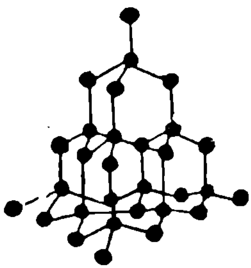
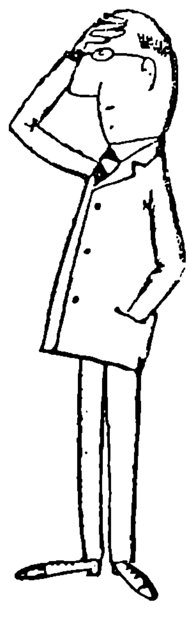
ლ. ლანდაუ, ა. კიტაიგოროდსკი

ფიზიკა ყველასათვის

მოძრაობა
სითბო





„ნაკადული"
თბილისი
1974

52
087.1.52
6 259

რუსულიდან თარგმნა
არჩილ ჭრელაშვილმა

I გამოცემა

Л $\frac{70803 — 000}{М—603—74}$ 115—74

წინასიტყვაობა

როდესაც მკითხველი ამ წიგნს ხელში აიღებს, პირველად ასეთი კითხვა დაებადება: ვის „ყველასათვის"?

რასაკვირველია, ეს სათაური ცოტათი გადაჭარბებულია. ჩვენი მკითხველისათვის საკმარისია სასკოლო ალგებრის საფუძვლების ცოდნა. ფიზიკის ცოდნა საჭირო არ არის: ეს წიგნი შეიძლება თქვენი პირველი წიგნი იყოს ფიზიკაში. მაგრამ, ვინ იცის, იქნებ მან ისინიც დააინტერესოს, ვინც ფიზიკა თავის სპეციალობად აირჩია.

ჩვენ ვცდილობდით მსუბუქი და მარტივი ენით გვეწერა, არ მოვიკელით სიამოვნება ზოგან გავხუმრებოდით კიდეც მკითხველს. მაგრამ ეს სრულებითაც არ ნიშნავს იმას, თითქოს ჩვენი „ფიზიკა ყველასათვის" იოლად გასაგები წიგნი იყოს. მისი მრავალი ფურცელი დიდხანს უნდა იკითხოთ ყურადღებით; ფიზიკა რომ გაიგოთ, ძალიან ხშირად დაგჭირდებათ ხანგრძლივი და სერიოზული დაფიქრება.

წიგნში მთავარი ყურადღება ეთმობა ფიზიკის ფუნდამენტალურ კანონებსა და ცნებებს. მაგრამ ვცდილობდით არც ცხოვრებიდან და ტექნიკიდან

აღებული ილუსტრაციები დაგვევიწყებინა, თუმცა მიზნად არა გვქონია რამდენადმე ღრმად შევჭრილიყავით ფიზიკის გამოყენების ამოუწურავ სფეროში.

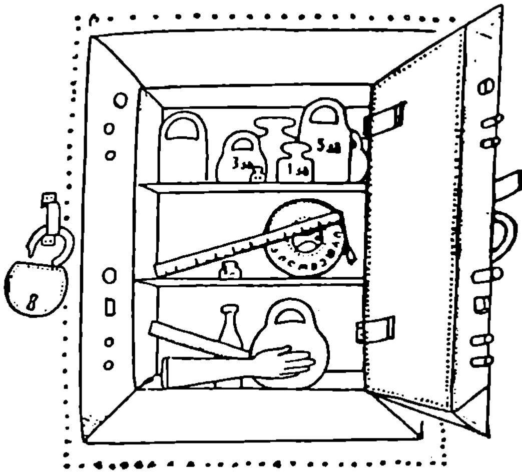
წიგნში ჩართული მცირერიცხოვანი ისტორიული გადახვევები ეხება მხოლოდ და მხოლოდ ფიზიკის საფუძვლებს და არა მის გამოყენებას.

ჯერჯერობით „ფიზიკა ყველასათვის“ მოიცავს ფიზიკის მხოლოდ ნაწილს, რომელიც ეხება მექანიკურ და მოლეკულურ მოძრაობას. ვიმედოვნებთ, მომავალში მკითხველი ამავე სათაურით გაეცნობა ელექტრობის, ოპტიკისა და ატომის აგებულებისადმი მიძღვნილ წიგნებსაც.

ლ. ლანდაუ

ა. კიტაიგოროდსკი

I. ძირითადი ცნებები



სანტიმეტრი და წამი

თვითეულ ჩვენგანს გაუზომია სიგრძე, აუთვლია დრო, აუწონია სხეულები. ამიტომ ყველამ კარგად იცის, რა არის სანტიმეტრი, წამი და გრამი. მაგრამ ფიზიკოსისათვის ამ გაზომვებს განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს — ისინი აუცილებელია ფიზიკურ მოვლენათა უმრავლესობაზე მსჯელობისათვის. ადამიანი ისწრაფვის, რაც შეიძლება ზუსტად გაზომოს მანძილი, დროის შუალედები და წონა, რომლებსაც ფიზიკაში ძირითად ცნებებს უწოდებენ.

