრუჭებული ნაწილაკის მოძრაობა ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში. ზგანვიხილოთ  $q_0$  მუხტის ნაწილაკის მოძრაობა  $B$  ინდუქციის ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში, რომელიც მიმართულია ნაწილაკის  $\vec{v}$  საწყისი სიჩქარის მართობ (სურ. 222). ჯლორენცის



სურ. 222.

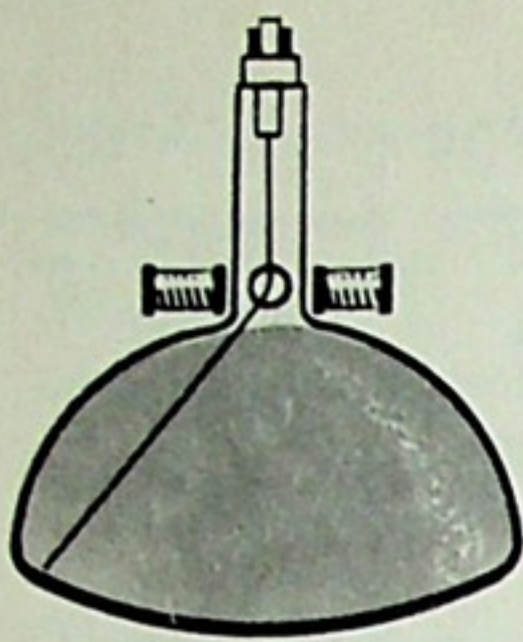
ძალა დამოკიდებულია ნაწილაკის სიჩქარის მოდულსა და ველის ინდუქციაზე. ზრადგან მაგნიტური ველი არ ცვლის სიჩქარის მოდულს, ამიტომ უცვლელი რჩება ლორენცის ძალის მოდულიც. ეს ძალა მართობია სიჩქარისა და, მაშასადამე, განსაზღვრავს ნაწილაკის ცენტრისკენულ აჩქარებას. მოდულით მუდმივი სიჩქარით მოძრავი ნაწილაკის ცენტრისკენული აჩქარების მოდულის უცვლელობა ნიშნავს, რომ ნაწილაკი თანაბრად მოძრაობს  $r$  რადიუსის წრეწირზე. განვსაზღვროთ ეს რადიუსი. ნიუტონის მეორე კანონის თანახმად (სურ. 222).

$$m \frac{v^2}{r} = |q_0| v B,$$

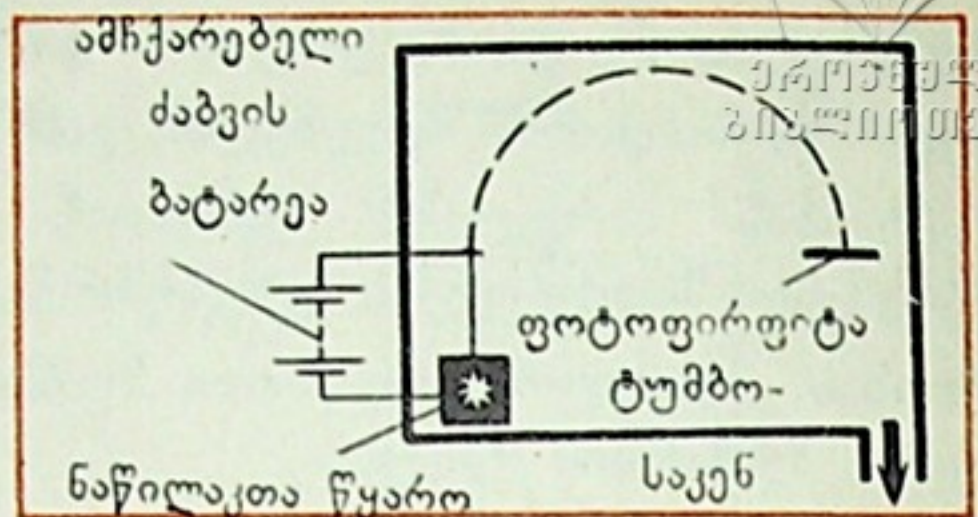
აქედან

$$r = \frac{mv}{|q_0| B} \quad (11.9)$$

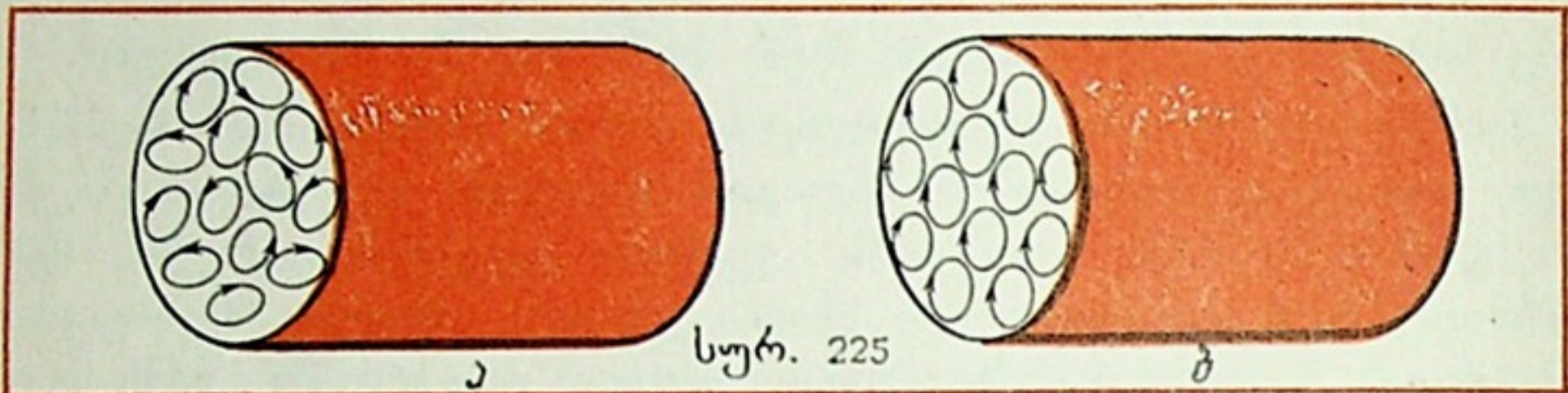




სურ. 223.



სურ. 224.



**ლორენცის ძალის გამოყენება.** მოძრავ მუხტზე მაგნიტური ველის მოქმედებას ფართოდ იყენებენ თანამედროვე ტექნიკაში. საკმარისია გავიხსენოთ სატელევიზიო მილაკი (კინესკოპი), რომელშიც ეკრანისაკენ მსრბოლი ელექტრონები გადაიხრება განსაკუთრებული კოჭებით აღძრული მაგნიტური ველის მოქმედებით (სურ. 223).

მაგნიტური ველის მოქმედებამ სხვა გამოყენება ჰპოვა ხელსაწყოებში, რომელთა საშუალებითაც ხდება დამუხტული ნაწილაკების განცალკევება კუთრი მუხტის (ე. ი. ნაწილაკის მასისა და მუხტის შეფარდების) მიხედვით. **მა** მიღებული შედეგებით მათი მასის ზუსტი განსაზღვრა. **სამ** ხელსაწყოს მას-სპექტროგრაფი უწოდეს. **ს**

224-ე სურათზე გამოსახულია უმარტივესი მას-სპექტროგრაფის პრინციპული სქემა. ხელსაწყოს ვაკუუმიანი კამერა მოთავსებულია მაგნიტურ ველში ( $\vec{B}$  ინდუქციის ვექტორი სურათის მართობია). ელექტრული ველით აჩქარებულ დამუხტული ნაწილაკები (ელექტრონები, იონები) რკალის შემოწერის შემდეგ ხვდებიან ფოტოფირფიტაზე, სადაც ტოვებენ კვალს. ეს კვალი საშუალებას გვაძლევს დიდი სიზუსტით გავზომოთ მისი  $r$  რადიუსი და მიღებული შედეგის მიხედვით განვსაზღვროთ იონის კუთრი მუხტი. თუ ვიცით იონის მუხტი, ადვილად გავიგებთ მის მასას.

- 9
1. რას უდრის ამპერის ძალის მოდული?
  2. ჩამოაყალიბეთ ამპერის ძალის მიმართულების განმსაზღვრელი წესი.
  3. ჩამოაყალიბეთ ლორენცის ძალის მიმართულების განმსაზღვრელი წესი.
  4. რას უდრის ლორენცის ძალის მოდული?
  5. რატომ არ ცვლის ლორენცის ძალა დამუხტული ნაწილაკის სიჩქარის მოდულს?
  6. როგორ მოძრაობს დამუხტული ნაწილაკი ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში, თუ ნაწილაკის საწყისი სიჩქარე მაგნიტური ინდუქციის წირების მართობულია?



**მაგნიტური შეღწევადობა.** ვიცით, რომ მაგნიტურ ველს ქმნის არა მხოლოდ ელექტრული დენი, არამედ მუდმივი მაგნიტიც. მუდმივი მაგნიტი მხოლოდ ზოგიერთი ნივთიერებისაგან შეიძლება დამზადდეს, მაგნიტურ ველში მოთავსებისას კი ყველა ნივთიერება მაგნიტდება, ე. ი. თვითონ ქმნის მაგნიტურ ველს. ამის გამო, ერთგვაროვან გარემოში მაგნიტური ინდუქციის  $\vec{B}$  ვექტორი განსხვავდება სივრცის იმავე წერტილის  $\vec{B}_0$  ვექტორისაგან ვაკუუმში.

$\frac{B}{B_0} = \mu$  ფარდობას, რომელიც გარემოს მაგნიტურ თვისებებს ახასიათებს, გარემოს მაგნიტური შეღწევადობა უწოდეს. ამრიგად, ერთგვაროვან გარემოში მაგნიტური ინდუქცია ტოლია:

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0, \quad (11.10)$$

სადაც  $\mu$  მოცემული გარემოს მაგნიტური შეღწევადობაა<sup>1</sup>.

**ამპერის ჰიპოთეზა.** თუ რატომ აქვს სხეულს მაგნიტური თვისებები, პირველად ფრანგმა მეცნიერმა ამპერმა გამოარკვია. დენიან გამტართან ახლოს მიტანილი მაგნიტური ისრის შემობრუნებაზე დაკვირვებით (ერსტედის ცდა) მიღებული უშუალო შთაბეჭდილებათა გავლენით, ამპერმა თავდაპირველად ივარაუდა, რომ დედამიწის მაგნეტიზმი გამოწვეულია მისი სფეროს შიგნით გამავალი დენებით. მთავარი ნაბიჯი გადაიდგა: სხეულის მაგნიტური თვისებები შეიძლება აიხსნას დენებით, რომლებიც მასში ცირკულირებენ. შემდეგ ამპერი მივიდა ზოგად დასკვნამდე: ნებისმიერი სხეულის მაგნიტური თვისებები განისაზღვრება მის შიგნით არსებული შეკრული ელექტრული დენებით. ამპერმა არა მარტო შეძლო სხეულთა მაგნიტური თვისებების დენებით ახსნა, არამედ უფრო მეტიც, მან დაამტკიცა, რომ მაგნიტური ურთიერთქმედება დენების ურთიერთქმედებაა.

ამპერის ჰიპოთეზის თანახმად მოლეკულებსა და ატომებში ცირკულირებენ ელემენტარული ელექტრული დენები (ამჟამად კარგად

<sup>1</sup> (11.10) ფორმულა მართებულია მხოლოდ ერთგვაროვანი გარემოსათვის, რომელიც მთელ სივრცეს ავსებს, ან იმ შემთხვევისათვის, როცა სხეულს განსაკუთრებული სიმეტრია ახასიათებს (მაგალითად, ერთგვაროვანი დერო სოლენოიდის შიგნით). თუ სხეულს ნებისმიერი ფორმა აქვს, მაშინ  $\vec{B}_0$  ინდუქციის მაგნიტურ ველში შეტანისას ინდუქცია ნივთიერებაში აღარ განისაზღვრება (11.10) ფორმულით.  $\vec{B}$ -სა და  $\vec{B}_0$  შორის დამოკიდებულება გაცილებით რთულია და განისაზღვრება სხეულის ფორმითა და  $\vec{B}_0$ -ის მიმართ მისი ორიენტაციით.



ვიციტ, რომ ეს დენები იქმნება ატომებში ელექტრონთა მოძრაობის შედეგად).

თუ ამ დენტა ცირკულაციის სიბრტყეები მოლეკულების უწყესრიგო სითბური მოძრაობის გამო, ერთმანეთისადმი ქაოსურადაა განლაგებული (სურ. 225, ა), მაშინ მათი მოქმედება ერთმანეთს აბათილებს, და სხეული არავითარ მაგნიტურ თვისებას არ ამჟღავნებს. დასამაგნიტებელ მდგომარეობაში ელემენტარული დენები სხეულში ისეა განლაგებული, რომ მათი მოქმედება იკრიბება (სურ. 225, ბ).

ამპერის ჰიპოთეზა გვიხსნის, თუ რატომ იქცევა ერთნაირად მაგნიტურ ველში მაგნიტური ისარი და დენიანი ჩარჩო (კონტური) (იხ. § 84). ისარს განვიხილავთ როგორც ისეთი პატარა დენიანი კონტურების ერთობლიობას, რომლებიც ერთნაირადაა ორიენტირებული.

დიდი მაგნიტური შეღწევადობის ( $\mu \gg 1$ ) სხეულებს ფერომაგნიტური ეწოდება (რკინა, კობალტი, ნიკელი, გადოლინიუმი და მრავალი შენადნობი). ამ სხეულებში მაგნიტური ველი იქმნება არა ბირთვის ირგვლივ ელექტრონების ბრუნვით, არამედ „საკუთარი ბრუნვის“ შედეგად. ელექტრონი ყოველთვის თითქოს ბრუნავს თავისი ღერძის გარშემო და რადგანაც მუხტი აქვს, ქმნის მაგნიტურ ველს იმ ველთან ერთად, რომელიც ელექტრონის ორბიტალური მოძრაობით იქმნება<sup>1</sup>.

**კიურის ტემპერატურა.** ყოველი ფერომაგნეტიკისთვის არსებობს ტემპერატურის გარკვეული მნიშვნელობა, რომლის ზემოთ ის კარგავს ფერომაგნიტურ თვისებებს.

ამ ტემპერატურას კიურის ტემპერატურა ეწოდება, მოვლენის აღმომჩენი ფრანგი მეცნიერის პატივსაცემად. თუ დამაგნიტებულ ლურსმანს ძლიერ გავახურებთ, ის დაკარგავს რკინის საგნების მიზიდვის უნარს. რკინისათვის კიურის ტემპერატურაა 753°C, ნიკელისათვის 365°C, კობალტისათვის კი 1000°C. არსებობს ისეთი ფერომაგნიტური შენადნობები, რომელთა კიურის ტემპერატურა 100°C-ზე ნაკლებია.

ფერომაგნეტიკთა მაგნიტური თვისებები პირველად დეტალურად გამოიკვლია გამოჩენილმა რუსმა ფიზიკოსმა ა. სტოლეტოვმა (1839—1896).

**ფერომაგნეტიკები და მათი გამოყენება.** თუმცა ფერომაგნიტური სხეულები ბუნებაში არც ისე ბევრია, მაგრამ სწორედ მათ აქვთ ყველაზე დიდი პრაქტიკული გამოყენება. დენიან კოჭაში რკინის ან

<sup>1</sup> ვამბობთ „თითქოს ბრუნავს“, რადგანაც ელექტრონი თავისი თვისებებით არ ემსგავსება ძალიან პატარა ბურთულას. მისი მოძრაობა ემორჩილება კვანტური მექანიკის კანონებს და არა ნიუტონის კლასიკურ მექანიკას. ელექტრონის საკუთარი ბრუნვის მომენტს (იმპულსის მომენტს) სპინი ეწოდება.



ფოლადის გულარის ჩადგმით კოჭას მიერ შექმნილი მაგნიტური ველი კოჭაში დენის შეუცვლელად შეიძლება რამდენჯერმე გავაძლიეროთ. ტრანსფორმატორების, გენერატორების, ელექტროძრავების და სხვა-თა გულარები ფერომაგნეტიკებისაგან მზადდება.

ფერომაგნეტიკების მაგნიტური შეღწევადობა მუდმივი არაა. ის დამოკიდებულია მაგნიტური ველის ინდუქციაზე.

გარე მაგნიტური ველის მოქმედების შეწყვეტისას ფერომაგნეტიკი დამაგნიტებული რჩება, ე. ი. ქმნის მაგნიტურ ველს გარემომცველ სივრცეში. ელემენტარული დენების მოწესრიგებული ორიენტაცია არ ისპობა გარე ველის მოსპობის შემდეგ. სწორედ ამიტომ არსებობს მუდმივი მაგნიტი.

მუდმივი მაგნიტი ფართოდაა გამოყენებული ელექტროგამზომ ხელსაწყოებში, ხმა-მალლამოლაპარაკესა და ტელეფონში, ხმის ჩამწერ აპარატში, მაგნიტურ კომპასში და ა. შ.

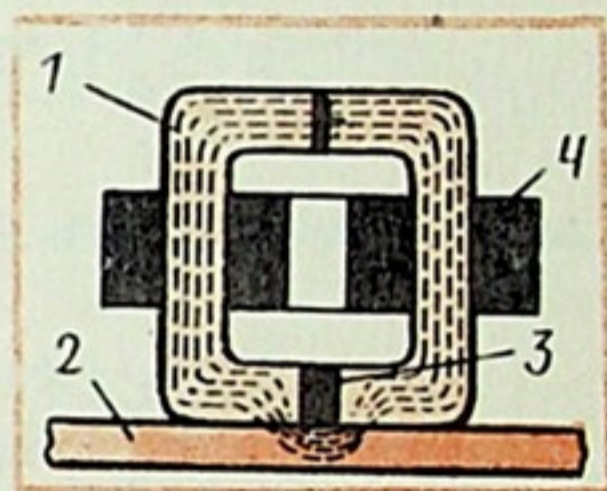
ამის შესახებ მოთხრობილია VIII კლასის ფიზიკის კურსში.

დიდი გამოყენება ჰპოვა ფერიტებმა — ფერომაგნიტურმა მასალებმა, რომლებიც დენს არ ატარებს. ისინი რკინის ოქსიდებისა და სხვა ნივთიერებათა ოქსიდების ქიმიური ნაერთია. ფერომაგნიტური მასალებიდან ადამიანმა ყველაზე პირველად გაიცნო მაგნიტური რკინაქვა, რომელიც ფერიტს წარმოადგენს.

**მაგნიტური ლენტები და მაგნიტური ფირები.** ფერომაგნეტიკებისაგან ამზადებენ მაგნიტურ ლენტებსა და თხელ მაგნიტურ ფირებს.

მაგნიტურ ლენტს ფართოდ იყენებენ ხმის ჩასაწერად და ვიდეო-ჩაწერისათვის. ლენტი მოქნილია და დამზადებულია პოლიქლორვინილისა ან სხვა ნივთიერებისაგან. მას უსვამენ მუშა ფენას — მაგნიტურ ლაქს, რომელიც რკინის ან სხვა ფერომაგნეტიკის ნემსოვან წვრილ ნაწილაკებსა და შემკვრელ ნივთიერებას შეიცავს.

ბგერა ლენტზე ჩაიწერება ელექტრომაგნიტის საშუალებით. ელექტრომაგნიტის მაგნიტური ველი იცვლება ტაქტში ბგერით რხევებთან. მაგნიტური თავის მახლობლად ლენტის მოძრაობისას ფირის სხვადასხვა უბანი დამაგნიტდება (სურ. 226). ხმის აღწარმოებისას ხდება უკუპროცესი. დამაგნიტებული ლენტი მაგნიტურ თავზე აღძრავს ელ-



სურ. 226.  
მაგნიტური ინდუქციური თავის სქემა:

1 — ელექტრომაგნიტის გულარი, 2 — მაგნიტური ლენტი, 3 — საშუალო ღრიქი, 4 — ელექტრომაგნიტის ხვია.



ექტრულ სიგნალებს, რომლებიც გაძლიერების შემდეგ ხვდებიან მაგნიტოფონის დინამიკში<sup>1</sup>.

თხელი მაგნიტური ფირი შედგება ფერომაგნიტური მასალის ფენისაგან, რომლის სისქე 0,03-დან 10 მკმ-მდეა. მას იყენებენ კომპიუტერის დამხსომებელ მოწყობილობებში. მაგნიტური ფირები განკუთვნილია ინფორმაციის ჩაწერისა, შენახვისა და აღწარმოებისათვის. იგი დაიტანება ალუმინის თხელ დისკზე ან დოლზე. ინფორმაცია ჩაიწერება და აღდგება დაახლოებით ისევე, როგორც ჩვეულებრივ მაგნიტოფონში. კომპიუტერში ინფორმაციის ჩაწერა ხდება მაგნიტურ ლენტებზეც.

- 9 1. რა სიდიდე ახასიათებს გარემოს მაგნიტურ თვისებებს? 2. რა არის ამპერის ჰიპოთეზის არსი? 3. როგორ სხეულებს ეწოდება ფერომაგნიტიკები? 4. რისთვის იყენებენ ფერომაგნიტურ მასალებს? 5. როგორ ხორციელდება ინფორმაციის ჩაწერა კომპიუტერში?

#### ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები

დენის მაგნიტური ველის შესახებ ამოცანების ამოხსნისას უნდა შეგვეძლოს მარცხენა ხელის წესით განვსაზღვროთ ამპერის ძალის მიმართულება, თუ მოცემულია დენისა და მაგნიტური ინდუქციის მიმართულება (ან დენის მიმართულების განსაზღვრა თუ მოცემულია ამპერის ძალისა და მაგნიტური ინდუქციის მიმართულება). უნდა შეგვეძლოს ლორენცის ძალის მიმართულების განსაზღვრაც.

მაგნიტური ველის მაგნიტური ინდუქციის მიმართულება განისაზღვრება ბურლის წესით.

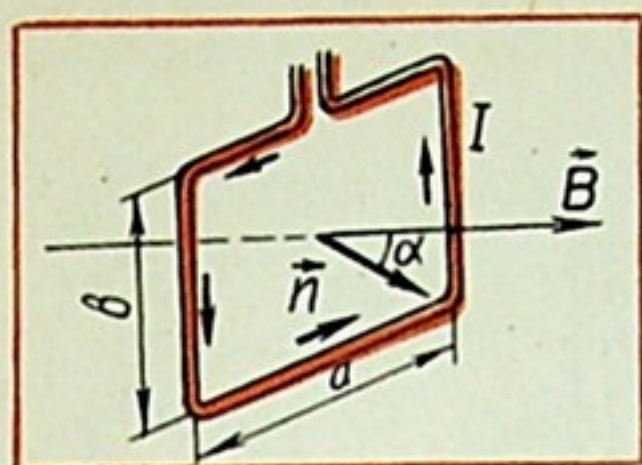
ამპერის კანონისა და ლორენცის ძალის ფორმულის მეშვეობით ამოცანები ისევე უნდა ამოვხსნათ, როგორც მექანიკის ამოცანები. ოღონდ მექანიკური ძალების გარდა უნდა გავითვალისწინოთ ამპერისა ან ლორენცის ძალა.

1. 227-ე სურათზე გამოსახული დენიანი მართკუთხა ჩარჩოს ზომებია:  $a=8$  სმ;  $b=5$  სმ. დენის ძალა ჩარჩოში  $I=10$  ა. მაგნიტური ველის ინდუქცია, რომლის მოდული  $B=0,1$  ტლ ჩარჩოს ნორმალთან ადგენს  $\alpha=30^\circ$ -იან კუთხეს. განსაზღვრეთ ძალთა მომენტი, რომლითაც მაგნიტური ველი მოქმედებს ჩარჩოზე.

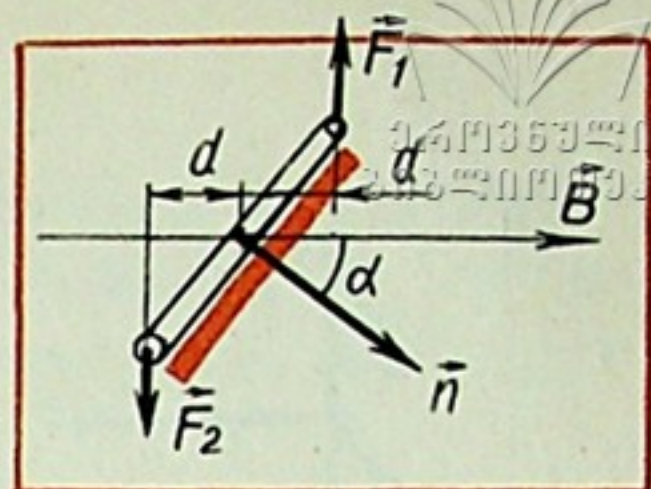
ამოხსნა. 228-ე სურათზე ნაჩვენებია კორიზონტალური სიბრტყით ჩარჩოს კვეთის ზედა ხედი. მარცხენა ხელის წესის თანახმად, ჩარჩოს  $b$  სიგრძის გვერდებზე მოქმედებს  $\vec{B}$  ვექტორის მართობი

<sup>1</sup> ეს პროცესი განპირობებულია ელექტრომაგნიტური ინდუქციით, რომლის შესახებ შემდეგ თავში იქნება ლაპარაკი.