თანამედროვე ფიზიკური ხელსაწყოები საშუალებას იძლევა განისაზღვროს განსხვავება ორ მეტრიან ღეროს სიგრძეებს შორის, თუნდაც ეს სხვაობა მეტრის ერთ მემილიარდედ ნაწილზე ნაკლები იყოს. შეიძლება წამის ერთი მემილიონედით

განვასხვავოთ დროის შუალედებიც, კარგი სასწორის საშუალებით კი უდიდესი სიზუსტით განვსაზღვროთ ხაშხაშის მარცვლის წონა.

სულ რამდენიმე ასეული წელია, რაც გაზომვათა ტექნიკის განვითარება დაიწყო და შედარებით ცოტა ხნის წინათ შეთანხმდნენ, სიგრძის როგორი მონაკვეთი და რომელი სხეულის წონა მიეღოთ ერთეულებად.

მაგრამ რატომ მაინცდამაინც ჩვენთვის ცნობილი სანტიმეტრი და წამი აირჩიეს? ცხადია, არავითარი განსაკუთრებული მნიშვნელობა არ ექნებოდა, სანტიმეტრი ან წამი უფრო გრძელი რომ ყოფილიყო.

საზომი ერთეული მოხერხებული უნდა იყოს, ჩვენ მას სხვა მოთხოვნებს არ ვუყენებთ. ძალიან კარგია, თუ საზომი ერთეული ხელთა გვაქვს. მაგრამ კიდევ უფრო უკეთესია თვით ხელის გამოყენება საზომ ერთეულად. სწორედ ასე იქცეოდნენ ძველად; ამას მოწმობს ერთეულთა სახელები, მაგალითად, წყრთა (რუსული „ЛОКОТЬ") — მანძილი იდაყვიდან გაშლილი ხელის თითის წვერებამდე, დუიმი — ცერის სიგანე თითის ძირში. საზომად ფეხსაც იყენებდნენ — აქედან წარმოიშვა სიგრძის საზომის სახელწოდება „ფუტი" — ტერფის სიგრძე (ინგლისურად foot ტერფს ნიშნავს).

ეს საზომი ერთეულები ძალიან მოხერხებულია იმით, რომ ყოველთვის ხელთა გვაქვს, მაგრამ მათი ნაკლიც აშკარაა: ადამიანები მეტისმეტად განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან იმისათვის, რომ ხელი ან ფეხი გამოვიყენოთ ისეთ საზომ ერთეულად, რომელიც დავას არ გამოიწვევს.

ვაჭრობის განვითარებასთან დაკავშირებით აუცილებელი გახდა საზომ ერთეულებზე შეთანხმება. ჯერ ცალკეული ბაზრისთვის დაადგინეს სიგრძისა და წონის ეტალონები, მერე ქალაქისათვის, შემდეგ მთელი სახელმწიფოსა და, ბოლოს, მთელი მსოფლიოსათვის. ეტალონი სანიმუშო საზომია: სახაზავი, საწონი. სახელმწიფო საგულდაგულოდ ინახავს ეტალონებს და ყოველგვარ სახაზავებსა და საწონებს ზუსტად ეტალონების შესატყვისად ამზადებს.

მეფის რუსეთში წონისა და სიგრძის ძირითადი საზომები—მათ გირვანქა და არშინი ეწოდებოდა — პირველად 1747

წელს დაამზადეს. მაგრამ XIX საუკუნეში გაზომვის სიზუსტისადმი მოთხოვნილება გაიზარდა და ეს ეტალონები არასრულყოფილი აღმოჩნდა. ზუსტი ეტალონების დასამზადებელი რთული და საპასუხისმგებლო სამუშაო შესრულდა 1893—1898 წწ. დიმიტრი ივანეს ძე მენდელეევის ხელმძღვანელობით. გამოჩენილი ქიმიკოსი დიდ მნიშვნელობას ანიჭებდა ზუსტი საზომების დადგენას. მისი თაოსნობით XIX საუკუნის ბოლოს შეიქმნა ზომათა და წონათა მთავარი პალატა, სადაც ინახებოდა ეტალონები და მზადდებოდა მათი ასლები.