სურ. 227.



სურ. 228.

$\vec{F}_1$  და  $\vec{F}_2$  ძალთა წყვილი, რომელიც ბრუნვით მომენტს ქმნის ჩარჩოს შუაში გამავალი ღერძის მიმართ. ჩარჩოს  $a$  სიგრძის გვერდებზე მოქმედი ძალები, იმავე წესის თანახმად, ჩარჩოს მხოლოდ გაჭიმვას იწვევს.

ამპერის კანონის თანახმად  $F_1 = F_2 = F = |I|Bb$ , თითოეული ამ ძალის

$$\text{მხარი } d = \frac{a}{2} \sin \alpha.$$

თითოეული ძალის მომენტი ტოლია:

$$M_1 = F_1 \cdot \frac{a}{2} \sin \alpha = \frac{1}{2} |I|BS \sin \alpha,$$

სადაც  $S = ab$  ჩარჩოს ფართობია. ჯამური მომენტი

$$M = 2M_1 = |I|BS \sin \alpha,$$

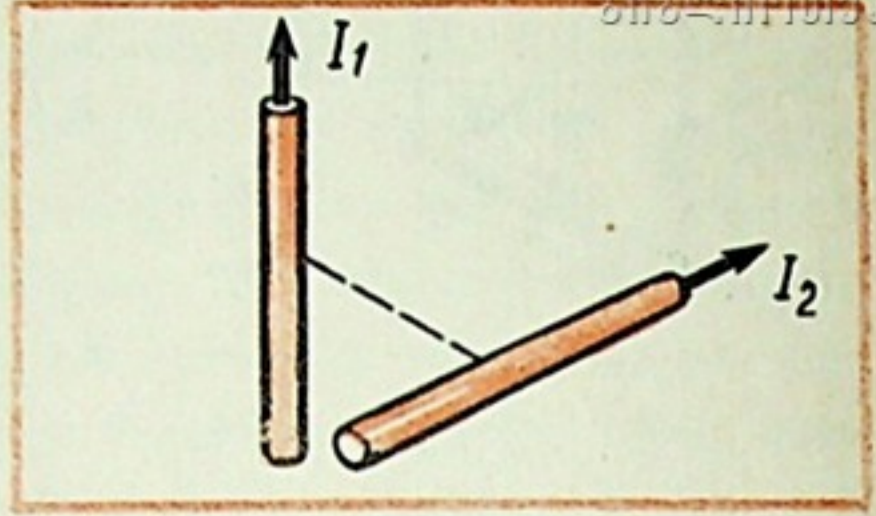
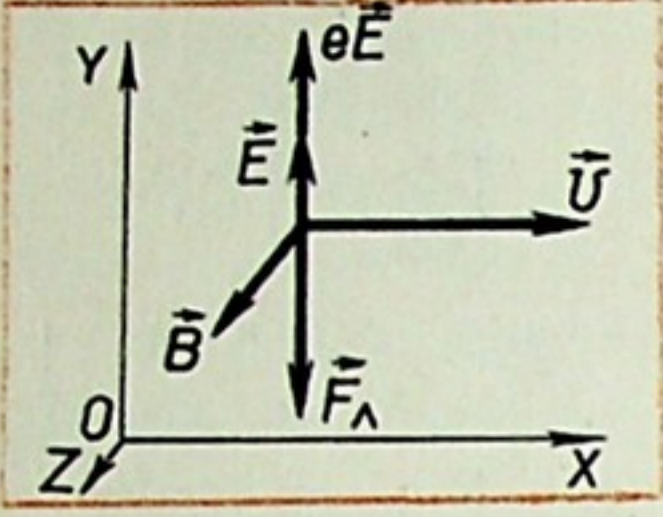
როცა  $\alpha = 90^\circ$ , ძალთა მომენტი მაქსიმალურია და ემთხვევა  $M$ -ის მნიშვნელობას (11.1) ფორმულიდან, რომელიც შემოღებულ იქნა როგორც ვექტორის მოდულის განსაზღვრება. რიცხვით მნიშვნელობათა ჩასმით მივიღებთ:  $M = 7,5 \cdot 10^{-4}$  ნ.მ.

2. სივრცეში, სადაც ერთდროულად არსებობს ერთგვაროვანი მუდმივი ელექტრული და მაგნიტური ველები, წრფივ ტრაექტორიაზე მოძრაობს პროტონი. ელექტრული ველის დაძაბულობა ცნობილია და  $\vec{E}$ -ს ტოლია. განსაზღვრეთ მაგნიტური ველის  $\vec{B}$  ინდუქცია.

**ამოხსნა:** პროტონის წრფივი მოძრაობა შესაძლებელია ორ შემთხვევაში:

1)  $\vec{E}$  ვექტორი მიმართულია პროტონის ტრაექტორიის გასწვრივ, მაშინ  $\vec{B}$  ვექტორიც მიმართული უნდა იყოს ტრაექტორიის გასწვრივ და მისი მოდული შეიძლება იყოს ნებისმიერი, რადგან მაგნიტური ველი ნაწილაკზე არ იმოქმედებს.





სურ. 229.

სურ. 230.

2)  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  და  $\vec{v}$  ვექტორები ურთიერთმართობია და ელექტრული ველის მხრივ პროტონზე მოქმედი ძალა მოდულით ტოლი და მიმართულებით საპირისპიროა ლორენცის ძალისა, რომლითაც მაგნიტური ველი მოქმედებს პროტონზე (სურ. 229). რადგან  $eE + F_{\text{ლ}} = 0$ , ამიტომ

$$eE - evB = 0 \text{ და } B = \frac{E}{v}$$

### ს ა ვ ა რ ჯ ი შ ო 14

1. ბურლისა და მარცხენა ხელის წესის მეშვეობით დაამტკიცეთ, რომ ერთი მიმართულების პარალელური დენები მიიზიდებიან, მოპირდაპირედ მიმართული დენები კი განიზიდებიან.

2. მართი კუთხით გადაჯვარედინებულ ორ წრფივ გამტარში ატარებენ  $I_1$  და  $I_2$  დენებს (სურ. 230). როგორ შეიცვლება გამტართა ურთიერთგანლაგება?

3. დენიანი ჩარჩო, რომელიც აღწერილია ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშებში (მე-2 ამოცანა), მოაბრუნეს ისე, რომ ჩარჩოს ნორმალური მაგნიტური ინდუქციის წირებთან ადგენს  $90^\circ$ -იან კუთხეს. განსაზღვრეთ ძალთა მომენტი, რომლითაც მაგნიტური ველი მოქმედებს ჩარჩოზე.

4)  $l = 0,15$  მ სიგრძის გამტარი, რომელშიც  $I = 8$  ა დენი გადის, მართობია  $B = 0,4$  ტლ ერთგვაროვანი მაგნიტური ველის ინდუქციის წირებისა. იპოვეთ მუშაობა, რომელიც შესრულდება, თუ გამტარს  $0,025$  მ-ზე გადავაადგილებთ ამპერის ძალის მოქმედების მიმართულებით.

5. განსაზღვრეთ მაგნიტური ველის ინდუქციის ვექტორის მიმართულება კინესკოპის ყელში (სურ. 223).

\* 6.  $q$  მუხტისა და  $m$  მასის ნაწილაკი  $\vec{v}$  სიჩქარით მოძრაობს  $\vec{B}$  ინდუქციის ერთგვაროვანი მაგნიტურ ველში. ნაწილაკის საწყისი სიჩქარის ვექტორი  $\vec{B}$  ვექტორთან ადგენს  $\alpha$  კუთხეს. აჩვენეთ, რომ ნაწილაკის ტრაექტორია ხრახნწირს წარმოადგენს და განსაზღვრეთ მისი რადიუსი.





ელექტრული დენების ურთიერთქმედება, რომელსაც მაგნიტური ურთიერთქმედება ეწოდება, მაგნიტური ველის საშუალებით ხორციელდება. მაგნიტური ველის ძირითადი მახასიათებელია მაგნიტური ინდუქციის  $\vec{B}$  ვექტორი.

მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მიმართულებად მიღებულია მაგნიტურ ველში თავისუფლად ორიენტირებადი დენიანი ჩარჩოსადმი გავლებული ნორმალის მიმართულება. ეს მიმართულება ემთხვევა ველში მაგნიტური ისრის მიმართულებას, ე. ი. იმ წრფის მიმართულებას, რომელიც გავლებულია ისრის სამხრეთი პოლუსიდან ჩრდილოეთისაკენ.

მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდული განისაზღვრება წილადით, რომლის მრიცხველია მაგნიტური ველის მხრივ დენიან ჩარჩოზე (კონტურზე) მოქმედი მაქსიმალური ძალთა მომენტი, მნიშვნელი კი — დენის ძალის ნამრავლი ჩარჩოს ფართობზე.

მაგნიტური ინდუქციის წირები გარს უვლის დენიან გამტარს და ყოველთვის ჩაკეტილია. ველს, რომლის წირები ჩაკეტილია, გრიგალური ეწოდება.

ამპერის კანონის თანახმად,  $\Delta l$  სიგრძის დენიან მონაკვეთზე მაგნიტური ველი მოქმედებს ძალით, რომლის მოდული ტოლია:

$$F = B|I|\Delta l \sin \alpha,$$

სადაც  $\alpha$  კუთხეა  $\vec{B}$  ვექტორსა და გამტარის მონაკვეთს შორის. ძალის მიმართულება მარცხენა ხელის წესით განისაზღვრება.

მოდრავ დამუხტულ ნაწილაკზე მოქმედებს ლორენცის ძალა, რომლის მოდული ტოლია:

$$F_{\text{ლ}} = |q_0|vB \sin \alpha,$$

სადაც  $\alpha$  კუთხეა ნაწილაკის სიჩქარესა და მაგნიტური ინდუქციის ვექტორს შორის. ლორენცის ძალა მართობია ნაწილაკის სიჩქარისა, ამიტომ მუშაობას არ ასრულებს.

მაგნიტურ ველში ყველა სხეული მაგნიტდება. ე. ი. თვითონ ქმნის მაგნიტურ ველს. ერთგვაროვან გარემოში მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდულის ფარდობას მაგნიტურ ინდუქციასთან ვაკუუმში, მაგნიტური შეღწევადობა ეწოდება. ნივთიერების მაგნიტურ თვისებებს ახასიათებენ მაგნიტური შეღწევადობით.

$$\mu = \frac{B}{B_0}.$$

ნივთიერებათა დიდი ნაწილის მაგნიტური თვისებები სუსტად ვლინდება. მხოლოდ ფერომაგნიტურ სხეულებს, რომლებსაც რკინა





მიეკუთვნება, აქვს ძალიან დიდი მაგნიტური შეღწევადობა ( $\mu \gg 1$ ) და დამოკიდებულია მაგნიტურ ინდუქციაზე. მართალია, ფერრომაგნიტიკები შედარებით ცოტაა, მაგრამ მათ დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვთ, რადგან, მათი საშუალებით ველის მაგნიტური ინდუქცია რამდენიმე ასეულჯერ იზრდება ენერგიის დახარჯვის გარეშე.

XII თ ა ვ ი

**ელექტრომაგნიტური ინდუქცია**

**91. ელექტრომაგნიტური ინდუქციის აღმოჩენა**

საქამდე ვიხილავდით ელექტრულ და მაგნიტურ ველებს, რომლებიც არ იცვლებოდა დროის განმავლობაში. გამოვარკვიეთ, რომ ელექტრულ ველს ქმნის ელექტრული მუხტები, მაგნიტურ ველს კი — მოძრავი მუხტები, ე. ი. ელექტრული დენი. გავვცნოთ ახლა ელექტრულ და მაგნიტურ ველებს, რომლებიც დროის მიხედვით იცვლება.

ყველაზე მნიშვნელოვანი, რისი დადგენაც მოხერხდა, ესაა მჭიდროდ ურთიერთკავშირი ელექტრულ და მაგნიტურ ველებს შორის. დროში ცვლადი მაგნიტური ველი წარმოქმნის ელექტრულ ველს, ხოლო ცვლადი ელექტრული ველი — მაგნიტურს. ველებს შორის ასეთი კავშირის გარეშე ელექტრომაგნიტურ ძალთა გამოვლენის ნაირსახეობა არ იქნებოდა ისეთი ვრცელი, როგორც სინამდვილეშია, არ იარსებებდა არც რადიოტალღები, არც სინათლე.

შემთხვევითი არ იყო, რომ ელექტრომაგნიტურ ურთიერთქმედებათა ახალი თვისებების აღმოჩენაში პირველი, გადამწყვეტი ნაბიჯი გადადგა ფარადეიმ — ელექტრომაგნიტური ველის მოძღვრების ფუძემდებელმა. ფარადეი დარწმუნებული იყო ელექტრულ და მაგნიტურ მოვლენათა ერთიან ბუნებაში. სამან მიიყვანა იგი აღმოჩენამდე, რომელიც შემდეგში საფუძვლად დაედო მსოფლიოს ყველა ელექტროსადგურის გენერატორთა მოწყობილობას, რომელთა მეშვეობითაც მექანიკური ენერგია ელექტრული დენის ენერგიად გარდაიქმნება.

ფარადეი ასე მსჯელობდა: ელექტრული დენი ამაგნიტებს რკინის ნაჭერს. ხომ არ შეიძლება თავის მხრივ მაგნიტმა გამოიწვიოს ელექტრული დენის წარმოქმნა?

ამ კავშირის აღმოჩენა დიდხანს ვერ მოხერხდა. ძნელი მისახვედრი იყო მთავარი, რომ მხოლოდ მოძრავ მაგნიტს ან დროში ცვალეზად მაგნიტურ ველს შეუძლია აღძრას ელექტრული დენი კოჭაში.

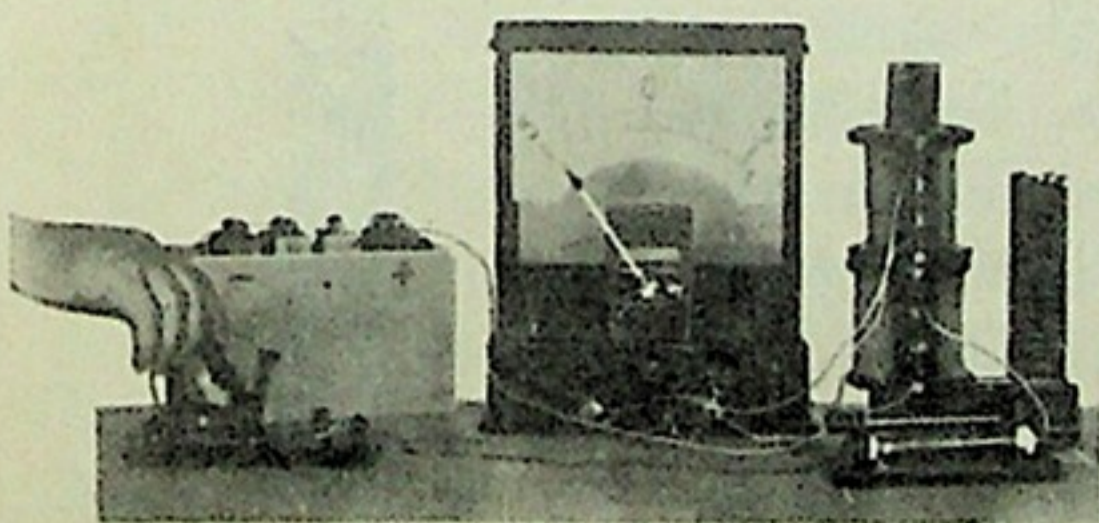


ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენა შემდეგში მდგომარეობს. გამტარ კონტურში აღიძვრება დენი, თუ კონტური ან უძრავია ცვლად მაგნიტურ ველში, ან მოძრაობს მუდმივ მაგნიტურ ველში ისე, რომ კონტურის გამჭოლი მაგნიტური ინდუქციის წირთა რიცხვი იცვლება. ეს მოვლენა აღმოჩენილ იქნა 1831 წლის 29 აგვისტოს. იშვიათია შემთხვევა, რომ ახალი მნიშვნელოვანი აღმოჩენის თარიღი ასე ზუსტად იყოს ცნობილი.

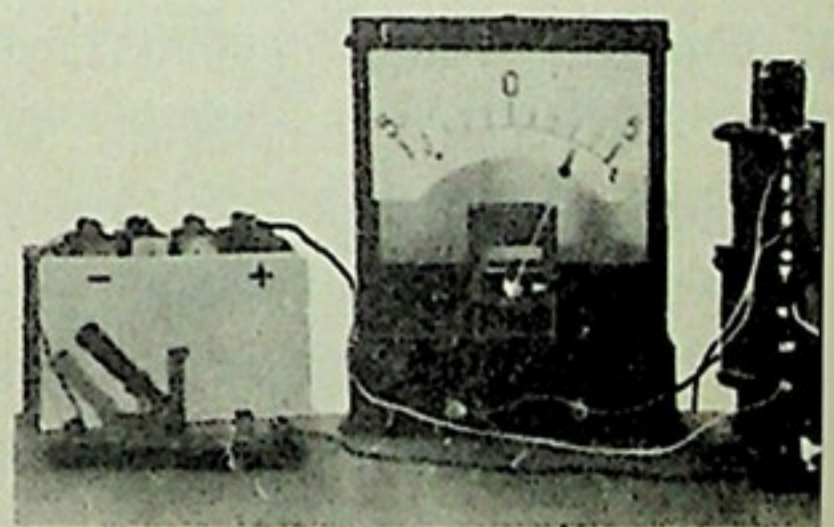
თავდაპირველად ინდუქცია აღმოაჩინეს ერთმანეთის მიმართ უძრავ გამტარებში წრედის შეკვრისა და განრთვის დროს. ფარადეიმ კარგად იცოდა, რომ დენიანი გამტარების მიახლოებას ან დაშორებას იგივე შედეგი უნდა მოჰყოლოდა, რაც წრედის შეკვრასა და განრთვისას. მან ცდებით დაამტკიცა, რომ დენი აღიძვრება კოჭების ერთმანეთის მიმართ გადაადგილების დროს. ამპერის შრომების მიხედვით ფარადეიმ იცოდა, რომ მაგნიტი ერთობლიობაა მცირე დენებისა, რომლებიც მოლეკულებში ცირკულირებენ. ლაბორატორიულ ჟურნალში ჩაწერილია, რომ 17 ოქტომბერს გამოვლენილ იქნა ინდუქციური დენი კოჭაში, მასში მაგნიტის შეტანის (ან გამოტანის) დროს. ერთი თვის განმავლობაში ფარადეიმ ცდებით აღმოაჩინა ელექტრომაგნიტური ინდუქციის ყველა არსებითი თავისებურება.

ამჟამად ფარადეის ცდები ყველას შეუძლია გაიმეოროს. ამისათვის უნდა გვექონდეს ორი კოჭა, მაგნიტი, ელემენტთა ბატარეა და საკმაოდ გრძნობიერი გალვანომეტრი.

231-ე სურათზე გამოსახულ დანადგარში ინდუქციური დენი კოჭაში აღიძვრება იმ მომენტში, როცა მის მიმართ უძრავი მეორე კოჭას ელექტრული წრედი შეიკვრება ან განირთვება. 232-ე სურათზე გამოსახულ დანადგარში რეოსტატის მეშვეობით ერთ-ერთ კოჭაში იცვლება დენი. 233-ე, ა სურათზე ინდუქციური დენი წარმოიქმნება კოჭების ერთმანეთის მიმართ მოძრაობისას, 233-ე, ბ სურათზე კი დენს წარმოქმნის კოჭას მიმართ მუდმივი მაგნიტის მოძრაობა.

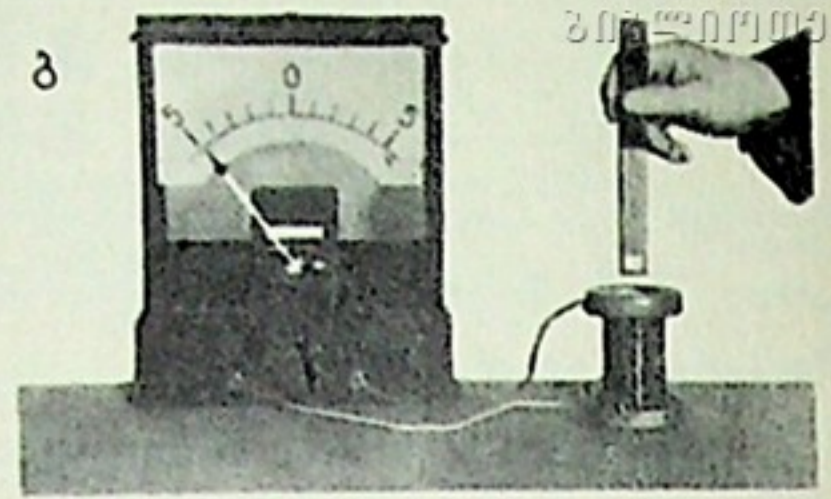
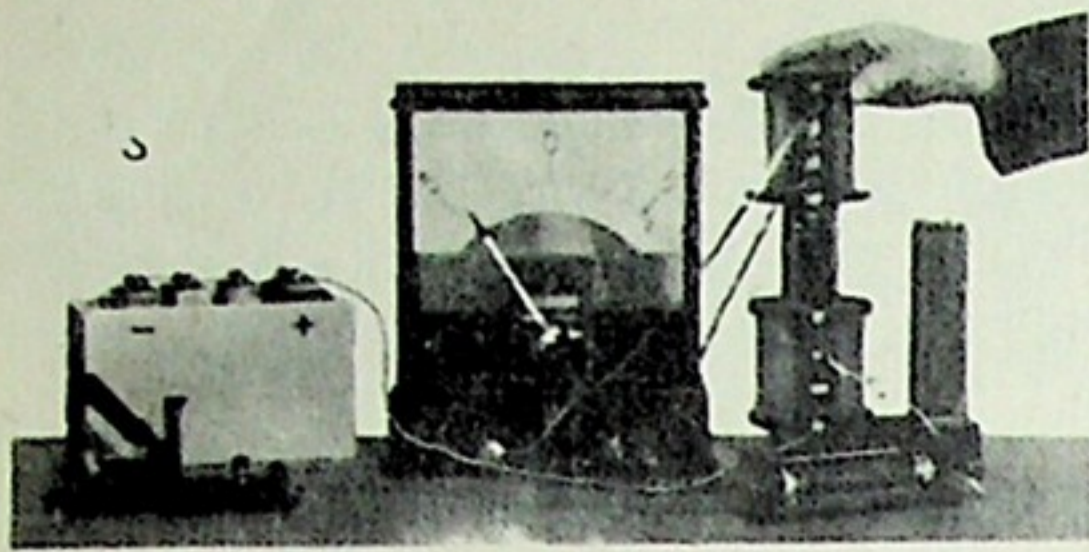


სურ. 231.



სურ. 232.





ეროვნული  
ბიბლიოთეკა

სურ. 233.

ფარადეი თვითონვე მიხვდა, თუ რა აქვს საერთო ინდუქციური დენის წარმოქმნას ცდებში, რომლებიც ერთი შეხედვით სხვადასხვანაირია.

შეკრულ გამტარ კონტურში დენი აღიძვრება მაშინ, როცა იცვლება კონტურით შემოსაზღვრული ფართობის გამჭოლი მაგნიტური ინდუქციის წირების რაოდენობა. ესაა რაც უფრო სწრაფად იცვლება მაგნიტური ინდუქციის წირთა რაოდენობა, მით უფრო მეტია წარმოქმნილი ინდუქციური დენი. ამასთან მაგნიტური ინდუქციის წირთა რაოდენობის შეცვლის მიზეზს არავითარი მნიშვნელობა არა აქვს. მიზეზი შეიძლება იყოს უძრავი კოჭას გამჭოლი მაგნიტური ინდუქციის წირთა რაოდენობის ცვლილებაც, რომელიც გამოწვეულია მეორე კოჭაში დენის შეცვლით (სურ. 231) და წირთა რაოდენობის ცვლილებაც კონტურის მოძრაობის შედეგად არაერთგვაროვან მაგნიტურ ველში, რომლის წირთა სიხშირე სივრცეში იცვლება (სურ. 234).

**92. ინდუქციური დენის მიმართულება.  
ლენცის წესი**

დავადგინოთ ინდუქციური დენის მიმართულება. თუ კოჭას, რომელშიც ინდუქციური დენი აღიძვრება, გალვანომეტრს შევუერთებთ, შევნიშნავთ, რომ ამ დენის მიმართულება დამოკიდებულია იმაზე, უახლოვდება თუ შორდება მაგნიტი (მაგალითად, ჩრდილო პოლუსი) კოჭას (სურ. 233, ბ).

აღიძვრული ამა თუ იმ მიმართულების ინდუქციური დენი ურთიერთქმედებს მაგნიტთან. დენიანი კოჭა მსგავსია ორპოლუსიანი (ჩრდილოეთი და სამხრეთი) მაგნიტისა. კოჭაში აღიძვრული ინდუქცი-



სურ. 234



ური დენის მიმართულება განსაზღვრავს რომელი ბოლო ასრულებს ჩრდილოეთი პოლუსის როლს და რომელი — სამხრეთისას (ჩრდილო პოლუსიდან მაგნიტური ინდუქციის წირები გამოდიან, სამხრეთ პოლუსში კი — შედიან). ენერგიის მუდმივობის კანონის გამოყენებით შეიძლება ვიწინასწარმეტყველოთ, თუ რა შემთხვევაში იზიდავს კოჭა მაგნიტს და რა შემთხვევაში განიზიდავს.

ინდუქციური დენის ურთიერთქმედება მაგნიტთან. **ტუ** მაგნიტს კოჭას მივუახლოებთ, მაშინ გამტარში აღძრული ინდუქციური დენი აუცილებლად განიზიდავს მაგნიტს. მაგნიტი რომ კოჭას მივუახლოოთ, უნდა შევასრულოთ დადებითი მუშაობა. კოჭა ემსგავსება მაგნიტს, რომელიც თანასახელიანი პოლუსითაა მიმართული მოძრავი მაგნიტისაკენ. თანასახელიანი პოლუსები კი განიზიდება. ]

[წარმოვიდგინოთ პირიქით. ვთქვათ, მივუახლოეთ მაგნიტი კოჭას და იგი თავისთავად გაქანდა კოჭასაკენ. ასეთ შემთხვევაში დაირღვევა ენერგიის მუდმივობის კანონი. მაგნიტის კინეტიკური ენერგია გაიზრდება და ამასთან წარმოიქმნება დენი, რომლისთვისაც საჭიროა ენერგიის დახარჯვა. ] მაგნიტის კინეტიკური ენერგია და დენის ენერგია წარმოიქმნებოდა არაფრისაგან, ენერგიის დახარჯვის გარეშე. ]

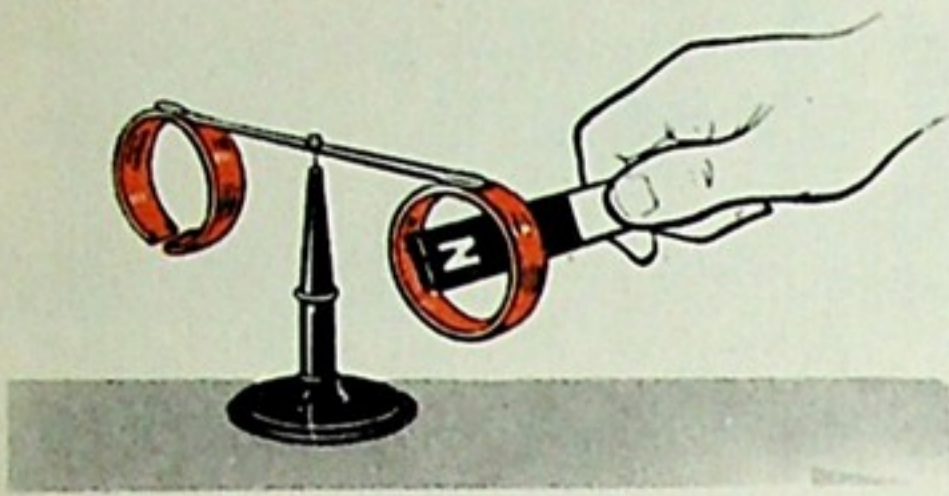
თუ მაგნიტი კოჭას შორდება, ენერგიის მუდმივობის კანონის თანახმად, უნდა აღიძრას მიზიდვის ძალა.

ამ დასკვნის სისწორე შეიძლება ვაჩვენოთ 235-ე სურათზე გამოსახული ცდით. ღერო თავისუფლად ბრუნავს ვერტიკალური ღერძის ირგვლივ. ღეროს ბოლოებზე დამაგრებულია ალუმინის ორი რგოლი, რომელთაგან ერთი გაჭრილია. თუ მაგნიტს მივიტანთ მთლიან რგოლთან, მასში აღიძვრება ინდუქციური დენი, რომელიც მიმართულია ისე, რომ რგოლი განიზიდება მაგნიტისაგან და ღერო შემობრუნდება. თუ მაგნიტს დავაშორებთ რგოლს, მაშინ, პირიქით, რგოლი მაგნიტისკენ მიიზიდება. გაჭრილ რგოლთან მაგნიტი არ ურთიერთქმედებს, რადგან ასეთ რგოლში ინდუქციური დენი არ აღიძვრება. კოჭას მიერ მაგნიტის მიზიდვა თუ განიზიდვა დამოკიდებულია ინდუქციური დენის მიმართულებაზე. ამიტომ ენერგიის მუდმივობის კანონი საშუალებას გვაძლევს ჩამოვაყალიბოთ წესი, რომელიც ინდუქციური დენის მიმართულებას განსაზღვრავს.

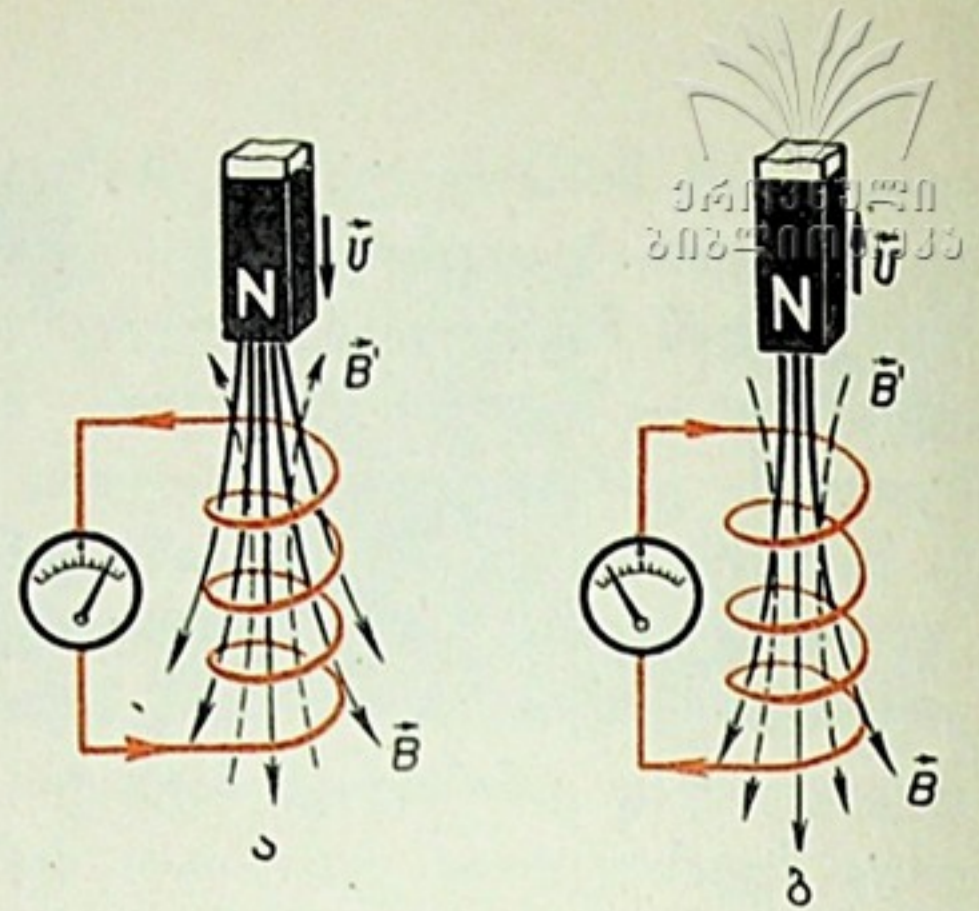
სრით განსხვავდება ერთმანეთისაგან ორი ცდა: მაგნიტის მიახლოება კოჭასთან და მისგან დაშორება? პირველ შემთხვევაში კოჭას ხვიების გამჭოლი მაგნიტური ინდუქციის წირთა რიცხვი ანუ, რაც იგივეა, მაგნიტური ნაკადი იზრდება (სურ. 236, ა), მეორე შემთხვევაში კი — მცირდება (სურ. 236, ბ).

ამასთან პირველ შემთხვევაში მაგნიტური ინდუქციის წირები გამოდიან კოჭას ზედა ბოლოდან, რადგან კოჭა მაგნიტს განიზიდავს;





სურ. 235.



სურ. 236.

მეორე შემთხვევაში, პირიქით, შედიან ამ ბოლოში. მაგნიტური ინდუქციის ეს წირები 236-ე სურათზე პუნქტირითაა გამოსახული.

**ლენცის წესი.** ახლა უკვე მივედით მთავართან: კოჭას ხვიაში მაგნიტური ნაკადის გაზრდისას ინდუქციურ დენს ისეთი მიმართულება აქვს, რომ მის მიერ შექმნილი მაგნიტური ველი ეწინააღმდეგება კოჭას ხვიების გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის ზრდას. ამ ველის ინდუქციის  $\vec{B}'$  ვექტორი მიმართულია ელექტრული დენის წარმოშობი ველის  $\vec{B}$  ინდუქციის ვექტორის წინააღმდეგ. თუკი მაგნიტური ნაკადი კოჭაში სუსტდება, ინდუქციური დენი ქმნის  $\vec{B}'$  მაგნიტურ ინდუქციას, რომელიც აღიდებს მაგნიტურ ნაკადს კოჭას ხვიებში.

ასეთია არსი ინდუქციური დენის მიმართულების განსაზღვრის საერთო წესისა, რომელიც ყველა შემთხვევაში გამოიყენება. ეს წესი აღმოაჩინა რუსმა ფიზიკოსმა ლენცმა.

**ლენცის წესის თანახმად ჩაკეტილ კონტურში აღძრული ინდუქციური დენი ეწინააღმდეგება მაგნიტური ნაკადის იმ ცვლილებას, რომელიც მოცემულ დენს წარმოშობს.**

კონტურში  $I_i$  ინდუქციური დენის მიმართულების განსაზღვრისათვის ლენცის წესი ასე უნდა გამოვიყენოთ:

1. დავადგინოთ გარე მაგნიტური ველის  $\vec{B}$  მაგნიტური ინდუქციის წირთა მიმართულება.

2. გავარკვიოთ, კონტურის ფართობის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის ცვლილების ხასიათი იზრდება ის ( $\Delta\Phi > 0$ ), თუ მცირდება ( $\Delta\Phi < 0$ )?

3. დავადგინოთ  $I_i$  ინდუქციური დენის მაგნიტური ველის  $\vec{B}'$  მაგნიტური ინდუქციის წირთა მიმართულება. ლენცის წესის თანახმად ეს წირები მიმართული უნდა იყოს  $\vec{B}$  ვექტორის წირთა საპირისპიროდ, როცა  $\Delta\Phi > 0$ , ხოლო თანხვედნილად, როცა  $\Delta\Phi < 0$ .





4.  $\vec{B}'$  ინდუქციის წირთა მიმართულების ცოდნით მოგნახავთ  $I_i$  ინდუქციური დენის მიმართულებას ბურღის წესის გამოყენებით.  $\int$

გამოიყენეთ მსჯელობათა ეს თანმიმდევრობა ინდუქციური დენის მიმართულების განსაზღვრისათვის ზემოთ განხილულ მაგალითებში.

### 93. ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონი

ჩამოვყალიბოთ ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონი რაოდენობრივად. ფარადეის ცდებმა გვიჩვენა, რომ გამტარ კონტურში ინდუქციური დენის  $I_i$  ძალა პროპორციულია ამ კონტურით შემოსაზღვრული ფართობის გამჭოლ  $\vec{B}$  მაგნიტური ინდუქციის წირების რაოდენობის ცვლილების სიჩქარისა.  $\Phi$  მაგნიტური ნაკადის ცნების შემოღების შემდეგ ეს დებულება შეიძლება დავაზუსტოთ.

მაგნიტური ნაკადი თვალსაჩინოდ განიმარტება როგორც  $S$  ფართობის გამჭოლი მაგნიტური ინდუქციის წირების რიცხვი (იხ. § 86). ამიტომ ამ რიცხვის ცვლილების სიჩქარე არის იგივე მაგნიტური ნაკადის ცვლილების სიჩქარე.

თუ მცირე  $\Delta t$  დროში მაგნიტური ნაკადი  $\Delta\Phi$  სიდიდით იცვლება, მაშინ მაგნიტური ნაკადის ცვლილების სიჩქარე ტოლია  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ -სი. ამიტომ დებულება, რომელიც უშუალოდ ცდიდან გამომდინარეობს, შეიძლება ასე ჩამოვყალიბოთ:

$\int$  ინდუქციური დენის ძალა პროპორციულია კონტურით შემოსაზღვრული ფართობის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის ცვლილების სიჩქარისა:

$$I_i = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \int \quad (12.1)$$

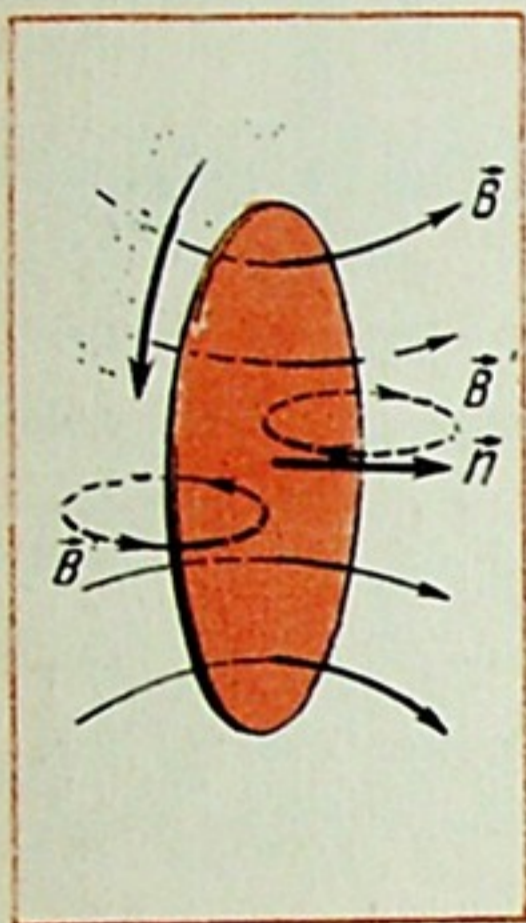
ინდუქციის ემ ძალა. ცნობილია, რომ წრედში ელექტრული დენი იმ შემთხვევაში წარმოიქმნება, როცა გამტარის თავისუფალ მუხტებზე გარე ძალები მოქმედებს. ამ ძალების მუშაობას, შესრულებულს შეკრული კონტურის გასწვრივ ერთეული დადებითი მუხტის გადატანაზე, ელექტრომამოძრავებელი ძალა ეწოდება. მაშასადამე,  $\int$  კონტურით შემოსაზღვრულ ფართობში გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის ცვლილებისას მასში აღიძვრება გარეშე ძალები; მათი მოქმედება ხასიათდება ემ ძალით, რომელსაც ინდუქციის ემ ძალა ეწოდება. მას აღნიშნავენ  $\mathcal{E}_i$  ასოთი.  $\int$





ომის კანონის თანახმად, შეკრული წრედისათვის  $I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R}$  გამტარ-

რის წინაღობა დამოკიდებული არ არის მაგნიტური ნაკადის ცვლილებაზე. მაშასადამე (12.1) გამოსახულება მართებულია მხოლოდ იმითომ, რომ ინდუქციის ემ ძალა<sup>1</sup> პროპორციულია  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ -სი.



სურ. 237.

**ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონი.**

ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონი ეკუთვნის სწორედ ემ ძალისა და არა დენის ძალისათვის. სწორედ ამ შემთხვევაში კანონი გამოხატავს მოვლენის არსს, რომელიც დამოკიდებული არ არის იმ გამტართა თვისებებზე, რომლებშიც ინდუქციური დენი აღიძვრება. ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონის თანახმად, შეკრულ კონტურში ინდუქციის ემ ძალის მოდული კონტურით შემოსაზღვრული ფართობის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის ცვლილების სიჩქარის ტოლია:

$$|\mathcal{E}_i| = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|$$

ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონში როგორ გავითვალისწინოთ ინდუქციური დენის მიმართულება (ან ინდუქციის ემ ძალის ნიშანი) ლენცის წესის შესაბამისად?

237-ე სურათზე გამოსახულია შეკრული კონტური. დადებითად ჩავთვალოთ კონტურის შემოვლის ის მიმართულება, რომელიც საათის ისრის მოძრაობის საწინააღმდეგოა. კონტურის  $\vec{n}$  ნორმალური შემოვლის მიმართულებასთან ქმნის მარჯვენა ხრახნს.

ვთქვათ,  $\vec{B}$  მაგნიტური ინდუქცია მიმართულია კონტურის ნორმალის გასწვრივ და იზრდება დროის მიხედვით, მაშინ  $\Phi > 0$  და  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$ .

ლენცის წესის თანახმად, ინდუქციური დენი ქმნის  $\Phi' < 0$  მაგნიტურ ნაკადს. ინდუქციური დენის მაგნიტური ველის ინდუქციის წირები 237-ე სურათზე გამოსახულია პუნქტირით. მაშასადამე, ლენცის წესის თანახმად ინდუქციური დენი მიმართულია საათის ისრის

<sup>1</sup> ცდა უშუალოდ ამტკიცებს პირდაპირპროპორციულობას  $\mathcal{E}_i$ -სა და  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ -ს შორის. შეგვიძლია პროპორციულობის კოეფიციენტი ერთის ტოლად მივიღოთ მანამ, სანამ მაგნიტური ნაკადის ერთეული დადგენილი არ არის.



მოძრაობის მიმართულებით (დადებითი შემოვლის საწინააღმდეგო მიმართულებით) და ინდუქციის ემ ძალა უარყოფითია. ამიტომ ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონის ფორმულაში ნიშანი „მინუსი“ უნდა დავწეროთ იმის საჩვენებლად, რომ  $\mathcal{E}_i$  და  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  სხვადასხვა ნიშანი აქვს:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (12.2)$$

რკინის მაგნიტური შეღწევადობის გაზომვა. ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენის გამოყენებით შეიძლება გავზომოთ რკინისა და სხვა ფერომაგნიტიკების მაგნიტური შეღწევადობა.

თუ გრძელ კოჭაში რკინის გულარს ჩავდებთ, მაშინ (11.10) ფორმულის თანახმად მაგნიტური ინდუქცია  $\mu$ -ჯერ გაიზრდება. მაშასადამე, ამდენჯერვე გაიზრდება მაგნიტური ნაკადი და ინდუქციის ემ ძალა დამამაგნიტებელი კოჭას მუდმივი დენით მკვებავი წრედის განრთვისას, მეორე, მცირე კოჭაში, რომელიც შემოდანაა დახვეული ძირითადად, აღიძვრება ინდუქციური დენი. ამ დენის რეგისტრაცია ხდება გალვანომეტრით. თუ კოჭაში მოთავსებულია რკინის გულარი, მაშინ გალვანომეტრის ისრის გადახრა წრედის განრთვისას  $\mu$ -ჯერ მეტი იქნება.

გაზომვები გვიჩვენებს, რომ კოჭაში მაგნიტური გულარის შეტანისას მაგნიტური ნაკადი რამდენიმე ათასჯერ იზრდება. მაშასადამე, რკინის მაგნიტური შეღწევადობა ძალიან დიდია.

9. 1. რა მოვლენაა ელექტრომაგნიტური ინდუქცია? 2. როგორ განისაზღვრება მაგნიტური ნაკადის მიმართულება? 3. როგორ ყალიბდება ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონი?

#### 94. ბრიგალური ელექტრული ველი

ინდუქციის ემ ძალა აღიძვრება ან უძრავ გამტარში, რომელიც მოთავსებულია დროის მიხედვით ცვლად ველში, ან გამტარში, რომელიც მოძრაობს მაგნიტურ ველში (ის შეიძლება არ იცვლებოდეს დროის მიხედვით). ორივე შემთხვევაში ემ ძალის მნიშვნელობა განისაზღვრება (12.2) კანონით, მაგრამ ემ ძალა სხვადასხვანაირად წარმოიქმნება. ჯერ განვიხილოთ პირველი შემთხვევა.

ვთქვათ, ჩვენ წინ არის ტრანსფორმატორი — გულარზე ჩამოცმული ორი კოჭა. თუ ქსელში ჩავრთავთ პირველად გრაგნილს, მივიღებთ დენს მეორეულ გრაგნილში (სურ. 238), თუ იგი შეკრულია.



მეორეულ გრაფიკულში ელექტრონები ამოძრავდება, მაგრამ რა ძალები ამოძრავებს მათ? თვით მაგნიტურ ველს, რომელიც კოჭას განკო-  
ლავს, ეს არ შეუძლია, რადგან მაგნიტური ველი მხოლოდ და მხო-  
ლოდ მოძრავ მუხტებზე მოქმედებს (სწორედ ამით განსხვავდება  
ელექტრული ველისაგან), გამტარი კი მასში მყოფი ელექტრონებით  
უძრავია<sup>1</sup>.

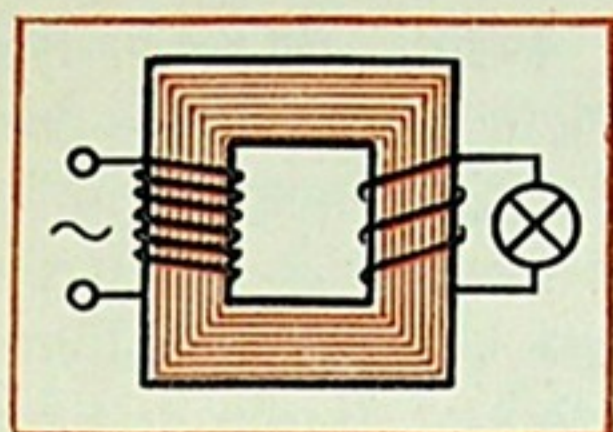
მუხტებზე მაგნიტური ველის გარდა მოქმედებს აგრეთვე ელექ-  
ტრული ველი, თანაც სწორედ მას შეუძლია იმოქმედოს უძრავ მუხ-  
ტებზეც. მაგრამ ის ველი, რომელზეც აქამდე იყო ლაპარაკი (ელექ-  
ტროსტატიკური და სტაციონარული ველი), ელექტრული მუხტებით  
იქმნება, ინდუქციური დენი კი — ცვლადი მაგნიტური ველით. ეს გვა-  
ფიქრებინებს, რომ უძრავ გამტარში ელექტრონები ელექტრული ვე-  
ლის გავლენით მოძრაობენ და ეს ველი უშუალოდ ცვლადი მაგნიტუ-  
რი ველით წარმოიქმნება. ამით მტკიცდება ველის ახალი ფუნდამენ-  
ტური თვისება: დროში ცვლილებისას მაგნიტური ველი წარმოქმნის  
ელექტრულ ველს. ამ დასკვნამდე პირველად მაქსველი მივიდა.

ამის შემდეგ ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენა უკვე  
ახლებურად გვესახება. მთავარი მასში მაგნიტური ველით ელექტრუ-  
ლი ველის წარმოქმნის პროცესია. ამასთან გამტარი კონტურის მაგა-  
ლითად კოჭას არსებობა არ ცვლის საქმის არსს. გამტარი თავისუფა-  
ლი ელექტრონების (ან სხვა ნაწილაკების) მარაგით მხოლოდ ხელს  
უწყობს აღძრული ელექტრული ველის გამომჟღავნებას. ველი ამოძ-  
რავებს ელექტრონებს გამტარში და ამით ამჟღავნებს თავის თავს.  
ელექტრომაგნიტური ინდუქციის არსი არა იმდენად ინდუქციური  
დენის წარმოქმნაშია, რამდენადაც ელექტრული ველის აღძვრაში. ეს  
ელექტრული ველი არის გარე ძალა, რომელსაც ელექტრული მუხტე-  
ბი მოძრაობაში მოჰყავს.