ზოგი მანძილი დიდი ერთეულებით გამოიხატება, ზოგიც — უფრო მცირეთი. მართლაცდა, სასაცილო იქნებოდა მანძილი მოსკოვიდან ლენინგრადამდე სანტიმეტრებში გამოგვეხატა, ან რკინიგზის შემადგენლობის წონა — გრამებში. ამიტომ ადამიანები შეთანხმდნენ მსხვილ და წვრილ ერთეულებს შორის გარკვეული თანაფარდობა დაეცვათ. როგორც ყველასათვის ცნობილია, ერთეულთა იმ სისტემაში, რომლითაც ჩვენ ვსარგებლობთ, მსხვილი ერთეულები წვრილებისაგან განსხვავდებიან 10-ჯერ, 100-ჯერ, და 1000-ჯერ და საერთოდ ათის ნებისმიერ ხარისხჯერ. მართალია, ასეთი პირობა ძალიან მოხერხებულია და ამარტივებს კიდეც ყველა გამოთვლას, იგი მაინც არ არის მიღებული ყველა ქვეყანაში. ინგლისსა და აშშ-ში, მიუხედავად მეტრული სისტემის აშკარა მოხერხებულობისა, დღემდე იშვიათად სარგებლობენ მეტრით, სანტიმეტრით, კილომეტრით, გრამითა და კილოგრამით [1].

XVII საუკუნეში წარმოიშვა აზრი, შეერჩიათ ისეთი ეტალონი, რომელიც ბუნებაში არსებობს და წლებისა და საუკუნეების განმავლობაში არ იცვლება. 1664 წელს ქრისტიან ჰიუგენსმა წამოაყენა წინადადება სიგრძის ერთეულად მიეღოთ

---

[1] ინგლისში ოფიციალურად არის მიღებული სიგრძის შემდეგი საზომები: ზღვის მილი (1852 მ), უბრალო მილი (1609 მ), ფუტი (30,5 სმ); ფუტი უდრის 12 დუიმს, დუიმი — 2,54 სმ; იარდი — 0,91 მ. ეს „სამკერვალო“ ზომაა, იარდებში მიღებულია კოსტუმისათვის საჭირო ქსოვილის რაოდენობის გაზომვა.

ანგლო-საქსურ ქვეყნებში წონას ზომავენ გირვანქებში (454 გ). გირვანქის ნაწილებია — უნცია (1/16 გირვანქა) და გრანი (1/7000 გირვანქა); ამ საზომებით მეაფთიაქეები სარგებლობენ წამლების აწონვისას.

ისეთი ქანქარას სიგრძე, რომელიც წამში ერთ რხევას შეასრულებდა. დაახლოებით ასი წლის შემდეგ, 1771 წ., ფიქრობდნენ, ეტალონად მიეღოთ იმ გზის სიგრძე, რომელსაც გადის თავისუფლად ვარდნილი სხეული 1 წამში. მაგრამ ორივე ვარიანტი მოუხერხებელი აღმოჩნდა და არ მიუღიათ. რევოლუცია გახდა საჭირო იმისათვის, რომ თანამედროვე საზომები წარმოშობილიყო, — კილოგრამი და მეტრი საფრანგეთის დიდმა რევოლუციამ დაბადა.

1790 წელს დამფუძნებელმა კრებამ ერთიანი საზომების გამოსამუშავებლად შექმნა საგანგებო კომისია. კომისიაში საუკეთესო ფიზიკოსები და მათემატიკოსები შედიოდნენ. ყველა წამოყენებული ვარიანტიდან მათ სიგრძის ერთეულისათვის შეარჩიეს დედამიწის მერიდიანის მეოთხედის ერთი მეათმილიონედი ნაწილი და ამ ერთეულს „მეტრი" უწოდეს. 1799 წელს დაამზადეს მეტრის ეტალონი და დასაცავად რესპუბლიკის არქივს გადასცეს.

მაგრამ მალე ნათელი გახდა, რომ თავისთავად სწორი აზრი ბუნებისაგან ნასესხები სანიმუშო საზომების არჩევის მიზანშეწონილობისა სრული სახით განუხორციელებელია. XIX საუკუნეში ჩატარებული უფრო ზუსტი გაზომვების შედეგად აღმოჩნდა, რომ მეტრის დამზადებული ეტალონი დაახლოებით მილიმეტრის 0,08-ით მოკლე იყო დედამიწის მერიდიანის ერთ მეორმოცმილიონედ ნაწილზე. ცხადი გახდა, გაზომვათა ტექნიკის განვითარების კვალდაკვალ საჭირო იქნებოდა ახალ-ახალი შესწორებების შეტანა. თუ მეტრს კვლავ განსაზღვრავდნენ როგორც დედამიწის მერიდიანის ნაწილს, მერიდიანის ყოველი ახალი გაზომვის შემდეგ აუცილებლად ახალი ეტალონი უნდა დაემზადებინათ და დანარჩენი სიგრძეებიც თავიდან გადაეანგარიშებინათ. ამიტომ 1870, 1872 და 1875 წლების საერთაშორისო ყრილობებზე მსჯელობის შემდეგ გადაწყდა სიგრძის ერთეულად მიეღოთ არა მერიდიანის ერთი მეორმოცმილიონედი ნაწილი, არამედ 1799 წელს დამზადებული მეტრის ეტალონი, რომელიც ამჟამად პარიზში ინახება ზომა-წონის საერთაშორისო ბიუროში.