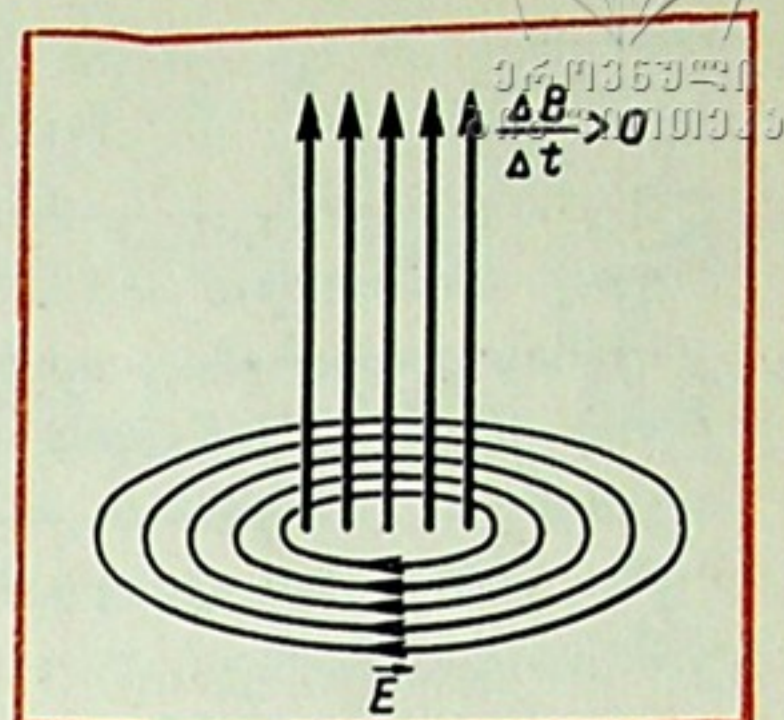
მაგნიტური ველის ცვლილებისას აღძრულ ელექტრულ ველს  
აქვს სულ სხვა სტრუქტურა, ვიდრე ელექტროსტატიკურს. ის არ არის  
უშუალოდ დაკავშირებული ელექტრულ მუხტებთან და მისი დაძაბუ-  
ლობის წირები არ შეიძლება მათზე იწყებოდეს და ბოლოვდებოდეს.  
ისინი საერთოდ არსად არ იწყებიან და არ ბოლოვდებიან, არამედ  
წარმოადგენენ მაგნიტური ინდუქციის წირების მსგავს, შეკრულ წი-  
რებს, ეს ე. წ. გრიგალური ელექტრული ველია (სურ.  
239).

<sup>1</sup> სინამდვილეში საქმე არც ისე მარტივადაა. უძრავ გამტარშიც ელექტრონები  
ასრულებენ უწყვეტი სითბური მოძრაობას, მაგრამ ასეთი მოძრაობის საშუალო  
სიჩქარე ნულის ტოლია. შესაბამისად დენიც, რომელიც გამოწვეულია უშუალოდ  
მაგნიტური ველით, ნულის ტოლი უნდა იყოს.





სურ. 238.



სურ. 239.

ელექტრული ველის ძალწირების მიმართულება ინდუქციური დენის მიმართულებას ემთხვევა. ძალა, რომლითაც გრიგალური ველი მოქმედებს  $q$  მუხტზე, წინანდებურად  $\vec{F} = q\vec{E}$  ტოლია. მაგრამ სტაციონარული ველისაგან განსხვავებით გრიგალური ველის მუშაობა ჩაკეტილ გზაზე ნულის ტოლი არ არის. საქმე ისაა, რომ ელექტრული ველის დაძაბულობის შეკრულ წირთა გასწვრივ მუხტის გადაადგილებისას მუშაობას გზის ყველა უბანზე ერთი და იგივე ნიშანი აქვს (ძალისა და გადაადგილების მიმართულება ერთმანეთს ემთხვევა).

გრიგალური ელექტრული ველის მუშაობა ჩაკეტილი უძრავი გამტარის გასწვრივ ერთეული დადებითი მუხტის გადაადგილებისას, რიცხობრივად ტოლია ამ გამტარში აღძრული ინდუქციის ემ ძალისა.

ინდუქციური დენები მასიურ გამტარებში. ინდუქციური დენები განსაკუთრებით ძლიერი ხდება მასიურ გამტარებში, რადგან მათ მცირე წინაღობა აქვს.

ეს დენები მათი შემსწავლელი ფრანგი ფიზიკოსის ფუკოს სახელს ატარებს. ფუკოს დენები შეიძლება გამოვიყენოთ გამტარების გასახურებლად. ამ პრინციპზეა დამყარებული ინდუქციური ღუმლის მოწყობილობა. მას განსაკუთრებით ფართოდ იყენებენ ლითონის დნობისათვის ვაკუუმში.

მაგრამ ბევრ მოწყობილობაში ფუკოს დენები სითბოს გამოყოფაზე ენერგიის უსარგებლო კარგვას იწვევს. ამიტომ ტრანსფორმატორის, ელექტროძრავის, გენერატორისა და სხვა მოწყობილობათა რკინის გულარებს ამზადებენ არა ერთიანს, არამედ ცალკეული, ერთმანეთისგან იზოლირებული ფირფიტებისგან შედგენილს. ფირფიტების ზედაპირი მართობულია გრიგალური ელექტრული ველის მიმართულებისა. ამ დროს ფირფიტები ელექტრულ დენს მაქსიმალურ წინაღობას უწევს.

ფერიტების გამოყენება. 90-ე პარაგრაფში აღნიშნულია, რომ არსებობს მაგნიტური იზოლიატორ-ფერიტები. გადამაგნიტებისას ფე-

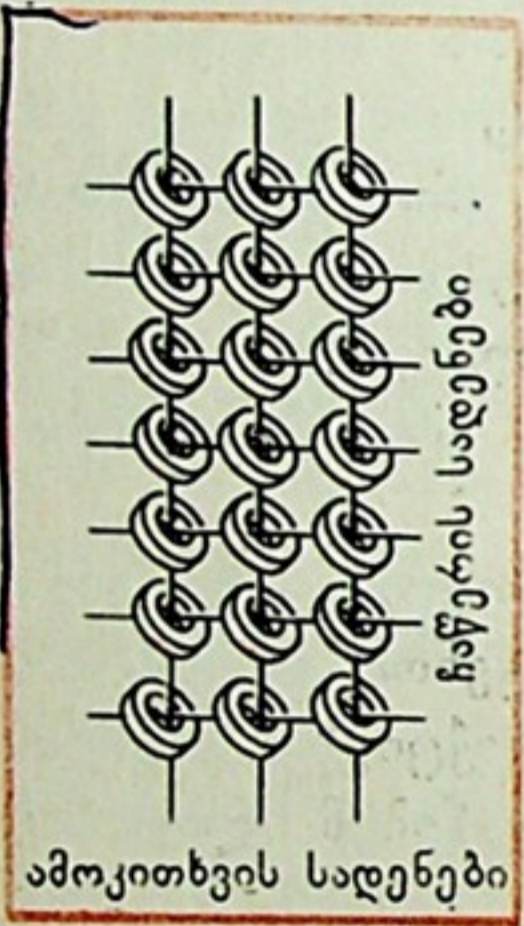


რიტებში არ აღიძვრება გრიგალური დენი. ამის გამო ენერჯის სითბური დანაკარგი მინიმუმამდე მცირდება. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია რადიოელექტრონული აპარატურისათვის, რომელიც ძალიან მაღალ სიხშირეთა არეში (მილიონობით რხევა წამში) მუშაობს. აქ კოჭების გულარებად ფირფიტების გამოყენება უკვე აღარ იძლევა საჭირო ეფექტს, ვინაიდან თითოეულ ფირფიტაში ფუკოს დიდი დენები აღიძვრება. ამიტომ მაღალი სიხშირის ტრანსფორმატორების გულარები, ტრანზისტორების მაგნიტური ანტენები და სხვ. ფერიტებისაგან მზადდება. ფერიტის გულარებს ამზადებენ საწყის ნივთიერებათა ფხვნილების ნარევისაგან. ნარევი იწნეხება და თერმულად მუშავდება.

ამას გარდა, არსებითია, რომ მაგნიტური ველის სწრაფი ცვლისას ჩვეულებრივ ფერომაგნეტიკში აღიძვრება ინდუქციური დენები, რომლის მაგნიტური ველი, ლენცის წესის თანაბრად, წინააღმდეგობას უწევს მაგნიტური ნაკადის შეცვლას კოჭას გულარში. ამიტომ მაგნიტური ინდუქციის ნაკადი პრაქტიკულად უცვლელი რჩება და გულარი არ გადამაგნიტდება.

ფერიტებში გრიგალური დენები არ წარმოიშობა, ამიტომ ისინი სწრაფად გადამაგნიტდება. ფერიტების ეს თვისება გამოიყენება კომპიუტერთა უმრავლესობაში ოპერატიული მეხსიერების მქონე დამამახსოვრებელ მოწყობილობათა (ინფორმაციის სწრაფჩამწერ და სწრაფწამშლელ) შესაქმნელად. გულარის დამაგნიტების ორ შესაძლო მიმართულებას შეესაბამება დადასტურებისა (კი) და უარყოფის (არა) ინფორმაცია.

ფერიტის რგოლებს ჩამოაცმევენ ურთიმართობულ გამტართა სისტემების გადაკვეთის წერტილებში (სურ. 240). ერთი სისტემით გადაეცემა დენის იმპულსები, რომლებიც განსაზღვრულ დამაგნიტებას ქმნის რგოლებში. ასე ხდება ინფორმაციის ჩაწერა. ამ ინფორმაციას ამოიკითხავს გამტართა მეორე სისტემა იმ ინდუქციური დენების რეგისტრირებით, რომლებიც გადამაგნიტების დროს აღიძვრება ფერიტის რგოლებში.



სურ. 240.

**95. ინდუქციის იმ ძალა მოძრავ გამტარში**

თუ გამტარი დროის მიხედვით მუდმივ მაგნიტურ ველში მოძრაობს, მაშინ ინდუქციის ემ ძალა გამტარში განპირობებულია არა გრიგალური ელექტრული ველით, არამედ სხვა მიზეზით.



გამტარის მოძრაობისას მასთან ერთად მოძრაობს მისი თავისუფალი მუხტები. ამიტომ მუხტებზე მაგნიტური ველის მხრივ ლორენცის ძალა იმოქმედებს, რაც გამოიწვევს მუხტების გადაადგილებას გამტარში. ამგრივად, ინდუქციის ემ ძალა „მაგნიტური წარმოშობისაა“.

მსოფლიოს ბევრ ელექტროსადგურში სწორედ ლორენცის ძალა იწვევს ელექტრონების გადაადგილებას მოძრავ გამტარებში.  $\int$

გამოვთვალოთ ინდუქციის ემ ძალა მართკუთხა კონტურში, რომელიც ერთგვაროვან მაგნიტურ ველშია მოთავსებული (სურ. 241). ვთქვათ, კონტურის  $MN = l$  გვერდი სრიალებს  $\vec{v}$  მუდმივი სიჩქარით  $NC$  და  $MD$  გვერდების გასწვრივ ისე, რომ მუდამ  $CD$  გვერდის პარალელური რჩება. ერთგვაროვანი ველის  $\vec{B}$  მაგნიტური ინდუქცია მართობია  $MN$  გამტარისა და მისი სიჩქარის მიმართულებასთან  $\alpha$  კუთხეს ქმნის.

ძალა, რომლითაც მაგნიტური ველი მოქმედებს მოძრავ დამუხტულ ნაწილაკზე (იხ. § 89), მოდულით ტოლია:

$$F_{\text{ლ}} = |q_0| v B \sin \alpha, \quad \int \quad (12.3)$$

ეს ძალა მიმართულია  $MN$  გამტარის გასწვრივ. ლორენცის ძალის მუშაობა  $l$  მანძილზე შეადგენს<sup>1</sup>:

$$A = F_{\text{ლ}} l = |q_0| v B l \sin \alpha. \quad \int$$

$MN$  გამტარში ინდუქციის ელექტრომამოძრავებელი ძალა წარმოადგენს  $q_0$  მუხტის გადაადგილებაზე შესრულებული მუშაობის შეფარდებას ამ მუხტის სიდიდესთან:

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q_0} = v B l \sin \alpha. \quad \int \quad (12.4)$$

ეს ფორმულა მართებულია ნებისმიერი  $l$  სიგრძის გამტარისათვის, რომელიც  $\vec{v}$  სიჩქარით მოძრაობს ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში.  $\int$

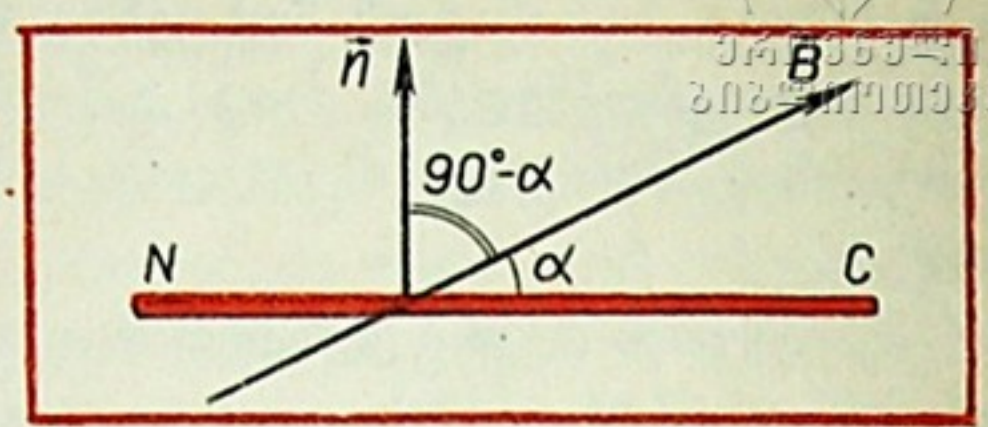
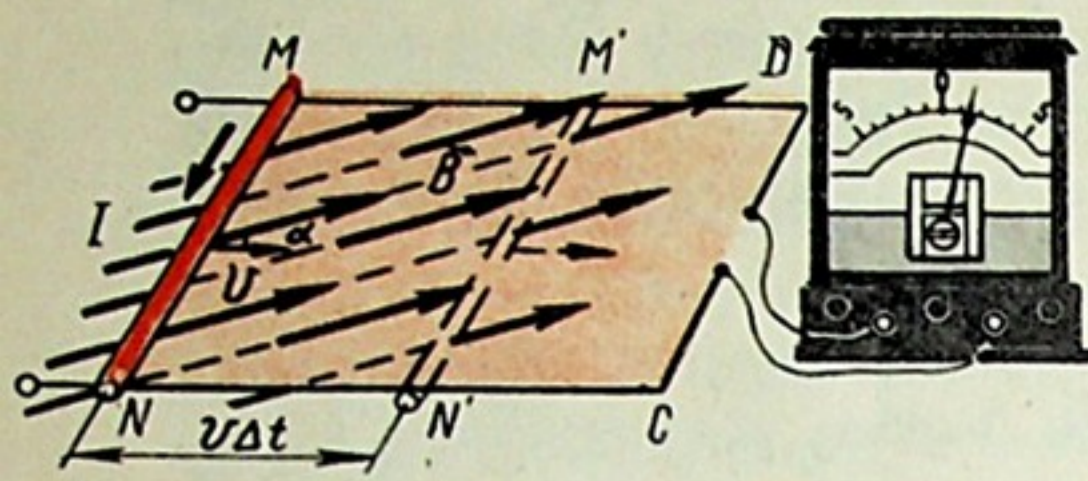
კონტურის სხვა გამტარებში ემ ძალა ნულის ტოლია, რადგან ისინი უძრავია. ამგრივად, ემ ძალა მთელს  $MNCD$  კონტურში  $\mathcal{E}$ , -ს ტოლია და უცვლელი რჩება, თუკი მოძრაობის  $\vec{v}$  სიჩქარე მუდმივია. ელექტრული დენი კი ამ დროს გაიზრდება, რადგან  $MN$  გამტარის მარჯვნივ გადაადგილებისას კონტურის საერთო წინაღობა მცირდება.

<sup>1</sup> ეს ლორენცის ძალის არასრული მუშაობაა. ლორენცის ძალას აქვს მდგენელი, რომელიც გამტარის  $\vec{v}$  სიჩქარის საწინააღმდეგოდ არის მიმართული. ეს მდგენელი იმუხტრუქებს გამტარს და ასრულებს უარყოფით მუშაობას, რის შედეგადაც ლორენცის ძალის სრული მუშაობა ნულის ტოლი აღმოჩნდება.





ქართული  
ენების  
სწავლის  
სამეცნიერო  
ცენტრი



სურ. 241.

სურ. 242.

მეორეს მხრივ, ინდუქციის ამ ძალა შეიძლება გამოვთვალოთ ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონის (12.2) მიხედვით. მართლაც, მაგნიტური ნაკადი  $MNCD$  კონტურში ტოლია: >

$$\Phi = BS \cos(90^\circ - \alpha) = BS \sin \alpha,$$

სადაც  $90^\circ - \alpha$  კუთხეა  $\vec{B}$  ვექტორსა და კონტურის ზედაპირის  $\vec{n}$  ნორმალს შორის (სურ. 242),  $S$  არის  $MNCD$  კონტურის ფართობი. თუ ჩავთვლით, რომ დროის საწყის მომენტში ( $t=0$ )  $MN$  გამტარი  $CD$  გამტარიდან  $NC$  მანძილითაა დაშორებული (სურ. 241), მაშინ გამტარის გადაადგილებისას  $S$  ფართობი დროის მიხედვით შემდეგნაირად იცვლება:

$$S = |MN|(|NC| - vt).$$

$\Delta t$  დროში კონტურის ფართობი იცვლება  $\Delta S = -lv \Delta t$  სიდიდით. მინუს ნიშანი უჩვენებს, რომ ის მცირდება. მაგნიტური ნაკადის ცვლილება დროის ამ შუალედში არის  $\Delta \Phi = -Blv \Delta t \sin \alpha$ . მაშასადამე,

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = Blv \sin \alpha. \quad \rhd$$

თუ მთელი  $MNCD$  კონტური მოძრაობს ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში ისე, რომ ინარჩუნებს თავის ორიენტაციას  $\vec{B}$  ვექტორის მიმართ, მაშინ ამ ძალა კონტურში ნულის ტოლი იქნება, რადგან კონტურით შემოსაზღვრულ ფართობში  $\Phi$  მაგნიტური ნაკადი არ იცვლება: კონტურის მოძრაობისას  $MN$  და  $CD$  გამტარებში აღიძვრება (12.3) ფორმულით გამოსახული ძალა, რომელიც ელექტრონებზე მოქმედებს  $N$ -დან  $M$ -საკენ და  $C$ -დან  $D$ -საკენ. ამ ძალთა ჯამური მუშაობა კონტურის ამა თუ იმ მიმართულებით შემოვლისას ნულის ტოლია.

- 9
1. რა ბუნებისაა გარე ძალა, რომელიც ინდუქციურ დენს წარმოქმნის უძრავ გამტარში?
  2. რით განსხვავდება გრიგალური ელექტრული ველი ელექტროსტატიკურისა ან სტაციონარული ველისაგან?
  3. რა ბუნებისაა გარე ძალა,



რომელიც ინდუქციურ დენს წარმოქმნის მოძრავ გამტარში? 4. განმარტეთ ფუკოს დენები. 5. რა უპირატესობა აქვთ ფერიტებს ჩვეულებრივ ფერო-მაგნეტიკებთან შედარებით?

## 96. თვითინდუქცია. ინდუქციურობა

თვითინდუქცია — თუ კოჭაში ცვლადი დენი არსებობს, მაშინ კოჭას გამჭოლი მაგნიტური ნაკადიც ცვლადი იქნება. ამიტომ, ინდუქციის ემ ძალა აღიძვრება იმავე გამტარში, რომელშიც ცვლადი დენი გადის.  $\int$

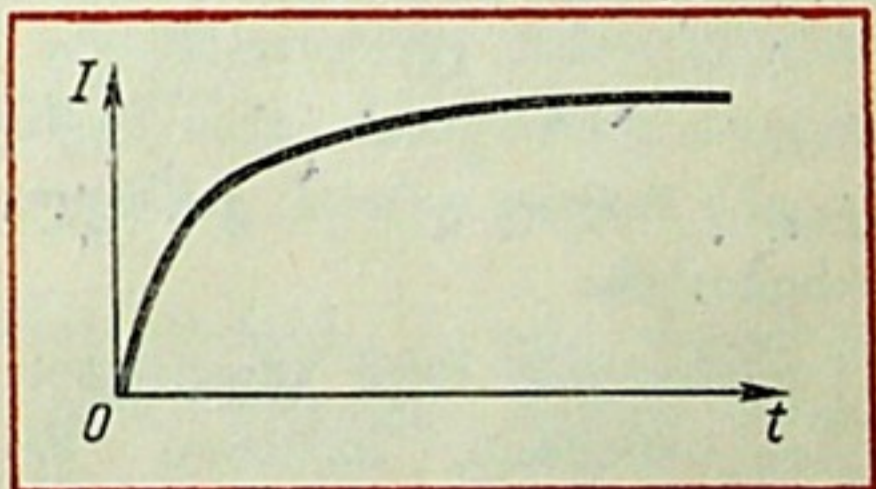
ამ მოვლენას თვითინდუქციას უწოდებენ. თვითინდუქციის დროს გამტარი კონტური ორგვარ როლს ასრულებს: მასში გადის დენი, რომელიც ინდუქციას იწვევს და მასშივე აღიძვრება ინდუქციის ემ ძალა:  $\int$  ცვლადი მაგნიტური ველი ინდუქციის ემ ძალას წარმოქმნის იმავე გამტარში, რომელშიც ამ ველის წარმოქმნელი დენი გადის.

ლენცის წესის თანახმად, დენის ზრდისას გრიგალური ელექტრული ველის დაძაბულობა დენის საპირისპიროდ არის მიმართული. მაშასადამე, ამ დროს გრიგალური ველი დენის ზრდას ეწინააღმდეგება. პირიქით, დენის კლებისას გრიგალური ველი ხელს უშლის დენის კლებას.

ამითაა გამოწვეული, რომ მუდმივი ემ ძალის შემცველი წრედის შეკვრისას, დენის ძალა აღწევს გარკვეულ მნიშვნელობას არა ერთბაშად, არამედ თანდათანობით, რაღაც დროის განმავლობაში (სურ. 243). ასევე, წყაროს გამორთვისას დენი შეკრულ კონტურებში უცბად არ წყდება. თვითინდუქციის ემ ძალა შეიძლება მეტი იყოს წყაროს ემ ძალაზე, რადგანაც დენისა და მისი მაგნიტური ველის ცვლილებების სიჩქარე წყაროს გამორთვისას ძალიან დიდია.

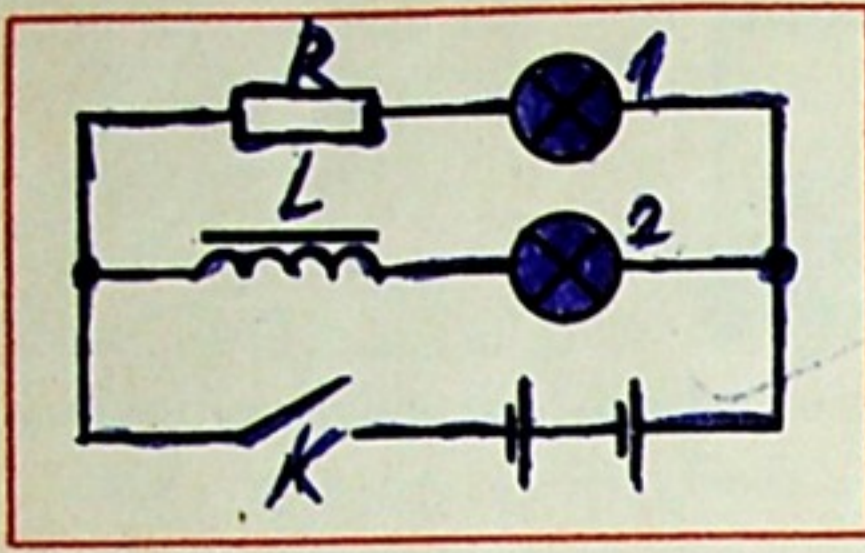
თვითინდუქციის მოვლენას შეიძლება მარტივი ცდებით დავაკვირდეთ. 244-ე სურათზე ნაჩვენებია ორი ერთნაირი ნათურის პარალელური ჩართვის სქემა: ერთ მათგანს წყაროს მიუერთებენ  $R$  წინაღობის რეზისტორით, მეორეს კი — რკინის გულარიან  $L$  ინდუქციურობის კოჭას მიმდევრობით.

ჩამრთველით წრედის შეკვრისას პირველი ნათურა პრაქტიკულად ერთბაშად აკაშკაშდება, მეორე კი — შესამჩნევი დაგვიანებით. მეორე ნათურას წრედში თვითინდუქციის ემ ძალა დიდია, ამიტომ დენის ძალა ერთბაშად ვერ აღწევს თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას.