მეტრის ისტორია ამით არ მთავრდება. დღეს ამ ფუნდამენტალური სიდიდის განსაზღვრას საფუძვლად ედება ახალი

ფიზიკური იდეები. კვლავ ბუნებისაგან ვსესხულობთ სიგრძის ზომას, მაგრამ ამჯერად გაცილებით უფრო მოხერხებულად.

მეტრთან ერთად გაჩნდა მისი ნაწილებიც: ერთი მეათასედი — მილიმეტრი, ერთი მემილიონედი — მიკრონი და ყველაზე უფრო გავრცელებული, ერთი მეასედი — სანტიმეტრი.

ახლა რამდენიმე სიტყვა წამის შესახებ. იგი სანტიმეტრზე ბევრად უფროსია. დროის ერთეულის დადგენისას არავითარ აზრთა სხვაობას არ ჰქონია ადგილი. ეს გასაგებიცაა: დღისა და ღამის ცვლა, მზის მუდმივი მოქცევა დროის ერთეულის არჩევის ბუნებრივ ხერხს გვიკარნახებს. ყველასთვის კარგად არის ცნობილი გამოთქმა: „დროის განსაზღვრა მზის მიხედვით". თუ მზე ცაზე მაღლა დგას, მაშასადამე, შუადღეა და მიწაში ჩარჭობილი ჯოხის ჩრდილის სიგრძის გაზომვის შემდეგ ადვილად განვსაზღვრავთ მომენტს, როდესაც იგი უმაღლეს წერტილში იმყოფება. მეორე დღეს იმავე წესით შეიძლება აღინიშნოს იგივე მომენტი. გასული დროის შუალედი დღე-ღამეს შეადგენს. ამის შემდეგ საჭიროა მხოლოდ დღე-ღამის საათებად, წუთებად და წამებად დაყოფა.

გაზომვის დიდი ერთეულები — წელიწადი და დღე-ღამე — ჩვენ თვით ბუნებამ მოგვცა. მაგრამ საათი, წუთი და წამი ადამიანმა გამოიგონა.

დღე-ღამის თანამედროვე დაყოფა უძველეს დროთაგან მომდინარეობს. ბაბილონში გავრცელებული იყო არა ათობითი, არამედ სამოცობითი თვლის სისტემა. სამოცი უნაშთოდ იყოფა თორმეტზე და სწორედ აქედან მომდინარეობს დღე-ღამის 12 ტოლ ნაწილად დაყოფა ბაბილონში.

ძველ ეგვიპტეში შემოღებული იყო დღე-ღამის 24 საათად დაყოფა. უფრო მოგვიანებით წარმოიშვა წუთები და წამები. ის, რომ საათში 60 წუთია, ხოლო წუთში — 60 წამი — აგრეთვე ბაბილონის სამოცობითი სისტემის ნამემკვიდრალია.

ძველ და საშუალო საუკუნეებში დროს ზომავდნენ მზის საათებით, წყლის საათებით (დიდი ჭურჭლიდან წყლის გამოდინების დროის მიხედვით) და კიდევ ბევრი სხვა რთული, მაგრამ მეტად არაზუსტი მოწყობილობით.

თანამედროვე საათის საშუალებით ადვილად დავრწმუნდებით, რომ დღე-ღამე წელიწადის სხვადასხვა დროს მთლად ერთნაირი არ არის. ამიტომ შეთანხმების საფუძველზე დროის საზომ ერთეულად მიიღეს წელიწადის საშუალო მზიური დღე-ღამე. წელიწადის ამ საშუალო დროის შუალედის ერთ ოცდამეოთხედ ნაწილს ეწოდება საათი.

დროის ერთეულების — საათის, წუთისა და წამის — განსაზღვრისას დღე-ღამის ტოლ ნაწილებად დაყოფის შედეგად, ჩვენ ვგულისხმობთ, რომ დედამიწა თანაბრად ბრუნავს. მაგრამ ოკეანის მზისა და მთვარისეული მოქცევები, თუმცა უმნიშვნელოდ, მაინც ანელებენ დედამიწის ბრუნვას. მაშასადამე, ჩვენი დროის ერთეული — დღე-ღამე — განუწყვეტლივ გრძელდება.

დედამიწის ბრუნვის ეს შენელება იმდენად უმნიშვნელოა, რომ მისი უშუალოდ გაზომვა მხოლოდ ახლახან შეძლეს, მას შემდეგ, რაც ატომური საათი გამოიგონეს, რომელიც დროის შუალედებს უდიდესი სიზუსტით — წამის მემილიონედ ნაწილამდე — ზომავს. დღე-ღამის ცვლილება 100 წელში 1—2 მილისეკუნდს აღწევს.