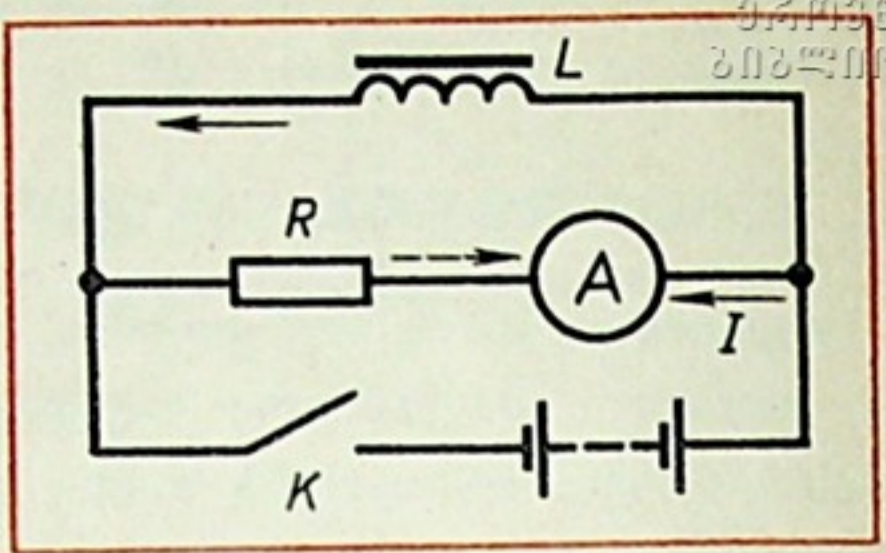


სურ. 243.





სურ. 244.



სურ. 245.

იმ წრედის სქემა, რომელიც საშუალებას გვაძლევს დავაკვირდეთ თვითინდუქციის ემ ძალის აღძვრას განრთვისას, გამოსახულია 245-ე სურათზე.  $K$ -თი წრედის განრთვისას  $L$  კოჭაში აღიძვრება თვითინდუქციის ემ ძალა, რომელიც ხელს უწყობს პირვანდელი დენის შენარჩუნებას. ამიტომ განრთვის მომენტში გალვანომეტრში გაივლის დენი (წყვეტილი ისარი), რომელიც მიმართულია განრთვამდე არსებული დენის საპირისპიროდ (უწყვეტი ისარი). ამ დენის ძალა წრედის განრთვისას შეიძლება მეტი იქნეს იმ დენის ძალაზე, რომელიც გალვანომეტრში გადის წრედის განრთვამდე ( $I_s > I$ ).

ანალოგია თვითინდუქციასა და ინერციას შორის. თვითინდუქციის მოვლენა მსგავსია ინერციის მოვლენისა. მართლაც, ინერციის გამო ძალა სხეულს განსაზღვრულ სიჩქარეს ანიჭებს არა მეყსეულად, არამედ თანდათანობით. სხეული მეყსეულად ვერ გაჩერდება, სწორედ ასევე, წრედის ჩართვისას, თვითინდუქციის გამო, დენი განსაზღვრულ მნიშვნელობას ღებულობს არა მეყსეულად, არამედ თანდათანობით. წრედის განრთვისას დენი მეყსეულად არ ისპობა, თვითინდუქცია მას აკავებს რაღაც დროის განმავლობაში, მიუხედავად წრედის წინააღმდეგობის არსებობისა.

იმისათვის, რომ გავადიდოთ სხეულის სიჩქარე, მექანიკის კანონების თანახმად, საჭიროა შევასრულოთ მუშაობა. დამუხრუჭების დროს სხეული თვითონ ასრულებს მუშაობას. სწორედ ასევე, დენის მისაღებად მუშაობა უნდა შევასრულოთ გრიგალური ელექტრული ველის წინააღმდეგ. დენის მოსპობის დროს კი ეს ველი თვითონ ასრულებს დადებით მუშაობას.

ინდუქციურობა  $L$  დენის მიერ შექმნილი მაგნიტური ველის ინდუქციის  $B$  მოდული პროპორციულია დენის ძალისა. და რადგან  $\Phi$  მაგნიტური ნაკადი პროპორციულია  $B$ -სი, ამიტომ  $\Phi \sim B \sim I$ .

ამრიგად, შეიძლება ვთქვათ, რომ

$$\boxed{\Phi = LI,} \quad (12.5)$$

5



სადაც  $L$  პროპორციულობის კოეფიციენტია კონტურში გამავალ დენსა და მის მიერ შექმნილ კონტურის გამჭოლ მაგნიტურ ნაკადს შორის.  $\int$

$L$  სიდიდეს კონტურის ინდუქციურობას ანუ თვით-ინდუქციის კოეფიციენტს უწოდებენ.  $\int$

ამ გამოვიყენებთ ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონს და (12.5) გამოსახულებას, მივიღებთ ტოლობას:

$$\mathcal{E}_{IS} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad \int \quad (12.6)$$

აქ ნაგულისხმევაა, რომ კონტურის ფორმა უცვლელი რჩება და ნაკადი მხოლოდ დენის შეცვლის შედეგად იცვლება.

(12.6) ფორმულიდან გამომდინარეობს, რომ ფიზიკური სიდიდე — ინდუქციურობა — რიცხობრივად ტოლია თვითინდუქციის ემ ძალისა, რომელიც კონტურში აღიძვრება ერთ წამში დენის ძალის ერთი ამპერით შეცვლისას.  $\int$

ინდუქციურობა, მსგავსად ელექტროტევადობისა, დამოკიდებულია გეომეტრიულ ფაქტორებზე: გამტარის ზომებსა და მის ფორმაზე, მაგრამ არაა უშუალოდ დამოკიდებული გამტარში არსებულ დენზე. გარდა გამტარის ფორმისა, ინდუქციურობა დამოკიდებულია იმ გარემოს მაგნიტურ თვისებებზე, რომელშიც გამტარია მოთავსებული.

$SI$  სისტემაში ინდუქციურობის ერთეულს ჰენრი (შემოკლებით ჰნ) ეწოდება. გამტარის ინდუქციურობა 1 ჰენრის ტოლია, თუ მასში 1 წამში დენის ძალის 1 ამპერით შეცვლისას 1 ვ თვითინდუქციის ემ ძალა აღიძვრება:

$$1 \text{ ჰნ} = \frac{1 \text{ ვ}}{1 \frac{\text{ა}}{\text{წმ}}} = 1 \frac{\text{ვ} \cdot \text{წმ}}{\text{ა}}. \quad \int$$

თვითინდუქციის მოვლენა დიდმნიშვნელოვან როლს ასრულებს ელექტროტექნიკასა და რადიოტექნიკაში. წრედის ინდუქციურობა არსებით გავლენას ახდენს წრედში ცვლადი დენის გავლაზე. ამის შესახებ დაწვრილებით იქნება მოთხრობილი XI კლასის ფიზიკის კურსში.

## 97. დენის მაგნიტური ველის ენერგია

ვიბოვით ენერგია, რომელიც აქვს ელექტრულ დენს გამტარში. ენერგიის მუდმივობის კანონის თანახმად, დენის ენერგია ტოლია იმ ენერგიისა, რომელიც დენის წყარომ (გალვანური ელემენტი, ელექ-

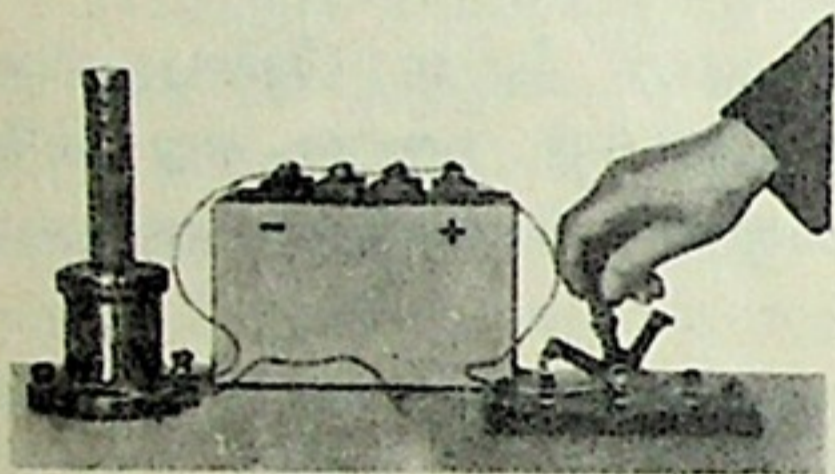


ტროსადგურის გენერატორი და სხვ.) უნდა დახარჯოს დენის წარმოქმნაზე. დენის შეწყვეტისას ეს ენერგია ამა თუ იმ ფორმით გამოიყოფა.

გავარკვიოთ, თუ რატომაა დენის მისაღებად აუცილებელი ენერგიის დახარჯვა, ე. ი. მუშაობის შესრულება. ეს იმით აიხსნება, რომ წრედის შეკვრისას, როცა დენი ზრდას იწყებს, გამტარში იქმნება გრიგალური ელექტრული ველი — მიმართული იმ ელექტრული ველის<sup>1</sup> წინააღმდეგ, რომელსაც გამტარში დენის წყარო ქმნის. ამისათვის, რომ დენის ძალა  $I$ -ს ტოლი გახდეს, დენის წყარომ მუშაობა უნდა შეასრულოს გრიგალური ველის ძალების წინააღმდეგ. სწორედ ეს მუშაობა ხმარდება დენის მაგნიტური ველის ენერგიის გაზრდას.

წრედის განრთვისას დენი ისპობა და გრიგალური ველი დადებით მუშაობას ასრულებს. დენის მიერ მომარაგებული ენერგია გამოიყოფა, რაც მუდავნდება საკმაოდ მძლავრი ნაპერწკლით, რომელიც დიდი ინდუქციურობის წრედში წარმოიქმნება (სურ. 246).

$L$  ინდუქციურობის წრედში  $I$  დენის ენერგიის გამოსახულების ჩაწერა შეიძლება იმ ანალოგიის გათვალისწინებით, რომელიც ინერციასა და თვითინდუქციას შორის არსებობს (ამის შესახებ ითქვა 96-ე პარაგრაფში).



სურ. 246.

თუ თვითინდუქცია ინერციის ანალოგიური მოვლენაა, მაშინ ინდუქციურობამ დენის ცვლილების პროცესში ისეთივე როლი უნდა შეასრულოს, როგორც მასამ სხეულის სიჩქარის ცვლილებაში. სხეულის სიჩქარის როლს ელექტროდინამიკაში  $I$  დენის ძალა ასრულებს, როგორც ელექტრული

მუხტების მოძრაობის დამახასიათებელი სიდიდე.

თუ ეს ასეა, მაშინ დენის ენერგია  $W_8$  შეიძლება ჩავთვალოთ სხეულის კინეტიკური ენერგიის  $\left(\frac{mv^2}{2}\right)$  მსგავს სიდიდედ და გამოვსახოთ შემდეგნაირად:

$$\left[ W_8 = \frac{LI^2}{2} \right] \quad (12.7)$$

<sup>1</sup> ამ ელექტრულ ველს ქმნის გამტარის ზედაპირზე მყოფი დამუხტული ნაწილაკები, განსხვავებით გრიგალური ველისაგან, რომელსაც ცვლადი მაგნიტური ველი ქმნის.



გამოთვლების მიხედვითაც სწორედ ასეთი გამოსახულება მიიღება დენის ენერჯისათვის.

(12.7)-ის მიხედვით დენის ენერჯია გამოსახულია გამტარის  $L$  გეომეტრიული მახასიათებლით და მასში გამავალი  $I$  დენის ძალით. მაგრამ იგივე ენერჯია შეიძლება გამოვსახოთ ველის მახასიათებლითაც. გამოთვლები გვიჩვენებს, რომ მაგნიტური ველის ენერჯის სიმკვრივე (ე. ი. მოცულობის ერთეულის ენერჯია) პროპორციულია მაგნიტური ინდუქციის კვადრატისა, მსგავსად იმისა, როგორც ელექტრული ველის ენერჯის სიმკვრივე პროპორციულია ელექტრული ველის დაძაბულობის კვადრატისა.

- 9 1. რას ეწოდება თვითინდუქცია? 2. როგორაა მიმართული დენის მიმართ გრიგალური ელექტრული ველი გამტარში დენის ძალის ზრდისა და შემცირებისას? 3. რას ეწოდება გამტარის ინდუქციურობა? 4. რა ერთეულებით იზომება ინდუქციურობა? 5. რას უდრის თვითინდუქციის ემ ძალა? 6. რატომ ხარჯავს წყარო ენერჯიას დენის შექმნისათვის? 7. რას უდრის ელექტრული დენის ენერჯია?

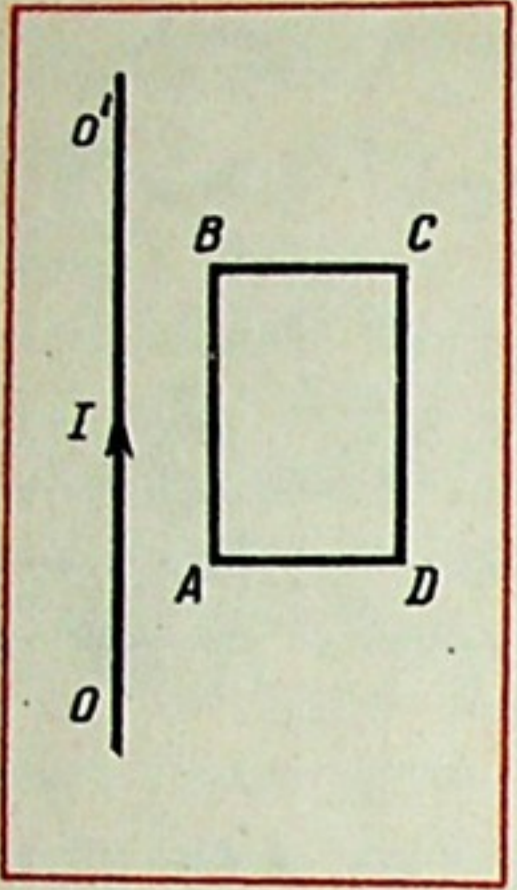
**ამოცანათა ამოხსნის ნიშნუხები**

ელექტრომაგნიტური ინდუქციის შესახებ ამოცანების ამოხსნისათვის უნდა ვიცოდეთ ინდუქციური დენის მიმართულების განსაზღვრა ლენცის წესის საშუალებით. ინდუქციის ემ ძალა გამოითვლება ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონის გამომსახველ (12.2) ან (თუ გამტარი მოძრაობს მაგნიტურ ველში) (12.4) ფორმულით. თვითინდუქციის ემ ძალა გამოითვლება (12.6), ხოლო დენის ენერჯია — (12.7) ფორმულით. ზოგიერთი ამოცანის ამოხსნისათვის უნდა გამოვიყენოთ ამპერის ძალის (11.4) ფორმულა.

1.  $ABCD$  მართკუთხა კონტური გადაადგილდება (მოძრაობა გადატანითია) გრძელ წრფივ გამტარში გამავალი დენის მაგნიტურ ველში (სურ. 247). განვსაზღვროთ კონტურში აღძრული ინდუქციური დენის მიმართულება, თუ კონტური შორდება გამტარს. რა ძალები მოქმედებს ჩარჩოზე?

**ამოხსნა.**  $I$  დენის მაგნიტური ველის  $\vec{B}$  მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი მიმართულია ჩვენგან კონტურის სიბრტყის მართობულად. გამტარიდან კონტურის დაშორებისას  $ABCD$  ფართობის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი კლებულობს ( $\Delta\Phi < 0$ ). მაშასადამე,  $I_i$  დენის მაგნიტური ველის  $\vec{B}'$  მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი, ლენცის წესის თანახმად, მიმართულია ჩვენგან, ისევე როგორც  $\vec{B}$  ვექტორი. ბურღის წესის გამოყენებით ვღებულობთ, რომ კონტურში ინდუქციური დენი მიმართულია საათის ისრის მოძრაობის მიმართულებით.





სურ. 247.

კონტურისა და წრფივი გამტარის დენების ურთიერთქმედება წარმოქმნის ძალებს, რომლებიც კონტურის გამტარებზე მოქმედებენ. მარცხენა ხელის წესის გამოყენებით გავარკვევთ, რომ ეს ძალები, ჯერ ერთი, ცდილობენ ჩარჩოს გაჭიმვას, ე. ი. მის მიერ შემოსაზღვრული ფართობის გადიდებას, მეორეც, ქმნიან წრფივი გამტარისაკენ მიმართულ მაჯამებელ ძალას. ორივე მოქმედება „ცდილობს“ წინააღმდეგობა გაუწიოს კონტურის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის შემცირებას.

2. ზეგამტარისაგან დამზადებული რგოლი მოთავსებულია ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში, რომლის ინდუქცია იზრდება ნულიდან  $B_0$ -მდე. რგოლის სიბრტყე მართობულია ველის ინდუქციის წირებისადმი. გავიგოთ რგოლში აღძრული ინდუქციური დენის ძალა. რგოლის რადიუსი არის  $r$ , ინდუქციურობა —  $L$ .

ამოხსნა. რადგან რგოლის წინაღობა ნულის ტოლია, ჯამური ელექტრომამოძრავებელი ძალა მასში ნულის ტოლი უნდა იყოს. წინააღმდეგ შემთხვევაში ომის კანონის თანახმად დენის ძალა უსასრულოდ დიდი გახდებოდა. ამრიგად, გარე მაგნიტური ველის მაგნიტური ნაკადის ცვლილება მოდულით ტოლი და ნიშნით საპირისპიროა ინდუქციური დენით შექმნილი მაგნიტური ნაკადის ცვლილებისა:  $\Delta\Phi = L\Delta I$ . თუ გავითვალისწინებთ, რომ  $\Phi_0$  ნაკადი იზრდება 0-დან  $\pi r^2 B_0$ -მდე, და ამ დროს ინდუქციური დენი იცვლება 0-დან  $I$ -მდე, მივიღებთ:

$$\pi r^2 B_0 = LI.$$

აქედან

$$I = \frac{\pi r^2 B_0}{L}.$$

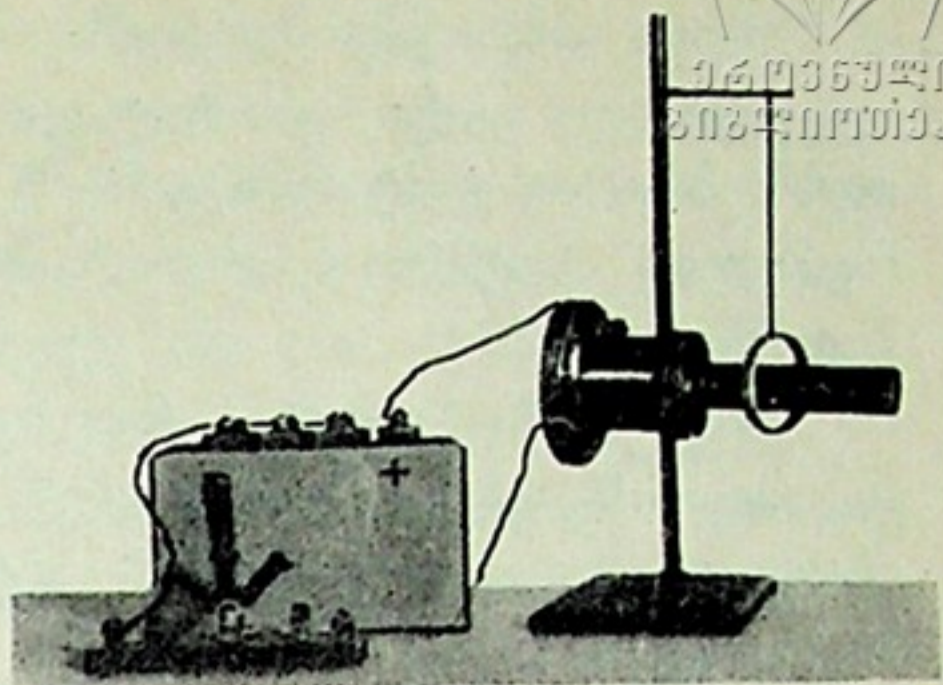
**ს ა ვ ა რ ჯ ი შ ი 15**

1. ჩამრთველი (231-ე სურათზე გამოსახულ სქემაში) ეს-ეს არის ჩართეს. ზემოდან დამზერისას დენი ქვედა კოჭაში მიმართულია საათის ისრის მოძრაობის საპირისპიროდ. როგორია დენის მიმართულება ზედა კოჭაში, თუ ის უძრავია?
2. მაგნიტი (სურ. 233, ბ) ამოაქვთ კოჭადან. განსაზღვრეთ ინდუქციური დენის მიმართულება კოჭაში.
3. განსაზღვრეთ ინდუქციური დენის მიმართულება მთლიან რგოლში, რომელსაც მაგნიტს უახლოებენ (სურ. 235).
4.  $OO'$  გამტარში (სურ. 247) დენის ძალა მცირდება. იპოვეთ ინდუქციური დენის მიმართულება  $ABCD$  უძრავ კონტურში და იმ ძალების მიმართულება, რომლებიც კონტურის თითოეულ გვერდზე მოქმედებს.



5. ლითონის რგოლს თავისუფლად შეუძლია გადაადგილდეს მუდმივი დენის წრედში ჩართულ კოჭას გულარზე (სურ. 248). რა მოხდება წრედის შეკვრისა და განრთვის დროს?

6. დენის ძალა კოჭაში დროის პროპორციულად იზრდება. როგორი დამოკიდებულებაა დენის ძალასა და დროს შორის მეორე კოჭაში, რომელიც პირველთან ინდუქციურად არის დაკავშირებული?



სურ. 248.

7. როდის უფრო სწრაფად მიიღევა მაგნიტოელექტრული ხელსაწყოს ისრის რხევა: ხელსაწყოს მოძვერების მოკლედ შერთვისა, თუ განრთვისას?

8. გამტარი კონტურის წინალობაა  $3 \cdot 10^{-2}$  ომი. ამ კონტურის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადი 2 ვმ-ში  $1,2 \cdot 10^{-2}$  ვბ-ით იცვლება. იპოვეთ დენის ძალა კონტურში, თუ ნაკადის ცვლა თანაბარია.

9. თვითმფრინავი მიფრინავს პორიზონტალურად 900 კმ/სთ სიჩქარით. იპოვეთ ფრთების ბოლოებს შორის აღძრული პოტენციალთა სხვაობა, თუ დედამიწის მაგნიტური ველის მაგნიტური ინდუქციის ვერტიკალური მდგენელის მოდულია  $5 \cdot 10^{-5}$  ტლ, ხოლო თვითმფრინავის ფრთაგაშლილობა 12 მ.

\* 10. კოჭაში, რომლის ინდუქციურობაა 0,15 ვნ,  $r$  წინალობა კი ძალიან მცირეა, აღიძრა 4 ა დენი. კოჭას პარალელურად შეუერთეს  $R \gg r$  წინალობის რეზისტორი: რა სითბოს რაოდენობა გამოიყოფა კოჭასა და რეზისტორში წყაროს სწრაფი გამორთვისას?

მოკლემ დასკვნა

ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენა იმაში მდგომარეობს, რომ ჩაკეტილ კონტურში აღიძვრება ინდუქციის ემ ძალა, ამ კონტურით შემოსაზღვრული ფართობის გამჭოლი მაგნიტური ნაკადის ცვლილებისას.

ეს მოვლენა საფუძვლად უდევს მსოფლიოს ყველა ელექტროსადგურის გენერატორების მუშაობას. ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონის თანახმად, შეკრულ კონტურში აღძრული ემ ძალა ტოლია მინუს ნიშნით აღებული მაგნიტური ნაკადის ცვლილების სიჩქარისა:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

ლენცის წესის თანახმად ჩაკეტილ კონტურში აღძრული ინდუქციური დენი ეწინააღმდეგება მაგნიტური ნაკადის იმ ცვლილებას, რომელმაც დენი წარმოშვა.



უძრავ გამტარში მუხტებზე მოქმედი გარეშე ძალაა გრიგალური ელექტრული ველი, რომელსაც ცვლადი მაგნიტური ველი წარმოშობს. მოძრავ გამტარში გარეშე ძალაა ლორენცის მაგნიტური ძალა, რომელიც გამტართან ერთად მოძრავ დამუხტულ ნაწილაკებზე მოქმედებს.

ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მნიშვნელოვანი კერძო შემთხვევაა თვითინდუქცია. თვითინდუქციის დროს ცვლადი მაგნიტური ველი აღძრავს ემ ძალას თვით იმ გამტარში, რომელშიც ამ ველის წარმოშობი დენი არსებობს.