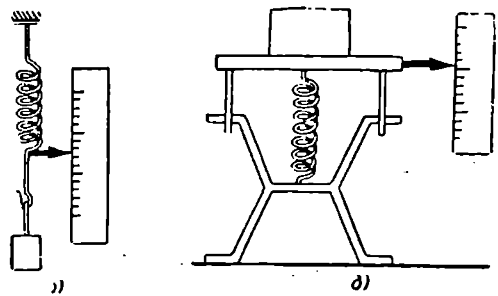
მაგრამ ეტალონმა, თუკი ეს შესაძლებელია, ასეთი უმნიშვნელო შეცდომაც კი უნდა გამორიცხოს. უკანასკნელი განსაზღვრის თანახმად წამი არის 1/31556925, 9747 ნაწილი სავსებით განსაზღვრული წელიწადისა და არა საშუალო მზიური დღე-ღამის ნაწილი.

წონა და მასა

წონა არის ძალა, რომლითაც დედამიწა იზიდავს სხეულს. ეს ძალა შეიძლება ზამბარიანი სასწორით გაიზომოს. რაც უფრო მეტს იწონის სხეული, მით უფრო მეტად იჭიმება ზამბარა, რომელზეც იგი ჰკიდია. ერთეულად მიღებული საწონის საშუალებით ზამბარა შეიძლება დავაგრადუიროთ — დავნიშნოთ ადგილები, რომლებიც გვიჩვენებენ, სადამდე გაიჭიმა ზამბარა ერთკილოგრამიანი, ორკილოგრამიანი, სამკილოგრამიანი და ა. შ. საწონების გავლენით. თუ ამის შემდეგ ასეთ

სასწორზე ჩამოვკიდებთ სხეულს, მაშინ ზამბარის გაჭიმვის მიხედვით ვიპოვით კილოგრამებში გამოხატულ ძალას, რომლითაც ამ სხეულს დედამიწა იზიდავს (სურ. 1, ა). წონის განსაზღვრისათვის მარტო გასაჭიმს კი არა, შესაკუმშ ზამბარებსაც იყენებენ (ნახ. 1, ბ). სხვადასხვა სისქის ზამბარების გამოყენებით შეიძლება დამზადდეს როგორც ძალიან დიდი, ისე მცირე სიმძიმეების გასაზომი სასწორები. ამ პრინციპს ემყარება არა მარტო უხეში სავაჭრო სასწორები, არამედ ფიზიკური გაზომვებისათვის აუცილებელი ძალიან ზუსტი ხელსაწყოებიც.

დაგრადუირებულ ზამბარას იყენებენ არა მარტო დედამიწის მიზიდულობის ძალის, ე. ი. წონის, არამედ სხვა ძალების გასაზომადაც. ასეთ ხელსაწყოს ეწოდება დინამომეტრი, რაც ძალის გამზომს ნიშნავს. ბევრს უნახავს, როგორ ზომავენ დინამომეტრით ადამიანის კუნთის ძალას. მოტორის წევის ძალის განსაზღვრაც დინამომეტრის საშუალებით არის მოსახერხებელი (ნახ. 2).



ნახ. 1.

სხეულის წონა მისი მეტად მნიშვნელოვანი თვისებაა. მაგრამ წონა მარტო სხეულზე როდია დამოკიდებული. მას ხომ დედამიწა იზიდავს. მთვარეზე რომ ვყოფილიყავით? ცხადია, წონა სხვა იქნებოდა — დაახლოებით 6-ჯერ ნაკლები, როგორც გამოთვლები გვიჩვენებს. წონა თვით დედამიწის სხვადასხვა განედებზეც განსხვავებულია. პოლუსზე, მაგალითად, სხეული 0,5%-ით მეტს იწონის, ვიდრე ეკვატორზე.

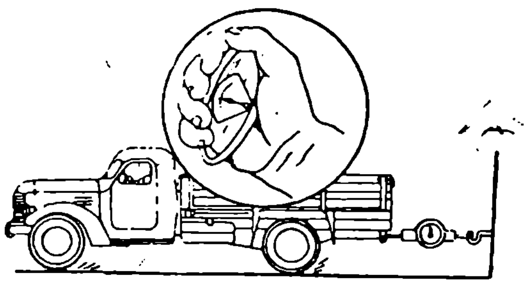
მიუხედავად ასეთი ცვალებადობისა წონას აქვს ერთი შესანიშნავი თავისებურება — ორი სხეულის წონის ფარდობა ნებისმიერ პირობებში, როგორც ცდა გვიჩვენებს, უცვლელი რჩება. თუ პოლუსზე ორი სხვადასხვა ტვირთი ერთნაირად ჭიმავს ზამბარას, მაშინ ეს ერთიანობა უცვლელი დარჩება ეკვატორზეც.

თუ წონას ეტალონის წონასთან შედარების გზით გავზომავთ, მაშინ გამომჟღავნდება სხეულთა ახალი თვისება — მასა.

ამ ახალი ცნების — მასის — ფიზიკური აზრი მჭიდროდ არის დაკავშირებული წონების შედარებისას გამომჟღავნებულ იმ ერთნაირობასთან, რაზეც ჩვენ ეს-ეს არის გესაუბრეთ.