თვითინდუქციის ემ ძალა პროპორციულია გამტარში დენის ძალის ცვლილების სიჩქარისა:

$$\mathcal{E}_{is} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

პროპორციულობის  $L$  კოეფიციენტს ინდუქციურობა ეწოდება. ინდუქციურობა დამოკიდებულია გამტარის ზომებსა და ფორმაზე, აგრეთვე იმ გარემოს თვისებებზე, რომელშიც გამტარი იმყოფება. ის იზომება ჰენრებით:

$$1 \text{ ჰნ} = 1 \frac{\text{ვ} \cdot \text{წმ}}{\text{ა}}.$$

დენის მაგნიტური ველის ენერგია  $W_{\text{მ}} = \frac{LI^2}{2}$  ტოლია იმ მუშაობისა, რომელიც წყარომ უნდა შეასრულოს მოცემული დენის წარმოქმნისათვის.

## დასკვნა

ელექტროდინამიკის შესწავლა არ მთავრდება ელექტრომაგნიტური ინდუქციის გაცნობით. აქამდე განვიხილეთ ელექტრომაგნიტური მოვლენები მხოლოდ უძრავი ელექტრული მუხტებისა (მუდმივი ელექტრული ველი) და მუდმივი სიჩქარით მოძრავი მუხტების (მუდმივი მაგნიტური ველი) შემთხვევებში. მართო იმ თავში, რომელიც ელექტრომაგნიტურ ინდუქციას ეხება, გავეცანით დროში ცვლად ელექტრომაგნიტურ ველს. ცვლადი და სწრაფცვლადი ელექტრომაგნიტური მოვლენების მეტად ფართო ყველაზე საინტერესო და პრაქტიკულად უფრო მნიშვნელოვანი დარგი შეუსწავლელი გვრჩება.

ელექტროდინამიკის იმ ფუნდამენტურ კანონებზე დაყრდნობით, რომლებიც უკვე შევისწავლეთ, XI კლასში ჯერ გავეცნობით ცვლადი



დენის თვისებებს, მიღებასა და გამოყენებას, შემდეგ — ელექტრო-  
მაგნიტური ველის კიდევ ერთ ფუნდამენტურ თვისებას: ცვლადი ელ-  
ექტრული ველით მაგნიტური ველის წარმოქმნას (ელექტრომაგნიტუ-  
რი ინდუქციის შებრუნებულ მოვლენას). ამის შემდეგ გადავალთ  
სწრაფცვლადი ელექტრომაგნიტური ველებისა და ელექტრომაგნიტუ-  
რი ტალღების შესწავლაზე. ყოველივე ამის შემდეგ, თქვენთვის ზო-  
გადად ცნობილი გახდება ბუნებაში ელექტრომაგნიტური პროცესების  
სრული სურათი და მაშინ შეიძლება ელექტროდინამიკის გაცნობა  
ჩავთვალოთ დამთავრებულად.



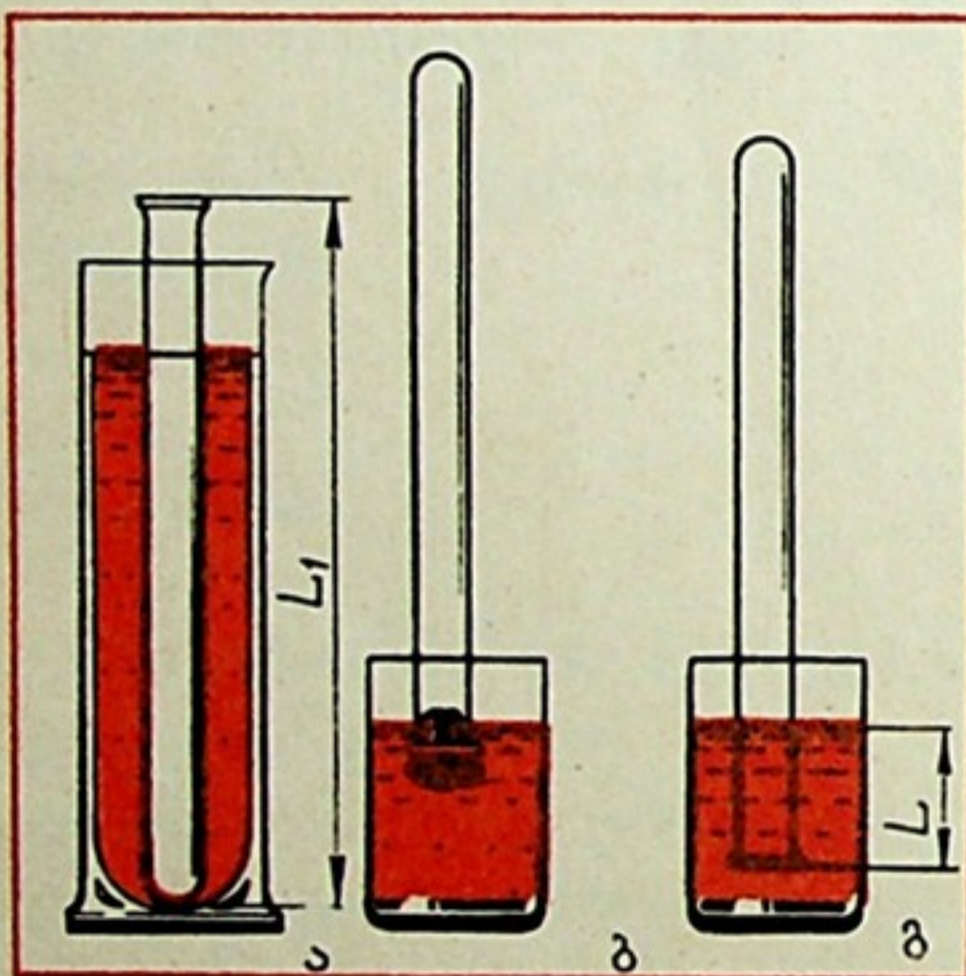
1. გეი-ლუსაკის კანონის ცდინათელი დადასტურება

ქვემოთ აღწერილი მოწყობილობით ექსპერიმენტულად შევისწავლით ოზობარულ პროცესს. ამისათვის აირის მოცულობათა შეფარდებას შევადარებთ ტემპერატურათა შეფარდებას მუდმივი წნევის დროს.

ხელსაწყოები და მასალები: თერმომეტრი, საზომი სახაზავი მილიმეტრული დანაყოფებით, 600 მმ სიგრძისა და 8—10 მმ დიამეტრის შინის წვრილი მილი, რომლის ერთი ბოლო დარჩილულია 600 მმ სიგრძისა და 40—50 მმ დიამეტრის ცილინდრული ჭურჭელი, შტატივი, კალორიმეტრის გარე ჭიქა, პლასტილინი.

შითითება

1. გაზომეთ წვრილი მილის  $L_1$  სიგრძე.
2. აავსეთ შტატივზე დამაგრებული ცილინდრული ჭურჭელი ცხელი წყლით (ტემპერატურა არაუმეტეს  $60^{\circ}\text{C}$ -სა).
3. ცხელი წყლით სავსე ჭურჭელში ჩაუშვით წვრილი მილი მიჩილული ბოლოთი ქვემოთ. გააჩერეთ 3—5 წუთს (სურ. 249, ა).



სურ. 249.

ჭიქაში მანამ, სანამ წყლის დონე დონეს ჭიქაში; გაზომეთ მილის წყალშია მოთავსებული (სურ. 249, გ).

4. გაზომეთ ცხელი წყლის ტემპერატურა  $T_1$ ; კარგად ამოლესეთ მილის ღია ბოლო პლასტილინით. ამოიღეთ მილი ცხელი წყლიდან და მაშინვე ჩაუშვით ის თავდაცობილი ბოლოთი ქვემოთ კალორიმეტრის ჭიქაში, რომელშიც ოთახის ტემპერატურის წყალი ასხია; მოაშორეთ პლასტილინი (სურ. 249, ბ). ჰაერის გაცივებასთან ერთად წყალი დაიწყებს შესვლას მილში.

5. როდესაც წყლის შესვლა მილში შეწყდება ჩაუშვით მილი მილში არ გაუტოლდება წყლის იმ ნაწილის  $L$  სიგრძე, რომელიც

1 № 1—6 ლაბორატორიული სამუშაოების ინსტრუქციები შეადგინეს ი. ი. დიკა და გ. გ. ნიკოფოროვი.



6. გაზომეთ ჰაერის  $T_2$  ტემპერატურა ოთახში.

7. გაზომვის შედეგები შეიტანეთ ცხრილში.

მილის სიგრძე $L_1$ მმ.	ტემპერატურა ცხელი წყლის		მილში შესული წყლის სვეტის სიმაღლე $L$ მმ	წვრილი მილის წყალზედა ნაწი- ლის სიგრძე $L_2 = L_1 - L$ მმ	ჰაერის ტემპე- რატურა	
	$t_1, ^\circ\text{C}$	$T_1, \text{K}$			$t_2, ^\circ\text{C}$	$T_2, \text{K}$

8. შეადარეთ შეფარდებანი:  $\frac{T_1}{T_2}$  და  $\frac{V_1}{V_2}$  რადგან  $V_1 = SL_1$  და  $V_2 = SL_2$

( $S$  მილის განივკვეთის ფართობია), ამიტომ  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{L_1}{L_2}$ .

9. თეორიულად, გეი-ლუსაკის კანონის თანახმად,  $\frac{T_1}{T_2} = \frac{V_1}{V_2}$  ანუ

$\frac{T_1}{T_2} : \frac{V_1}{V_2} = 1$  ეს გამოსახულება ცდის დროს გაზომილი სიდიდეების ( $T_1,$

$T_2, L_1, L_2$ ) ჩასმის შემდეგ შეიძლება განსხვავებული იქნეს ერთის-  
გან. ამის მიხედვით ჩვენ შევაფასებთ კანონის ცდისეული დადასტუ-  
რების ფარდობით ცდომილებას

$$\frac{\left| \frac{T_1}{T_2} : \frac{L_1}{L_2} - 1 \right|}{1} 100\%.$$

## 2. სითხის ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტის განსაზღვრა

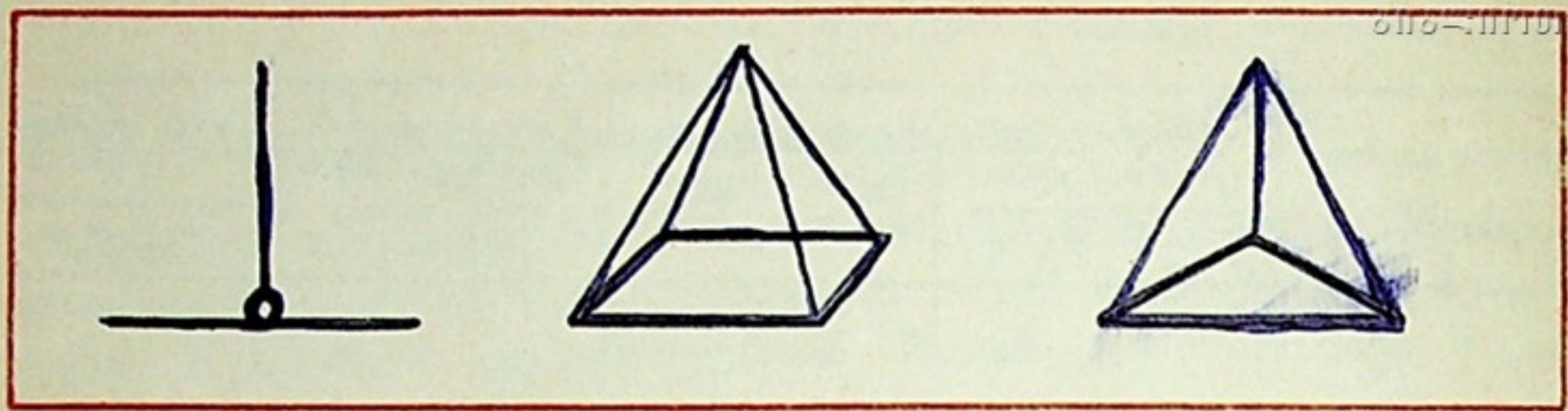
ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტის განსაზღვრისას ყვე-  
ლაზე მოხერხებულია ვისარგებლოთ იმ დამოკიდებულებით, რომე-  
ლიც არსებობს ზედაპირული დაჭიმულობის ძალასა და ზედაპირული  
ფენის საზღვრის სიგრძეს შორის —  $F = \sigma L$ .

ხელსაწყოები და მასალები: სასწორი საწონებით, შტა-  
ტივი, სინჯარა სილით, შტანგენფარგალი ან საზომი სახაზავი მილი-  
მეტრული დანაყოფებით, ქალაღის ფურცელი, ძაფზე დაკიდებული  
მავთული ან მავთულის ჩარჩო (სურ. 250).

### მ ი თ ი თ ე ბ ა

1. ჩაამაგრეთ სასწორი შტატივის მომჭერში.
2. გაზომეთ შტანგენფარგლით ან მასშტაბიანი სახაზავით მავთუ-  
ლის სიგრძე (ჩარჩოს პერიმეტრი).





სურ. 250.

3. მიაბით სასწორის ერთ-ერთ პინას ძაფი, რომელზეც დაკიდებულია მავთული ან ჩარჩო და სასწორი სილით გააწონასწორეთ (სილა დაყარეთ პინაზე დადებულ ქალაღდის ფურცელზე).

4. მიაღწიეთ მავთულის ან ჩარჩოს პორიზონტალურ მდებარეობას.

5. პინის ქვემოთ მოათავსეთ წყლიანი ჭიქა ისე, რომ წყლის ზედაპირი მავთულიდან დაშორებული იყოს 1—2 სმ-ით.

6. ფრთხილად დაუშვით მავთული ან ჩარჩო ისე, რომ შეეხოს წყლის ზედაპირს და „შეეწებოს“ მას.

7. დიდი სიფრთხილით ამატეთ სილა წყლის ზედაპირიდან მავთულის (ჩარჩოს) მოწყვეტამდე.

8. გაამშრალეთ მავთული (ჩარჩო) ფილტრის ქალაღდით და კვლავ გააწონასწორეთ სასწორი, მაგრამ ახლა უკვე საწონებით.

9. სილის  $m$  მასის განსაზღვრისას მოქმედებს სხვადასხვა ფაქტორი (მავთულის ან ჩარჩოს არაერთდროული მოწყვეტა წყლის ზედაპირიდან, სასწორის უღლის რხევა და სხვ.), რომლებიც მასის რიცხვით მნიშვნელობას „შეათამაშებს“. ამიტომ საჭიროა ჩაატაროთ რამდენიმე ცდა და მონახოთ საშუალო მნიშვნელობა:

$$m_{საშ} = \frac{m_1 + m_2 + m_3 + \dots}{n}$$

გაზომვის ცდომილების შეფასებისთვის მონახეთ საშუალო აბსოლუტური ცდომილება

$$\Delta m_{საშ} = \frac{|m_1 - m_{საშ}| + |m_2 - m_{საშ}| + |m_3 - m_{საშ}| + \dots}{n}$$



გაიმეორეთ ცდა ხუთჯერ და შეავსეთ ცხრილი:



$n$	$m$ , კგ	$m_{საშ}$ , კგ	$\Delta m =  m - m_{საშ} $ , კგ	$\Delta m_{საშ}$ , კგ	ს. მ
1					
2					
3					
4					
5					

10. გაზომეთ ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტი.

$$\sigma_{საშ} = \frac{m_{საშ} g}{2l}$$

11. გაითვალისწინეთ, რომ გაზომილი სიდიდეების გაყოფისა და გამრავლების დროს ფარდობითი ცდომილებები იკრიბება, მონახეთ ზედაპირული დაჭიმულობის კოეფიციენტის გაზომვის ფარდობითი ცდომილება.

$$\varepsilon_{\sigma} = \varepsilon_m + \varepsilon_g + \varepsilon_l$$

$\varepsilon_m$ -ის გამოთვლისას საჭიროა გაითვალისწინოთ შემდეგი: გაზომვის თეორიის თანახმად იმ ცდომილების შეფასებისათვის, რომელიც დაკავშირებულია გაზომვის პროცესში სიდიდის მნიშვნელობათა შემთხვევით გაფანტვასთან, შეიძლება გამოვიყენოთ საშუალო აბსოლუტური ცდომილება, რომელიც მიიღება უცვლელ პირობებში ცდის ათჯერ ჩატარების შემდეგ. ცდის ხუთჯერ ჩატარების შემთხვევაში კი საჭიროა საშუალო აბსოლუტური ცდომილება გავადიდოთ სამჯერ, რათა სწორად შევაფასოთ გაზომვის მაქსიმალური ცდომილება. მოცემულ სამუშაოში  $\varepsilon_m = \frac{3 \cdot \Delta m_{საშ}}{m_{საშ}}$  (საწონებისა და სასწორის ცდომილება შეიძლება უგულებელვყოთ).

თუ  $g$  სიდიდეს დავამრგვალებთ 9,8 მ/წმ<sup>2</sup>-მდე, მაშინ  $\varepsilon_g \approx 0,002$  და გამოთვლებში შეიძლება მხედველობაში არ მივიღოთ.

$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l}$  ცდომილების გამოთვლისას შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ

მილიმეტრული სახაზავის გამოყენების დროს  $\Delta l$  არ აღემატება 1 მმ-ს.

თუ  $\varepsilon_l$  არსებითად ნაკლებია  $\varepsilon_m$ -ზე, მაშინ  $\varepsilon_l$  შეიძლება არ გავითვალისწინოთ.



12. გამოთვალეთ  $\Delta\sigma = \sigma_{საშ} \cdot \epsilon_{\sigma}$  და პასუხი ჩაწერეთ შემდეგი სახით:

$$\sigma_{საშ} - \Delta\sigma \leq \sigma \leq \sigma_{საშ} + \Delta\sigma.$$



8. მასალის დრეკადობის მოდულის განსაზღვრა

დრეკადობის მოდულის გაზომვის ერთ-ერთი ხერხი დამყარებულია ჰუკის კანონზე:  $\sigma = E\epsilon$ . ყველაზე ადვილია რეზინის დრეკადობის მოდულის გაზომვა, რადგან მცირე დატვირთვების დროს ის საგრძნობ დეფორმაციას განიცდის.

ხელსაწყოები და მასალები: საწონები, საზომი სახაზავი მილიმეტრული დანაყოფებით ან შტანგენფარგალი, შტატივი, მსუბუქი თვითნაკეთი კოლოფი საწონებისთვის, რეზინის ნიმუში დაახლოებით 40 სმ სიგრძისა.

მითითება

1. გაზომეთ ნიმუშის სისქე  $(b = \frac{B}{N})$  და სიგანე  $(a = \frac{A}{N})$

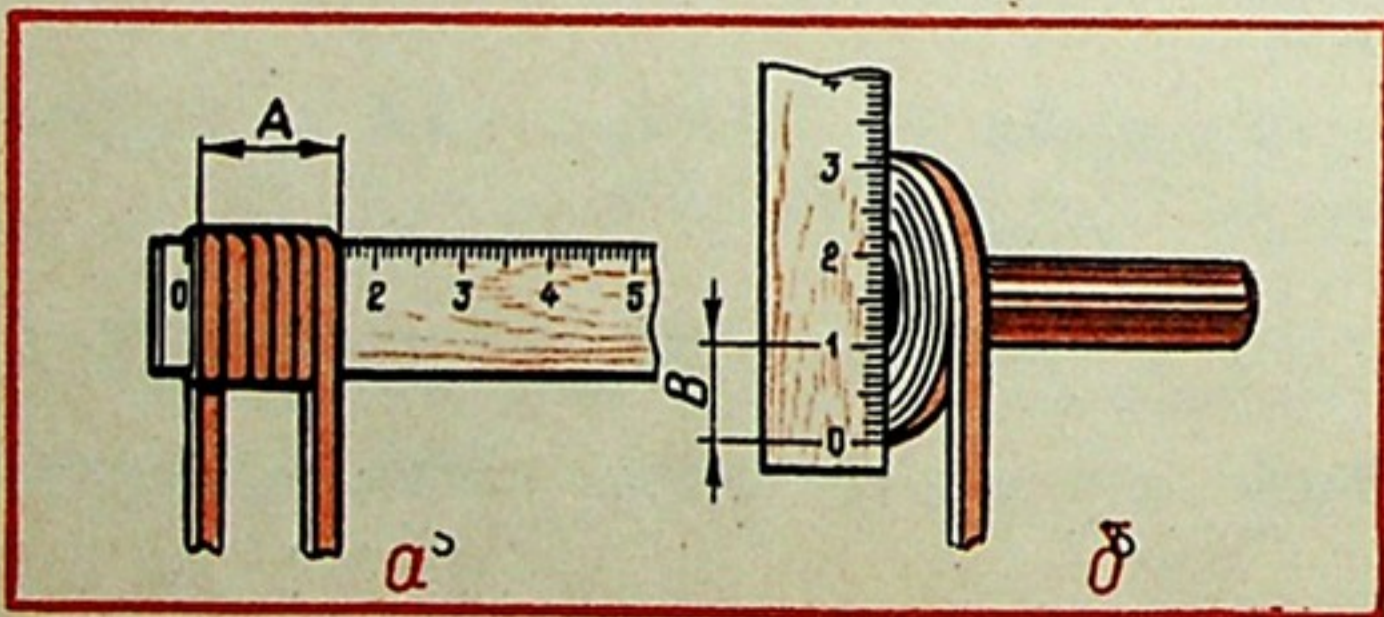
მართკუთხა კვეთის შემთხვევაში, ან დიამეტრი წრიული კვეთის შემთხვევაში (სურ. 251, ა, ბ).

2. ჩამოკიდეთ ნიმუში ერთ-ერთი ბოლოთი შტატივზე და მის მეორე ბოლოს მიამაგრეთ საწონების კოლოფი (სურ. 252).

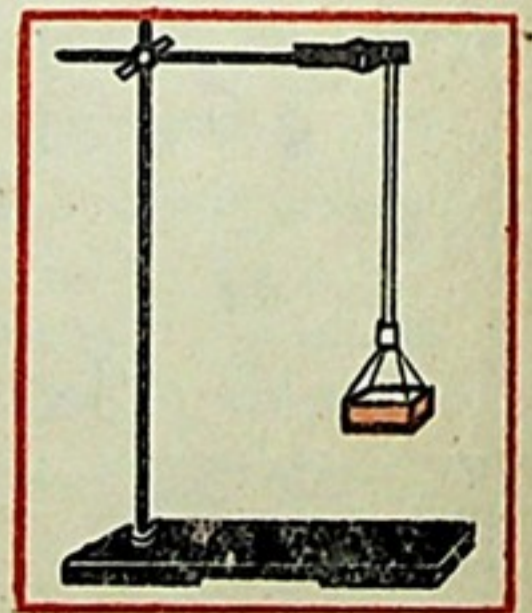
3. ნიმუშის შუა უბანზე ფანქრით გააკეთეთ ორი ნიშნული ერთმანეთიდან 30 სმ-ის დაშორებით.

4. ჩაინიშნეთ  $l_0$  საწყისი მანძილი ნიშნულებს შორის.

5. დატვირთეთ კოლოფი საწონებით, ჩაწერეთ მათი  $m$  მასა და გაზომეთ  $l$  მანძილი ნიშნულებს შორის.



სურ. 251.



სურ. 252.





6. გაზომვის შედეგები შეიტანეთ ცხრილში:

საწყისი მანძილი ხაზებს შორის არადეფორმირებული ნიმუშებისათვის $l_0$ მ	განივკვეთის ზომები		საწონების მასა. კგ	მანძილი ხაზებს შორის დეფორმირებული ნიმუშისათვის $l$ , მ	აბსოლუტური წაგრძელება მონიშნული უბნისა ( $\Delta l < l$ ).	ნიმუშის კვეთის ფართობი არადეფორმირებულ მდგომარეობაში $S=ab$ , მ <sup>2</sup>
	$a$ , მ	$b$ , მ				

7. გამოთვალეთ ნიმუშის კვეთის ფართობი დეფორმირებულ მდგომარეობაში იმის გათვალისწინებით, რომ რეზინის მოცულობა უმნიშვნელოდ იზრდება მცირე დეფორმაციების დროსაც.

$$S_0 l_0 = S l, \quad S = \frac{S_0 l_0}{l}$$

8. გამოთვალეთ რეზინის დრეკადობის მოდული:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}; \quad E = \frac{mg}{S} \cdot \frac{l_0}{\Delta l} = \frac{mg}{S_0} \cdot \frac{l}{\Delta l}$$

დრეკადობის მოდულის გაზომვის ცდომილების შეფასება მოცემულ სამუშაოში არ ხდება, რადგან რეზინის ფარდობითი დეფორმაცია დამოკიდებულია ნიმუშის დეფორმაციის გამომწვევი ძალის მოქმედების ხანგრძლივობაზე, გარდა ამისა, ნიმუშის კვეთი სხვადასხვა ადგილის მიხედვით და მისი გაზომვის ხერხი ფრიად მიახლოებითია.