წონისგან განსხვავებით მასა სხეულის უცვლელ თვისებას წარმოადგენს და გარდა თვით ამ სხეულისა, არაფრისაგან არ არის დამოკიდებული.

წონის შედარება, ე. ი. მასის განსაზღვრა, ყველაზე უფრო მოხერხებულია ჩვეულებრივი ბერკეტიანი სასწორის საშუალებით (ნახ. 3). ჩვენ ვამბობთ, რომ ორი სხეულის მასა ტო-

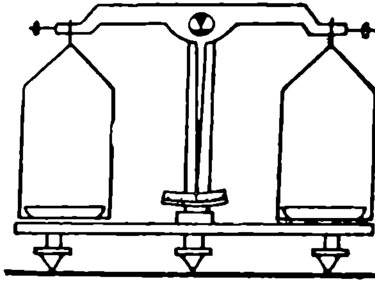


ნახ. 2.

ლია, თუ ბერკეტიანი სასწორი, რომლის ორივე ტაფაზეც ეს სხეულები აწყვია, ზუსტად გაწონასწორებულია. თუ ტვირთს ეკვატორზე ავწონით ბერკეტიანი სასწორით, ხოლო შემდეგ ტვირთსა და საწონებს პოლუსზე გადავიტანთ, მაშინ ტვირთიც და საწონებიც თავიანთ წონას ერთნაირად შეიცვლიან.

ამიტომ პოლუსზე აწონა იგივე შედეგს მოგვცემს: სასწორი გაწონასწორებული დარჩება.

ამ დებულების შესამოწმებლად ჩვენ მთვარეზეც შეგვიძლია გავემგზავროთ. რაკი სხეულების წონის ფარდობა იქაც არ იცვლება, ამიტომ ბერკეტიან სასწორზე დადებული ტვირთი იგივე საწონებით გაწონასწორდება. სხეულის მასა ერთი და იგივეა, სადაც არ უნდა იმყოფებოდეს ეს სხეული.



ნახ. 3.

როგორც მასის, ისე წონის ერთეულები დაკავშირებულია საწონის ეტალონის არჩევაზე. ზუსტად ისევე, როგორც მეტრისა და წამის შემთხვევაში, ადამიანი ცდილობდა ეპოვა მასის ბუნებრივი ეტალონი. იმავე კომისიამ დაამზადა გარკვეული შენადნობის საწონი, რომელიც ბერკეტიან სასწორზე აწონასწორებდა ერთ კუბურ დეციმეტრ წყალს ცელსიუსის ოთხ გრადუსზე[1]. სწორედ ამ ეტალონმა მიიღო კილოგრამის სახელწოდება.

მაგრამ მოგვიანებით გამოირკვა, რომ ერთი კუბური დეციმეტრი წყლის „აღება“ არც ისე ადვილი იყო. ჯერ ერთი, დეციმეტრი, როგორც მეტრის ნაწილი, მეტრის ეტალონის დაზუსტებასთან ერთად იცვლებოდა. მეორეც, როგორი უნდა ყოფილიყო წყალი? ქიმიურად სუფთა? ორჯერ დისტილირებული? ჰაერის ნიშნების გარეშე? „მძიმე წყლის“ მინარევების მიმართ როგორლა მოქცეულიყვნენ? და ბოლოს, ყველა ამ

[1] ეს ტემპერატურა შემთხვევით არ აურჩევიათ. საქმე ისაა, რომ გათბობისას წყლის მოცულობა ძალიან თავისებურად იცვლება, არა ისე, როგორც სხეულთა უმეტესობისა. ჩვეულებრივად გათბობისას სხეულები ფართოვდება, ხოლო წყალი ტემპერატურის მატებისას 0-დან 4°C-მდე იკუმშება და მხოლოდ 4°-ზე ზევით იწყებს გაფართოებას. ამგვარად 4° — ეს ის ტემპერატურაა, როცა წყალი შეკუმშვას ამთავრებს და გაფართოებას იწყებს.

სიძნელესთან ერთად მოცულობის გაზომვის სიზუსტე ხომ მნიშვნელოვნად ნაკლებია აწონვის სიზუსტეზე.

ამჯერადაც საჭირო გახდა ბუნებრივ ერთეულზე უარის თქმა. მასის ზომად მიიღეს სპეციალურად დამზადებული საწონის მასა და ეს საწონიც პარიზში ინახება მეტრის ეტალონთან ერთად.