4. დენის წყაროს ემ ძალისა და შიგა წინალობის გაზომვა

დენის ნებისმიერი წყაროს გამოყენების დროს უწინარესად საჭიროა ვიცოდეთ მისი ემ ძალა და შიგა წინალობა.

სამუშაოში განვიხილავთ წყაროს ემ ძალისა და შიგა წინალობის გაზომვის უმარტივეს ხერხებს. ამ მიზნით ჩვენ ვისარგებლეთ ომის კანონით ჩაკეტილი წრედისათვის:

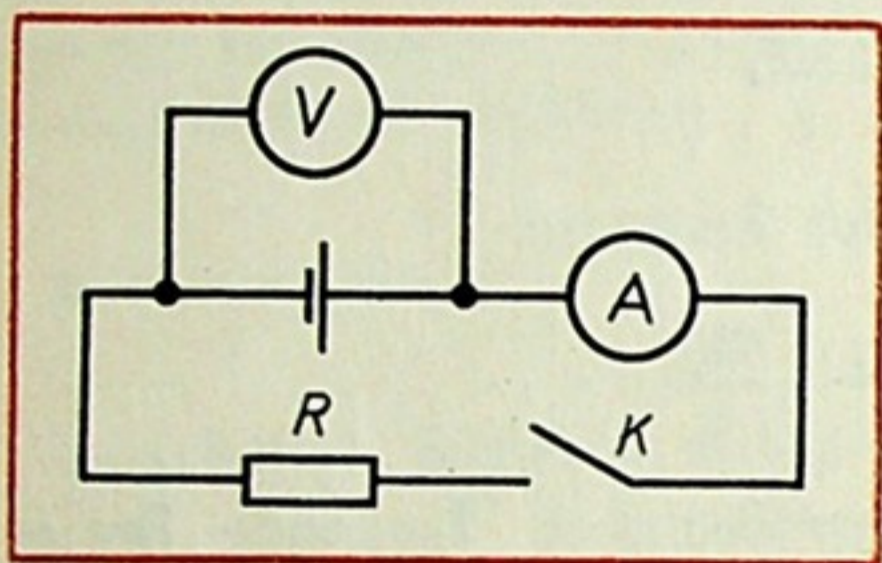
$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$$

ხელსაწყოები და მასალები: ამპერმეტრი ცდომილებით  $\Delta_s = 0,10$  ა, ვოლტმეტრი ცდომილებით  $\Delta_v = 0,25$  ვ, დენის წყარო (აკუმულატორი ან ჯიბის ფარნის ბატარეა), მავთულის რეზისტორი წინალობით  $R = (4,00 \pm 0,12)$  ომი, ჩამრთველი, შემაერთებელი სადენები.



## მითითება

1. შეადგინეთ 253-ე სურათზე გამოსახული წრედი.
2. გაზომეთ წყაროს ემ ძალა  $\mathcal{E}$ , იმის გათვალისწინებით, რომ დაბვა მის პოლუსებზე მცირედ განსხვავდება ემ ძალისაგან, როცა  $R \gg r$  (იხ. გვ. 211). ამ სამუშაოში  $R = R_0 \approx 10^3$  ომს, რაც მნიშვნელოვნად მეტია დენის წყაროს შიგა წინაღობაზე.



სურ. 253

3. ჩაიწერეთ ემ ძალის გაზომვის აბსოლუტური ცდომილება  $\Delta \mathcal{E}$ , რაც ტოლია  $\Delta_3$ -ისა, თუ ხელსაწყოს ისარი ემთხვევა სკალის დანაყოფს; თუ ისარი არ ემთხვევა სკალის დანაყოფს, მაშინ გაზომვის მონაცემად ჩათვალეთ უახლოესი დანაყოფის შესაბამისი მნიშვნელობა; ამ დროს ცდომილება გაიზრდება დანაყოფის ფასის ნახევრით:

$$\Delta_3 + \frac{0,2}{2} \text{ ვ ანუ } \Delta_3 + 0,1 \text{ ვ.}$$

4. შეაერთეთ წრედი  $K$  ჩამრთველით, გაზომეთ  $I$  დენის ძალა. ჩაწერეთ დენის ძალის გაზომვის  $\Delta I$  აბსოლუტური ცდომილება, რომელიც ტოლია  $\Delta_4$ -სი, თუ ხელსაწყოს ისარი ემთხვევა სკალის დანაყოფს, ხოლო ( $\Delta_4 + 0,05$  ა)-სი თუ არ ემთხვევა.
5. გამოთვალეთ წყაროს შიგა წინაღობა:

$$r = \frac{\mathcal{E}}{I} - R.$$

6. გაზომვის შედეგები შეიტანეთ ცხრილში:

წყაროს ემ ძალა $\mathcal{E}$ , ვ	$\Delta \mathcal{E}$ , ვ	დენის ძალა $I$ , ა	$\Delta I$ , ა	შიგა წინაღობა, $r$ ომი

7. გაითვალისწინეთ, რომ  $r = \frac{\mathcal{E}}{I} - R$  და მონახეთ  $\Delta r$  იმ წესის გამოყენებით, რომ მიახლოებითი სიდიდეების შეკრებისა და გამოკლების დროს მათი აბსოლუტური ცდომილებანი იკრიბება:  $\Delta r =$





$=\Delta_1 + \Delta_2$ . ამ ფორმულაში  $\Delta_1 \frac{\rho}{l}$  სიდიდის აბსოლუტური ლეზაა,  $\Delta_2$  კი ის აბსოლუტური ცდომილებაა, რომლითაც ცნობილია  $R$  წინაღობის მნიშვნელობა.  $\Delta_1$ -ის მონახვისათვის საჭიროა  $\frac{\rho}{r}$  სიდიდე გავამრავლოთ ფარდობით ცდომილებაზე  $\left(\frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l}\right)$  ამრიგად,

$$\Delta_1 = \frac{\rho}{l} \left( \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} \right)$$

$R$  წინაღობის აბსოლუტური ცდომილება  $\Delta_2 = 0,12$  ომს.

8. გაზომვის საბოლოო შედეგები წარმოადგინეთ შემდეგი სახით:

$$\begin{aligned} \rho - \Delta \rho &\leq \rho \leq \rho + \Delta \rho, \\ r - \Delta r &\leq r \leq r + \Delta r. \end{aligned}$$

5. გამტარის კუთრი წინაღობის განსაზღვრა

კუთრ წინაღობას ყველაზე მარტივად გავიგებთ, თუ გამოვიყენებთ ომის კანონს წრედის ერთგვაროვანი უბნისათვის და წინაღობის ფორმულას ცილინდრული ფორმის გამტარისათვის.

ხელსაწყოები და მასალები: ამპერმეტრი ცდომილებით  $\Delta_a = 0,10$  ა, ვოლტმეტრი ცდომილებით  $\Delta_v = 0,25$  ვ, საზომი ლენტი, მიკრომეტრი ცდომილებით  $\Delta_s = 0,05$  მმ (კლასში საკმარისია 3 მიკრომეტრი) ან შტანგენფარგალი ცდომილებით  $\Delta_s = 0,1$  მმ, აკუმულატორების ბატარეა, დიდი კუთრი წინაღობის მასალისგან დამზადებული 65—70 სმ სიგრძისა და 0,5 მმ დიამეტრის ლითონისბუნჯებიანი მავთული, ჩამრთველი, მიმყვანი სადენები.

მითითება

1. გაზომეთ ლენტით გამტარის  $l$  სიგრძე, ე. ი. მანძილი ლითონის ბუნჯებს შორის.
2. გაზომეთ მავთულის  $d$  დიამეტრი და გამოთვალეთ მისი განივკვეთის ფართობი  $S = \frac{\pi d^2}{4}$ . შედეგები შეიტანეთ ცხრილში.
3. შეადგინეთ წრედი: შეაერთეთ მიმდევრობით დენის წყარო, მავთული, ამპერმეტრი და ჩამრთველი.
4. გამტარის პარალელურად ჩართეთ ვოლტმეტრი.



5. ჩაკეტეთ ჩამრთველი, გაზომეთ  $I$  დენის ძალა წრედში და  $U$  ძაბვა გამტარის ბოლოებზე. შედეგები შეიტანეთ ცხრილში:

6. გამოთვალეთ კუთრი წინაღობა ფორმულით:

$$\rho = \frac{V}{I} \frac{\pi d^2}{4l}$$

ცხრილი

გამტარის სიგრძე $l$ , მ	მავთულის დიამეტრი $d$ , მ	მავთულის კვეთის ფართობი $S$ , მ <sup>2</sup>	დენის ძალა $I$ , ა	ძაბვა $U$ , ვ	კუთრი წინაღობა $\rho$ , ომი. მ

7. გამოთვალეთ  $\epsilon_p = \epsilon_U = \epsilon_I + \epsilon_\pi + 2\epsilon_d + \epsilon_l \cdot \epsilon_U = \frac{\Delta U}{U}$  და  $\epsilon_I = \frac{\Delta I}{I}$  გამოთვლების დროს გაითვალისწინეთ № 4 სამუშაოს 3—4 პუნქტები მოცემული მითითება,  $\epsilon_d = \frac{\Delta d}{d}$ , სადაც  $\Delta = \Delta_8$  ან  $\Delta = \Delta_7$ .

ფარდობითი ცდომილება  $\epsilon_\pi = \frac{\Delta \pi}{\pi}$  შეიძლება არ გავითვალისწინოთ, თუ მივიღებთ, რომ  $\pi = 3,14$ ;  $\epsilon_l = \frac{\Delta l}{l}$  ცდომილებაც შეიძლება მხედველობაში არ მივიღოთ.

8. მონახეთ  $\Delta \rho = \Delta \rho \cdot \epsilon_p$ .

9. გაზომვის შედეგები ჩაიწერეთ შემდეგი სახით:  $\rho - \Delta \rho \leq \rho \leq \rho + \Delta \rho$ .

10. ცნობარის მიხედვით გაიგეთ, თუ რა მასალისგან არის დამზადებული მავთული.

### 8. სპილენძის ელექტროქიმიური ეკვივალენტის განსაზღვრა

ელექტროქიმიურ ეკვივალენტს განვსაზღვრავთ ფარადეის კანონის გამოყენებით. ამისათვის საჭიროა გავზომოთ ელექტროდზე გამოყოფილი ნივთიერების მასა, დენის ძალა და მისი გავლის დრო ელექტროლიტში.

ხელსაწყოები და მასალები: სასწორი საწონებით, ამპერმეტრი, საათი, ელექტროქურა, აკუმულატორთა ბატარეა, რეოსტა-



ტი, ჩამრთველი, სპილენძის ელექტროდები, ცილინდრული ჭურჭელი, შაბიამნის ხსნარი, მიმყვანი სადენები, სინჯარა სილით, კოლოფი სილითა და სილით.

მ ი თ ი თ ე ბ ა

1. მოათავსეთ სასწორის ერთ პინაზე სპილენძის ელექტროდი, მეორეზე — კოლოფი სილისათვის.
2. გააწონასწორეთ გულმოდგინედ სასწორი სილის ფრთხილი გადმოყრით სინჯარიდან კოლოფში.
3. შეადგინეთ წრედი; შეაერთეთ მიმდევრობით ბატარეა ამპერმეტრი, რეოსტატი, შაბიამნისხსნარიანი ჭურჭელი, რომელშიც ელექტროდებია ჩაშვებული, ჩამრთველი.
4. ჩაკეტეთ წრედი ჩამრთველით, აღნიშნეთ ცდის დაწყების დრო.
5. შეინარჩუნეთ დენის ძალა უცვლელად (დაახლოებით 1 ა) რეოსტატის საშუალებით, თვალყური ადევნეთ, რომ ამპერმეტრის ისარი სკალის დანაყოფს ემთხვეოდეს.
6. ჩაატარეთ ხსნარის ელექტროლიზი 20 წთ-ის განმავლობაში.
7. გამორთეთ დენი, ამოიღეთ და წყლით გარეცხეთ სპილენძის ელექტროდი (კათოდი) შემდეგ გააშრეთ ელექტროქურაზე.
8. მოათავსეთ ელექტროდი სასწორის პინაზე და კვლავ გააწონასწორეთ, ოღონდ ახლა საწონებით, რომელთა მასა ტოლია სპილენძის  $m$  მასისა.
9. გაზომვის შედეგები შეიტანეთ ცხრილში:

დრო $t$ , წმ	დენის ძალა $I$ , ა	დენის ძალის გაზომვის ცდომილება $\Delta I$ , ა	სპილენძის მასა $m$ , მგ

10. ფარადეის კანონის გამოყენებით განსაზღვრეთ სპილენძის ელექტროქიმიური ეკვივალენტი  $k = \frac{m}{It}$ .

11. მონახეთ  $K$ -ს გაზომვის ფარდობითი ცდომილება ფორმულით:  $\epsilon_k = \epsilon_I + \epsilon_m + \epsilon_t$ .  $\epsilon_I = \frac{\Delta I}{I}$  მნიშვნელობის გამოთვლით საჭიროა გაითვალისწინოთ მითითება, რომელიც მოცემულია № 4 სამუშაოს

3 და 4 პუნქტებში;  $\epsilon_m = \frac{\Delta m}{m}$ -ის გამოთვლისას ჩათვალეთ, რომ  $\Delta m$  არ აღემატება 20 მგ-ს. ეს ცდომილება განისაზღვრება სასწორის გრძნობიერებით (ის ტოლია 10 მგ-სა, როცა ელექტროდის მასა დაახ-





ლოებით 20 გ-ია) და მილიგრამიანი საწონების ცდომილებით, რომელიც ჯამში 10 მგ-ს არ აღემატება.

ცდომილება  $\varepsilon_t = \frac{\Delta t}{t}$  შეიძლება უგულებელვყოთ.

12. გაზომეთ სპილენძის ელექტროქიმიური ეკვივალენტის აბსოლუტური ცდომილება  $\Delta k = k\varepsilon_k$ .

13. გაზომვის შედეგები ჩაიწერეთ შემდეგი სახით:

$$k - \Delta k \leq k \leq k + \Delta k.$$

14. მონახეთ ცნობარის გამოყენებით სპილენძის ელექტროქიმიური ეკვივალენტი და შეამოწმეთ მისი მოხვედრა ცდის დროს მონახულ ინტერვალში  $[k - \Delta k; k + \Delta k]$ .

15. გამოიყენეთ ფორმულა  $k = \frac{1}{eN_A} \cdot \frac{M}{n}$ . მონახეთ  $e$  — ელემენტარული მუხტის მოდული.

### 7. დაკვირვება მაგნიტური ველისა და დენის ურთიერთმდებარეობაზე

ხელსაწყოები და მასალები: აკუმულატორთა ბატარეა, რკალისებრი მაგნიტი, შტატივი, მავთულის გორგალი, შემაერთებელი სადენები, ჩამრთველი.

მითითებანი. 1. დაკიდეთ მავთულის გორგალი შტატივზე და ჩამრთველით შეაერთეთ ის ბატარეასთან.

2. მიიტანეთ დაკიდებულ გორგალთან მაგნიტი და წრედის შერთვის შემდეგ დააკვირდით მის მოძრაობას.

3. შეარჩიეთ გორგალისა და მაგნიტის ურთიერთმდებარეობის რამდენიმე დამახასიათებელი ვარიანტი, ჩახაზეთ ის და აღნიშნეთ მაგნიტური ველის მიმართულება, დენის მიმართულება და გორგალის სავარაუდო მოძრაობა.

4. ცდით შეამოწმეთ ვარაუდი გორგალის მოძრაობის ხასიათისა და მიმართულების შესახებ.

### 8. ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენის შესწავლა

ხელსაწყოები და მასალები: მილიამპერმეტრი, აკუმულატორთა ბატარეა, კოჭები გულარებით, რკალისებრი მაგნიტი, ჩამრთველი, შემაერთებელი სადენები.

მითითება 1. შეუერთეთ გალვანომეტრის მომჭერები კოჭას მომჭერებს.



2. შიადგით გულარი ნალისებრი მაგნიტის ერთ-ერთ პოლუსს და შეიტანეთ კოჭას შიგნით, ამავე დროს დააკვირდით მილიამპერმეტრის ისარს.

3. გაიმეორეთ დაკვირვება კოჭადან გულარის გამოტანისას, აგრეთვე მაგნიტის პოლუსის შეცვლისას.

4. ჩაიხაზეთ ცდის სქემა და შეამოწმეთ ლენცის წესი თითოეულ შემთხვევაში.

5. მოათავსეთ მეორე კოჭა პირველის გვერდით ისე, რომ მათი ღერძები ერთმანეთს ემთხვეოდეს.

6. ჩადგით ორივე კოჭაში რკინის გულარები და მიუერთეთ მეორე კოჭა ჩამრთველზე გავლით ბატარეას.

7. ჩამრთველის შერთვისა და განრთვისას დააკვირდით გალვანომეტრის ისრის გადახრას.

8. ჩაიხაზეთ ცდის სქემა და შეამოწმეთ ლენცის წესი.



სავარჯიშო 1. 1. არაუმეტეს 12 მდ-სა. 2. 0,002 კგ/მოლ; 0,004 კგ/მოლ. 3. ორჯერ.  
4.  $\approx 0,056$  მოლი. 5.  $\approx 1,88 \cdot 10^{23}$ . 6.  $\approx 4,65 \cdot 10^{-26}$  კგ. 7.  $\approx 8,5 \cdot 10^{28}$ . 8.  $\approx 5,7 \cdot 10^{-8}$  მ<sup>3</sup>.  
9. შემცირდება 3-ჯერ. 10.  $5 \cdot 10^5$  პა. 11.  $6 \cdot 10^{-21}$  ჯ. 12.  $4,9 \cdot 10^5$  მ<sup>2</sup>/წმ<sup>2</sup>.

სავარჯიშო 2. 1.  $2,76 \cdot 10^{-23}$  ჯ/კ. ხალი. 2.  $\approx 6 \cdot 10^{-21}$  ჯ. 3.  $3,14 \cdot 10^4$ . 4. მეტი მო-  
ლეკულაა ჰაერში. 5.  $5,3 \cdot 10^{-26}$  კგ. 6.  $\approx 0,5\%$ .

სავარჯიშო 3. 1. 12 კპა. 2. 20. 4. 250 K. 5.  $\approx 0,0224$  მ<sup>3</sup>/მოლი. 6.  $\approx 5,8 \cdot 10^{-3}$  კგ/მო-  
ლი. 9.  $\approx 0,15$  მ<sup>3</sup>. 10.  $\approx 0,49$  კგ/მ<sup>3</sup>. 12. 1,7-ჯერ.

სავარჯიშო 4. 1. გაიზრდება 1,5-ჯერ. 2.  $2,5 \cdot 10^{-4}$  მ<sup>3</sup>. 3. შემცირდა. 4.  $\approx 34,4$  ჯ.

8.  $\frac{m}{M} R \Delta T$ -თი. 9.  $1,25 \cdot 10^6$  ჯ. 10. 20 ჯ. 11.  $2 \cdot 10^5$  ჯ. 12.  $\approx 10$  K. 13.  $\approx 37^\circ\text{C}$ .

14.  $0^\circ\text{C}$ . 15. 1500 K. 16. 20%;  $\approx 42\%$ .

სავარჯიშო 5. 4.  $\approx 0,59$  კგ/მ<sup>3</sup>. 7.  $\approx 52\%$ . 8.  $\approx 0,92$  კგ. 9.  $\approx 0,21$  კგ.

სავარჯიშო 6. 4.  $\approx 2,3 \cdot 10^{-5}$  5. 6. 800 კგ/მ<sup>3</sup>.

სავარჯიშო 7. 3. 8 მმ<sup>2</sup>. 4.  $\approx 1,9 \cdot 10^3$  5. 5.  $3,53 \cdot 10^5$  პა. 6.  $\approx 4200$  მ. 7.  $4 \cdot 10^7$  პა;  
 $2 \cdot 10^{11}$  პა. 8. 2/3.

სავარჯიშო 8. 3.  $\approx 9,2 \cdot 10^{-8}$  5. 4.  $\approx 2,3 \cdot 10^{39}$ . 5.  $\approx 2,3 \cdot 10^8$  6. 6.  $\approx 1,0/10^{-6}$  5.  
მიზიდვის ძალა;  $\approx 6,9 \cdot 10^{-7}$  5, განზიდვის ძალა. 7.  $1,1 \cdot 10^{-6}$  5 მეორე მუხტის  
მხარეს.

სავარჯიშო 9. 1.  $1,5 \cdot 10^{-16}$  კ;  $\approx 940$  ჰარბი ელექტრონი. 5.  $1,6 \cdot 10^{-19}$  ჯ.  $-1,6 \times$

$\times 10^{-19}$  ჯ. 6.  $E = \frac{\sqrt{q^2_1 + q_1 q_2 + q^2_2}}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}$ . 8. 4000 ვ/მ. 10.  $-2,3 \cdot 10^3$  ვ.

სავარჯიშო 10. 1.  $\approx 0,1$  მკვ. 2.  $\approx 1,7 \cdot 10^{-5}$  კ. 3.  $\approx 1,7 \cdot 10^7$  ვ/მ. 4.  $\approx 5,5$  მმ.

5.  $U_1 = \frac{d_1 U}{d\epsilon} = 100$  ვ. 6. შემცირდება 3-ჯერ. 7.  $\approx 4,4 \cdot 10^{-4}$  ჯ/მ<sup>3</sup>.

სავარჯიშო 11. 3.  $\approx 1,4$  მმ<sup>2</sup>;  $\approx 15,8$  მ. 4. გაიზრდება 25-ჯერ. 5. 5000 ომი.

6.  $\approx 4,9 \cdot 10^{-4}$  მ/წმ. 10. ორჯერ მცირეს, ორჯერ მეტს. 11.  $\approx 4,1$  კვტ;  $\approx 6,1$  კვტ.  
12.  $\approx 97\%$ ;  $\approx 1670$ ა.

სავარჯიშო 12. 2. 1200 ა. 3. 3,7 ვ; 0,2 ომი. 4.  $\approx 0,33$  ვტ. 5. 4,1 ვ; 22,4 ომი.

სავარჯიშო 13. 1.  $\approx 2,9 \cdot 10^4$  კ. 2.  $\approx 3,3 \cdot 10^{-7}$  კგ/ც. 4.  $\approx 3 \cdot 10^{-5}$  მ.

6.  $\approx 1,33 \cdot 10^7$  მ/წმ;  $\approx 4,19 \cdot 10^7$  მ/წმ.

სავარჯიშო 14. 3.  $1,5 \cdot 10^{-3}$  ნ-მ. 4.  $1,2 \cdot 10^{-2}$  ჯ. 6.  $R = \frac{m v \sin \alpha}{|q| \cdot B}$ .

სავარჯიშო 15. 6. რადიო დროის შემდეგ მეორე კოჭაში დამყარდება მუდმივი დე-  
ნი. 8. 0,2 ა. 9. 0,15 ვ. 10. 1,2 ჯ.



- აირი იდეალური 19  
 აირის იონიზაცია 223  
 ავოგადრო 10  
 ამპერი ანდრე 265  
 ამპერი 135  
 ამპერის ჰიპოთეზა 271  
 ამპერმეტრი 189  
 ანიზოტროპია 110  
 ბ ა ზ ა 247  
 ბოილი რობერტი 50  
 ბოლცმანი ლუდვიგი 38  
 ბროუნი რობერტი 11  
 გამტარები 152  
 გადასვლა პირდაპირი 244  
 — შექცეული 245  
 გამტარობა აირის 224  
 — სვრელური 240  
 — იონური 219  
 — ელექტრული 215  
 — ელექტრონული 216, 240  
 განმუხტვა აიროვანი 223  
 — არათავისთავადი 224  
 — თავისთავადი 225  
 — ნაპერწყლური 229  
 — გვირგვინისებრი 228  
 — მღვივარე 228  
 განტოლება მენდელეევი-კლაპეირონის 46  
 — მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი 28  
 — სითბური ბალანსის 73  
 გაჭიმვის დიაგრამა 118  
 გენერატორი მაგნიტოჰიდროდინამიკური 232  
 გეი-ლუსაკი ჟოზეფ 51  
 დაძაბულობა ველის 146  
 დენის ინდუქციური 279, 280  
 — მუდმივი 189  
 — ელექტრული 187  
 დენის სიმძლავრე 202  
 დეფორმაცია ღუნვის 115  
 — გრების 117  
 — გაჭიმვის 114  
 — ძვრის 115  
 — შეკუმშვის 114  
 დიოდი ვაკუუმური 234  
 — ნახევარგამტარული 245  
 დიპოლი 156  
 დისოციაცია ელექტროლიტური 218  
 დიელექტრიკი 154  
 დნობის კუთრი სითბო 68  
 დუღილი 90  
 ელექტრომაგნიტური ინდუქცია 279  
 ელექტრონ-სხივური მილაკი 237  
 ელემენტარული ნაწილაკები 127  
 ეკვივალენტი ელექტროქიმიური 221  
 ელემენტარული ნაწილაკი 127  
 ელექტროდინამიკა 124  
 ელექტროტევადობა 174  
 — ბრტყელი კონდენსატორის 176  
 ელექტროლიზი 219  
 ელექტრომეტრი 170  
 ელექტროსტატიკა 126  
 ელექტრული რკალი 228  
 ემისია-თერმოელექტრონული 227  
 ემიტერი 247  
 ენერგია დენის მაგნიტური ველის 293  
 — შინაგანი 60  
 — იდეალური აირის 61  
 — სითბური შოქრაობის 30  
 — პოტენციური დამუხტული სხეულის 161  
 — საშუალო კინეტიკური 34  
 — ელექტრული ველის 181  
 ვაკუუმი 233  
 ვებერი 262  
 ველი გრიგალური 260, 285  
 — ელექტრული 144  
 — ელექტროსტატიკური  
 — მაგნიტური 253  
 ზეგამტარობა 196  
 ზედაპირები ეკვიპოტენციალური 169  
 თვითინდუქცია 291  
 თეორია მოლეკულურ-კინეტიკური 5  
 თერმისტორი 250  
 თერმომეტრი 33  
 — წინაღობის 196  
 თერმოდინამიკა 6  
 იზობარა 51  
 იზოთერმა 50  
 იზოქორა 52  
 ინდუქციურობა 292  
 კანონი ამპერის 265  
 — ბოილ-მარიოტის 50  
 — გეი-ლუსაკის 51  
 — კულონის 134





- ომის წრედის უბნისათვის 192
- ომის შეკრული წრედისათვის 210
- ენერჯის მუდმივობის 68
- ელექტრული მუხტის 131
- თერმოდინამიკის პირველად 69
- თერმოდინამიკის მეორე 75
- ელექტრომაგნიტური ინდუქციის 284
- ჯოულ-ლენცის 203
- ფარადის 221
- შარლის 52
- ჰუკის 119
- კარნო სადი 78
- კელვინდ უ. 37
- კელვინი 38
- კოლექტორი 248
- კონდენსატორი 175
- კონდენსაცია 87
- კოეფიციენტი ზედაპირული დაჭიმულობის 103
- მარგი ქმედების სითბური ძრავებისა 77
- ტემპერატურული წინაღობის 195
- კულონი შარლი 133
- კულონი 135
- კუთრი სითბოტევადობა ნივთიერების 67
- ლომონოსოვი მ. 5
- ლენცი 203, 282
- მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი 255
- მაიერი რობერტი 69
- მაქსველი ჯეიმს 125
- მანდელშტამი 216
- მარიოტი 56
- მასა მოლეკულის 9
- მოლეკულური ფარდობითი 9
- მოლური 11
- მას-სპექტოგრაფი 270
- მინარევები აქცეპტორული 243
- დონორული 242
- მდგომარეობა სითბური წონასწორობის მენდელეევი 48
- მოვლენა კაპილარული 104
- სითბური 4
- მახასიათებელი ვოლტ-ამპერული დიოდის 234
- მესერი კრისტალური 18
- მოდული იუნგის 119
- მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის 258
- მოლეკულა, ზომა
- საშუალო სიჩქარე
- მოლი 10
- მონოკრისტალი 110
- მოძრაობა ბროუნის 11
- სითბური 21
- მუდმივა ავოგადროს 10
- ბოლცმანის 38
- აირის უნივერსალური 47
- ელექტრული 136
- მუშაობა თერმოდინამიკაში 63
- ელექტრული დენის 202
- მუხტი ელექტრული 126
- ელექტრონის 136
- ელემენტარული 127
- თავისუფალი 150
- ბმული 154
- ნახევარგამტარები 239
- ρ—η გადასვლა 244
- ნაკადი მაგნიტური 261
- ნამის წერტილი 94
- ომი გეორგ 193
- ომი 193
- ოსცილოგრაფი 237
- ორთქლი ნაჯერი 87
- — , წნევა 88
- პარამეტრები მაკროსკოპული 31
- პლაზმა 230
- პლაზმოტრონი 232
- პლასტიკურობა 121
- პოლიკრისტალები 110
- პოლარიზაცია დიელექტრიკის 157
- პოტენციალი 163
- პოტენციალთა სხვაობა 164
- პრინციპი სუპერპოზიციის 147
- პროცესი ადიაბატური 71
- იზობარული 51
- იზოთერმული 49
- იზოქორული 52
- შეუქცევადი 75
- რაოდენობა ნივთიერების 10
- სითბოს 66
- რეკომბინაცია 224
- სითბო ორთქლადქცევის კუთრი 67
- სითბო დნობის კუთრი 68
- სითბური ძრავა 76
- სიმტკიცე 120
- სტოლეტოვი 272
- სხეული ამორფული 111
- კრისტალური 109
- მაკროსკოპული 3
- სიმყიდვე 121
- სკალა კელვინის 37
- ცელსიუსის 33
- სხეულის დაელექტროება 128
- ტენიანობა ფარდობითი 94
- ტემპერატურის აბსოლუტური ნული 37
- ტემპერატურა აბსოლუტური 37
- კიურის 272
- კრიტიკული 92
- ტესლა ნიკოლა 259
- ტესლა 259
- ტრანზისტორი 247
- ფარადა 175
- ფარადეი მაიკლ 143
- ფერომაგნეტიკები 272
- ფოტორეზისტორი 250
- ფრენკელი 17
- ფსიქომეტრი 96
- შარლი უაკი 52
- შედწევადობა დიელექტრიკული 158
- მაგნიტური 271
- შუნტები ამპერმეტრისთვის 200





- ჩარჩო (კონტური) დენიანი 254  
ძაბვა მექანიკური 118  
ძალა ამპერის 264  
— მოლეკულების ურთიერთქმედების 14  
— ლორენცის 2  
— ზედაპირული დაქიმულობის 102  
— დენის 188  
— ელექტრომამოძრავებელი 209  
ძალწირი ელექტრული ველის 148  
წირი მაგნიტური ინდუქციის 259  
წესი ბურღის 257  
— მარცხენა ხელის 265
- ლენცის 282  
წინაღობა 193  
— კუთრი 194  
წონასწორობა სითბური 31  
წნევა აირის 26  
— პარციალური 93  
ჯოული ჯეიმს 69, 203  
ხვრელი 240  
ჰელმჰოლცი გერმანი 69  
ჰენრი 293  
ჰიგრომეტრი 96



სითბური მოვლენები

მოლეკულური ფიზიკა

შესავალი . . . . .	3
<b>I თავი. მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის საფუძვლები . . . . .</b>	<b>7</b>
1. მოლეკულურ - კინეტიკური თეორიის ძირითადი დებულებები. მოლეკულების ზომები . . . . .	1
2. მოლეკულების მასა. ავოგადროს მუდმივა . . . . .	9
3. ბროუნის მოძრაობა . . . . .	11
4. მოლეკულათა ურთიერთქმედების ძალები . . . . .	14
5. აირადი, თხევადი და მყარი სხეულების აგებულება . . . . .	16
6. იდეალური აირი მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის თვალსაზრისით . . . . .	19
7. აირის მოლეკულურ - კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლება ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები . . . . .	23
სავარჯიშო 1 . . . . .	27
მოკლე დასკვნა . . . . .	28
<b>II თავი. ტემპერატურა. მოლეკულების სითბური მოძრაობის ენერგია . . . . .</b>	<b>30</b>
8. სითბური წონასწორობა, ტემპერატურა . . . . .	1
9. ტემპერატურის განსაზრვრა . . . . .	31
10. აბსოლუტური ტემპერატურა. ტემპერატურა — მოლეკულების საშუალო კინეტიკური ენერგიის ზომა . . . . .	37
11. აირის მოლეკულების სიჩქარის გაზომვა . . . . .	40
ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები . . . . .	43
სავარჯიშო 2 . . . . .	45
მოკლე დასკვნა . . . . .	—

**III თავი იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება. აირის კანონები . . . . .**

12. იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება . . . . .	—
13. აირის კანონები . . . . .	49
14. აირის თვისებათა გამოყენება ტექნიკაში . . . . .	53
ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები . . . . .	56
სავარჯიშო 3 . . . . .	58
მოკლე დასკვნა . . . . .	59
<b>IV თავი. თერმოდინამიკის პირველი კანონი . . . . .</b>	<b>60</b>
15. შინაგანი ენერგია . . . . .	—
16. მუშაობა თერმოდინამიკაში . . . . .	63
17. სითბოს რაოდენობა . . . . .	66
18. თერმოდინამიკის პირველი კანონი . . . . .	68
19. თერმოდინამიკის პირველი კანონის გამოყენება სხვადასხვა პროცესისათვის . . . . .	71
20. პროცესების შეუქცევადობა ბუნებაში . . . . .	74
21. სითბური ძრავების მოქმედების პრინციპები. სითბური ძრავების მარგი ქმედების კოეფიციენტი (მქ კოეფიციენტი.) . . . . .	76
22. სითბური ძრავის მნიშვნელობა. სითბური ძრავა და გარემოს დაცვა ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები . . . . .	79
სავარჯიშო 4 . . . . .	82
მოკლე დასკვნა . . . . .	84
<b>V თავი. სითბისა და აირის ურთიერთგარდაქმნა . . . . .</b>	<b>87</b>
23. ნაჯერი ორთქლი . . . . .	—
24. ნაჯერი ორთქლის წნევის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე. დუღილი. კრიტიკული ტემპერატურა . . . . .	89
25. ჰაერის ტენიანობა . . . . .	93





ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები . . . . . 97

სავარჯიშო 5 . . . . . 98

მოკლე დასკვნა . . . . . —

**VI თავი. სითხის ზედაპირული დაქიმულობა . . . . . 99**

26. ზედაპირული დაქიმულობა . . . . . —

27. ზედაპირული დაქიმულობის ძალა . . . . . 102

28. კაპილარული მოვლენები . . . . . 104

ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები . . . . . 107

სავარჯიშო 6 . . . . . 108

მოკლე დასკვნა . . . . . —

**VII თავი. მყარი სხეული . . . . . 109**

29. კრისტალური სხეული . . . . . —

30. ამორფული სხეული . . . . . 111

31. დეფორმაცია. მყარი სხეულის დეფორმაციის სახეები. . . . . 113

32. მყარი სხეულის მექანიკური თვისებები. გაქიმვის დიაგრამა . . . . . 118

33. პლასტიკურობა და სიმყიფე . . . . . 120

ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები . . . . . 122

სავარჯიშო 7 . . . . . —

მოკლე დასკვნა . . . . . 123

**ელექტროდინამიკის საფუძვლები**

34. რა არის ელექტროდინამიკა? . . . . . 124

**VIII თავი. ელექტროსტატიკა . . . . . 126**

35. ელექტრული მუხტი და ელემენტარული ნაწილაკები . . . . . —

36. დამუხტული სხეული. სხეულთა დაელექტროება . . . . . 128

37. ელექტრული მუხტის მუდმივობის კანონი . . . . . 131

38. ელექტროსტატიკის ძირითადი კანონი — კულონის კანონი . . . . . 132

39. ელექტრული მუხტის ერთეული . . . . . 135

ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები . . . . . 137

სავარჯიშო 8 . . . . . 139

40. ახლოქმედება და მანძილზე ქმედება . . . . . —

41. ელექტრული ველი . . . . . 142

42. ელექტრული ველის დაძაბულობა. ველების სუპერპოზიციის პრინციპი . . . . . 145

43. ელექტრული ველის ძალწირები . . . . . 148

44. გამტარები ელექტროსტატი-

კურ ველში . . . . . 150

45. თანაბრად დამუხტული გამტარი სფეროსა და უსასრულო სიბრტყის ელექტრული ველის დაძაბულობა . . . . . 152

46. დიელექტრიკები ელექტროსტატიკურ ველში. ორი სახის დიელექტრიკი . . . . . 154

47. დიელექტრიკის პოლარიზაცია. დიელექტრიკული შეღწევადობა . . . . . 157

48. დამუხტული სხეულის პოტენციური ენერგია ერთგვაროვან ელექტროსტატიკურ ველში . . . . . 160

49. ელექტროსტატიკური ველის პოტენციული და პოტენციალთა სხვაობა . . . . . 163

50. წერტილოვანი მუხტის ელექტროსტატიკური პოტენციალი . . . . . 165

51. კავშირი ელექტრული ველის დაძაბულობასა და პოტენციალთა სხვაობას შორის. ეკვიპოტენციალური ზედაპირები . . . . . 167

52. პოტენციალთა სხვაობის გაზომვა . . . . . 170

ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები . . . . . 171

სავარჯიშო 9 . . . . . 172

53. ელექტროტევადობა. ელექტროტევადობის ერთეულები . . . . . 173

54. კონდენსატორი. ბრტყელ კონდენსატორის ელექტროტევადობა . . . . . 175

55. დამუხტული კონდენსატორის ენერგია. კონდენსატორთა გამოყენება . . . . . 179

ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები . . . . . 182

სავარჯიშო 10 . . . . . 184

მოკლე დასკვნა . . . . . —

**IX თავი. მუდმივი ელექტრული დენი . . . . . 187**

56. ელექტრული დენი. დენის ძალა . . . . . —

57. ელექტრული დენის არსებობის აუცილებელი პირობები . . . . . 190

58. ომის კანონი წრედის უბნისათვის. წინაღობა . . . . . 192

59. გამტარის წინაღობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე . . . . . 194

60. ზეგამტარობა . . . . . 196

61. ელექტრული წრედი. გამტართა მიმდევრობითი და პარალელური შეერთება . . . . . 197

62. დენის ძალისა და ძაბვის გაზომვა . . . . . 200





63. მულმივი დენის მუშაობა და სიმძლავრე . . . . . 202  
 ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები . . . . . 204  
 სავარჯიშო 11 . . . . . 206  
 64. ელექტრომაგნიტური ველები და . . . . . 207  
 65. ომის კანონი სრული წრედისათვის . . . . . 210  
 ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები . . . . . 212  
 სავარჯიშო 12 . . . . . 213  
 მოკლე დასკვნა . . . . . —

**X თავი ელექტრული დენი სხვადასხვა გარემოში . . . . . 215**

66. სხვადასხვა ნივთიერების ელექტრული გამტარობა . . . . . —  
 67. ლითონების ელექტრონული გამტარობა . . . . . 216  
 68. ელექტრული დენი სითხეში . . . . . 218  
 69. ელექტროლიზის კანონი . . . . . 220  
 70. ელექტრული დენი აირში . . . . . 222  
 71. არათავისთავადი და თავისთავადი განმუხტვა . . . . . 224  
 72. თავისთავადი განუმუხტვის სხვადასხვა ტიპი და მათი ტექნიკური გამოყენება . . . . . 227  
 73. პლაზმა . . . . . 230  
 74. ელექტრული დენი ვაკუუმში . . . . . 233  
 75. ორელექტროდიანი ელექტრონული მილაკი—დიოდი . . . . . —  
 76. ელექტრონული კონები. ელექტრონ-სხივური მილაკი . . . . . 236  
 77. ელექტრული დენი ნახევარგამტარში . . . . . 238  
 78. ნახევარგამტარის ელექტრული გამტარობა მინარევის არსებობის დროს . . . . . 241  
 79. ელექტრული დენი p- და n-ტიპის ნახევარგამტართა კონტაქტში . . . . . 244  
 80. ნახევარგამტარული დიოდი . . . . . 245  
 81. ტრანზისტორი . . . . . 247  
 82. თერმისტორი და ფოტორეზისტორი . . . . . 250  
 ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები . . . . . 251

სავარჯიშო 13 . . . . . —  
 მოკლე დასკვნა . . . . . 252  
**XI თავი. მაგნიტური ველი . . . . . 253**

83. დენების ურთიერთქმედება. მაგნიტური ველი . . . . . —  
 84. მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი . . . . . 255  
 85. მაგნიტური ინდუქციის ვექტორის მოდული . . . . . 257  
 86. მაგნიტური ინდუქციის წირები მაგნიტური ნაკადი . . . . . 259  
 87. ელექტროგამზომი ხელსაწყოები . . . . . 262  
 88. ამპერის კანონი . . . . . 263  
 89. მაგნიტური ველის მოქმედება მოძრავ მუხტზე ლორენცის ძალა . . . . . 266  
 90. ნივთიერების მაგნიტური თვისებები . . . . . 271  
 ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები . . . . . 274  
 სავარჯიშო 14 . . . . . 276  
 მოკლე დასკვნა . . . . . 277

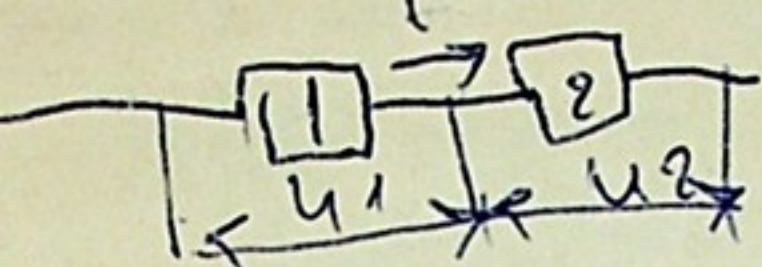
**XII თავი. ელექტრომაგნიტური ინდუქცია . . . . . 278**

91. ელექტრომაგნიტური ინდუქციის აღმოჩენა . . . . . —  
 92. ინდუქციური დენის მიმართულება. ლენცის წესი . . . . . 280  
 93. ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონი . . . . . 283  
 94. გრიგალური ელექტრული ველი . . . . . 285  
 95. ინდუქციის ემ ძალა მოძრავ გამტარში . . . . . 288  
 96. თვითინდუქცია. ინდუქციურობა . . . . . 291  
 97. დენის მაგნიტური ველის ენერგია . . . . . 293  
 ამოცანათა ამოხსნის ნიმუშები . . . . . 295  
 სავარჯიშო 15 . . . . . 296  
 მოკლე დასკვნა . . . . . 297  
 დასკვნა . . . . . 298  
 ლაბორატორიული სამუშაოები . . . . . 300  
 სავარჯიშოების პასუხები . . . . . 312  
 საგნობრივი საძიებელი . . . . . 313

$I = \frac{U}{R}$        $R = \frac{U}{I}$        $R = \rho \frac{l}{S}$

მკ. ე





$$I_1 = I_2 = I$$

$$U = U_1 + U_2$$

$$R = R_1 + R_2$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

მთარგმნელი პროფ. ვ. კობახიძე  
რედაქციის გამგე ი. მეგრელიშვილი  
რედაქტორი მ. ბაზაძე  
სამხატვრო რედაქტორი გ. ზაკალაშვილი  
ტექნიკური რედაქტორი თ. მანჯგალაძე  
უფრ. კორექტორი ა. ბახტაძე  
კორექტორი ნ. ჩხიკვიშვილი  
გამომშვები თ. მაჭავარიანი

ИБ № 3756 Учебное издание

გადაეცა ასაწყობად 2.02.88. ხელმოწერილია დასაბეჭდად 28.05.88. ქალაქის  
ზომა 60x90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. საბეჭდო ქალაქი ოფსეტის. გარნიტურა ვენა. ბეჭდვის ხერხი  
ოფსეტური. საღებავგატარება 42,25. საბეჭდო თაბახი 20+0,25. ფ. ჩ.+0,25  
ფორზ. სააღრ.-საგამომც. თაბახი 17,05+0,31 ფ. ჩ.+0,33 ფორზ.

ტირაჟი 82.0 ეგზ. შეკვ. № 84.

ფასი 65 კაპ.

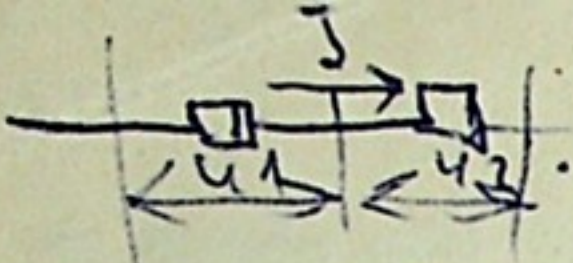
გამომცემლობა „განათლება“, თბილისი, ორჯონიკიძის ქ. № 50.  
Издательство «Ганатлеба», Тбилиси, ул. Орджоникидзе № 50

1988

საქართველოს სსრ გამომცემლობათა, პოლიგრაფიისა და წიგნის ვაჭრობის საქ-  
მეთა სახელმწიფო კომიტეტის ბეჭდვითი სიტყვის კომბინატი, თბილისი, მარ-  
ჯანიშვილის ქ. № 5.

Комбинат печати Государственного комитета Грузинской ССР по делам  
издательств, полиграфии и книжной торговли, Тбилиси, ул. Марджани-  
швили, 5.





$$I_1 = I_2 = I$$

$$U = U_1 + U_2$$

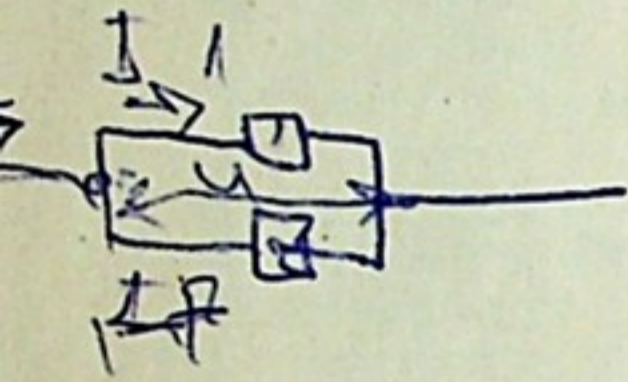
$$R = R_1 + R_2$$

Борис Борисович Буховцев  
Юрий Львович Климонтович  
Геннадий Яковлевич Мякишев

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

Ф И З И К А

Учебное пособие для X класса  
(на грузинском языке)



$$I = I_1 + I_2$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

ვინ როგორ უვლის სახელმძღვანელოს  
(ცნობები)

№	გვარი, სახელი, მამის სახელი	სასწავლო წელი	სახელმძღვანელოს მდგომარეობა	
			წლის დასაწყისში	წლის ბოლოს
1	ხაოუნა ლორთქიფანიძე	ხარკოვი	მნი	
2				
3				
4				
5				



ნივთიერება	დიელექტიკული შეღწევადობა
ჰაერი (0°C და 760 მმ. ვწყ. სვ.)	1,000594
ნავთი	2,1
ებონიტი	2,7—2,9
კვარცი	4,5
მინა	5—10
ცთილის სპირტი	27
წყალი (სუფთა)	81
სეგნეტის მარილი	10 000

ნივთიერება	კუთრი წინაღობა 20°C ტემპერატ. ომი . მ.
ვერცხლი	$1,6 \cdot 10^{-8}$
სპილენძი	$1,8 \cdot 10^{-8}$
გრაფიტი	$8 \cdot 10^{-8}$
NaCl-ის 10%-იანი წყალხსნარი	0,08
სილიციუმი	$10^3$
წყალი (ქიმიურად სუფთა)	$10^8$
ფაიფური	$10^{12}$

ნივთიერება	ზეგამტარ მდგომარეობაში გადასვლის ტემპერატურა, კელვინები
ტიტანი	2040
ურანი	3900
თუთია	2025
ალუმინი	1200
კალა	800
ვერცხლისწყალი	400
ტყვია	200
ნიობიუმის ნიტრატი	150

Handwritten notes in the right column:  
 მთელი სპილენძი +  
 მინა 0.4 +  
 ინტენსიური +  
 მინერალიზაცია  
 მუხე

ნივთიერება	წინაღობის ტემპერატურულ- ლი კოეფიციენტი, კელ <sup>-1</sup>
ალუმინი	$8,8 \cdot 10^{-4}$
რკინა	$6,2 \cdot 10^{-4}$
სპილენძი	$4,8 \cdot 10^{-4}$
კონსტანტანი (40% Ni. ~ 60% Cu)	$2 \cdot 10^{-4}$
ვერცხლისწყალი (თხევადი)	$0,0 \cdot 10^{-4}$
ნიკრომი (20% Cr. 75% Ni. 5% Fe)	$1 \cdot 10^{-4}$
ფექრალი (13% Cr. 4% Al. 1% Si. 0.7% Mn. დანარ- ჩენი Fe)	$2 \cdot 10^{-4}$
ქრომალი (25% Cr, 5% Al. 70% Fe)	$4 \cdot 10^{-4}$





ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ  
ՆԱԿԱՅԵՑՈՒԹՅԱՆ ԳՐԱԴԱՐԱՆ

1875

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ  
ՆԱԿԱՅԵՑՈՒԹՅԱՆ ԳՐԱԴԱՐԱՆ