მასას ზომავენ აგრეთვე კილოგრამის მეათასედი და მემილიონედი ნაწილებით — გრამითა და მილიგრამით. საწონის ეტალონის წონას დედამიწის 45-ე პარალელზე ეწოდება კილოგრამი და ასე აღინიშნება — კგ-ძ (კილოგრამი-ძალა). ამ საწონის მასასაც კილოგრამს უწოდებენ და კგ-თი აღნიშნავენ. მთვარეზე ამ საწონის მასა კვლავ 1 კგ იქნება, ხოლო მისი წონა დაახლოებით, 0,17 კგ-ძ გახდება. ამრიგად, ძალასა და მასას საზომი ერთეულების ერთნაირი სახელწოდებები აქვთ. ამ გარემოებას სერიოზული არევ-დარევა შეაქვს წონისა და მასის „ურთიერთდამოკიდებულების" გარკვევაში. გაუგებრობის თავიდან ასაცილებლად ზომათა და წონათა მეათე და მეთერთმეტე (1960 წ.) გენერალურმა კონფერენციებმა შეიმუშავეს, ხოლო შემდეგ სახელმწიფოთა უმრავლესობამ დაამტკიცა სახელმწიფო სტანდარტებად ერთეულთა ახალი, ინტერნაციონალური სისტემა (სი). ახალ სისტემაში სახელწოდება კილოგრამი (კგ) მასას დაუტოვეს. ყოველგვარი ძალა, მათ შორის, ცხადია, წონაც, ახალ სისტემაში ნიუტონებში (ნ) იზომება. რატომ მიეცა ამ ერთეულს ასეთი სახელწოდება და როგორია მისი განსაზღვრა, ამას ჩვენ ცოტა ქვემოთ გავიგებთ.

ახალი სისტემა, რა თქმა უნდა, ერთბაშად არ შემოვა ხმარებაში. შეიძლება მან ყველგან არც მოიკიდოს ფეხი. ამიტომ ჩვენთვის ჯერჯერობით სასარგებლო იქნება დავიხსომოთ, რომ კილოგრამი მასა (კგ) და კილოგრამი ძალა (კგ-ძ) სხვადასხვა ერთეულებია და ამ სიდიდეებზე არითმეტიკული მოქმედებები ისე უნდა შევასრულოთ, როგორც სხვადასხვანაირად სახელდებულ რიცხვებზე. ვინმემ რომ დაწეროს 5კგ + 2 კგ-ძ = 7, ეს ისეთივე უაზრობა იქნება, როგორც მეტრებისა და წამების შეკრება.

სიმკვრივე

რას ვგულისხმობთ, როცა ვამბობთ, ესა და ეს საგანი ტყვიასავით მძიმე, ან ბუმბულივით მსუბუქიაო? ცხადია, ტყვიის მარცვალი მსუბუქი იქნება, მაშინ როდესაც ბუმბულის მოზრდილ გროვას საკმაოდ დიდი მასა აქვს. ვინც ასეთ შედარებებს მიმართავს, იმას მხედველობაში აქვს არა სხეულის მასა, არამედ იმ ნივთიერების სიმკვრივე, რომლისგანაც ეს სხეული შედგება.

სხეულის სიმკვრივე მოცულობის ერთეულის მასას ეწოდება. გასაგებია, რომ ტყვიის სიმკვრივე ერთნაირია ტყვიის მარცვალშიც და მასიურ ბლოკშიც.

სიმკვრივის აღნიშვნისას, ჩვეულებრივ, მიუთითებენ, რამდენ გრამს (გ) შეიცავს სხეულის კუბური სანტიმეტრი (სმ^3), — რიცხვის შემდეგ იწერება სიმბოლო გ/სმ^3. სიმკვრივის განსაზღვრისათვის გრამების რიცხვი უნდა გაიყოს კუბური სანტიმეტრების რიცხვზე; ამას მოგვაგონებს წილადის ნიშანი სიმბოლოში.

ყველაზე მძიმე მასალების რიცხვს მიეკუთვნება ზოგიერთი ლითონი — ოსმიუმი, მისი სიმკვრივე უდრის 22,5 გ/სმ^3, ირიდიუმი (22,4), პლატინა (21,5), ვოლფრამი და ოქრო (19,3). რკინის სიმკვრივე უდრის 7,88, სპილენძისა — 8,93.

ყველაზე მსუბუქი ლითონებია მაგნიუმი (1,74), ბერილიუმი (1,83) და ალუმინი (2,70). უფრო მსუბუქი სხეულები ორგანულ ნივთიერებებს შორის უნდა ვეძებოთ: ზოგიერთი ხარისხის ხისა და პლასტიკური მასების სიმკვრივე 0,4 არ აღემატება.

უნდა შევნიშნოთ, რომ ლაპარაკია უწყვეტ სხეულებზე. თუ მყარი სხეული ფორებიანია, ცხადია, უფრო მსუბუქი იქნება. ტექნიკაში ხშირად იყენებენ ფოროვან სხეულებს — კორპსა და ქაფმინას. ქაფმინის სიმკვრივე შეიძლება 0,5-ზე ნაკლები იყოს, თუმცა იმ მყარი ნივთიერების სიმკვრივე, რომლისგანაც იგი მზადდება, ერთზე მეტია. ისევე როგორც ყველა სხეული, რომელთა სიმკვრივეც ერთზე ნაკლებია, ქაფმინა საუცხოოდ ტივტივებს წყალზე.

ყველაზე მსუბუქი სითხეა თხევადი წყალბადი, იგი მხოლოდ ძალიან დაბალ ტემპერატურაზე მიიღება. თხევადი წყალბადის ერთი კუბური სანტიმეტრის მასა 0,07 გ ტოლია. ორგანული სითხეები — სპირტი, ბენზინი, ნავთი — სიმკვრივის მიხედვით მცირედ განსხვავდებიან წყლისაგან. ძალიან მძიმეა ვერცხლის წყალი, მისი სიმკვრივეა 13,6 გ/სმ^3.

გაზების სიმკვრივე როგორღა დავახასიათოთ? გაზები ხომ, როგორც ცნობილია, მთლიანად იკავებენ მათთვის გამოყოფილ მოცულობას. თუ გაზის ერთსა და იმავე მასას ბალონიდან სხვადასხვა მოცულობის ჭურჭლებში შევუშვებთ, იგი ყველგან თანაბრად განაწილდება. მაშ როგორ ვიმსჯელოთ მის სიმკვრივეზე?

გაზების სიმკვრივეს განსაზღვრავენ ეგრეთ წოდებულ ნორმალურ პირობებში — როდესაც ტემპერატურაა 0°C და წნევა ერთი ატმოსფერო. ჰაერის სიმკვრივე ნორმალურ პირობებში 0,00129 გ/სმ^3 ტოლია, ქლორისა — 0,00322 გ/სმ^3. გაზისებრი წყალბადი, ისევე როგორც თხევადი, რეკორდს ამყარებს: ამ უმსუბუქესი გაზის სიმკვრივე 0,00009 გ/სმ^3 ტოლია.

სიმსუბუქის მიხედვით შემდეგი გაზია ჰელიუმი, იგი წყალბადზე ორჯერ მძიმეა. ნახშირორჟანგი ჰაერზე 1,5-ჯერ მძიმეა. იტალიაში, ნეაპოლის მახლობლად, არის ცნობილი „ძაღლების გამოქვაბული", მის ქვედა ნაწილში განუწყვეტლივ გამოიყოფა ნახშირორჟანგი, ეფინება ფსკერს და ნელ-ნელა გამოდის გარეთ. ადამიანს თავისუფლად შეუძლია ამ გამოქვაბულში შესვლა, ძაღლისთვის კი ასეთი გასეირნება ცუდად მთავრდება. გამოქვაბულის სახელწოდებაც სწორედ აქედან წარმოსდგება.

გაზების სიმკვრივე ძალიან მგრძნობიარეა გარეგანი პირობების — წნევისა და ტემპერატურის მიმართ. გარეგან პირობებზე მითითების გარეშე გაზის სიმკვრივის მნიშვნელობებს აზრი არა აქვს. თხევადი და მყარი სხეულების სიმკვრივეც ტემპერატურასა და წნევაზეა დამოკიდებული, მაგრამ გაცილებით უფრო ნაკლებად.

მასის მუდმივობის კანონი

შაქარი რომ წყალში გავხსნათ, ხსნარის მასა ზუსტად შაქრისა და წყლის მასების ჯამის ტოლი იქნება.

ესა და უამრავი ამის მსგავსი ცდა გვიჩვენებს, რომ სხეულის მასა უცვლელი თვისებაა. ნებისმიერი დაქუცმაცებისა და გახსნისას მასა ერთი და იგივე რჩება.

ასევეა ნებისმიერი ქიმიური გარდაქმნების შემთხვევაშიც. ვთქვათ, დაიწვა ნახშირი. გულდასმითი აწონვით შეიძლება დავადგინოთ, რომ ნახშირისა და წვაზე დახარჯული ჰაერის ჟანგბადის მასა ზუსტად წვის პროდუქტების მასის ტოლი იქნება.

უკანასკნელად მასის მუდმივობის კანონი შემოწმდა XIX საუკუნის ბოლოს, როდესაც ზუსტი აწონვის ტექნიკა უკვე საკმაოდ იყო განვითარებული. აღმოჩნდა, რომ ნებისმიერი ქიმიური გარდაქმნებისას მასა თავისი სიდიდის მეასმილიარდედი ნაწილითაც კი არ იცვლება.

ჯერ კიდევ ძველად მიაჩნდათ, რომ მასა უცვლელი იყო პირველად ეს კანონი 1756 წ. ცდით შემოწმდა. ცდა ჩაატარა და ამ კანონის მეცნიერული მნიშვნელობა განმარტა მიხეილ ვასილის ძე ლომონოსოვმა, მან 1756 წელს ლითონის გამოწვისას დაამტკიცა მასის მუდმივობა.

მასა სხეულის უმნიშვნელოვანესი უცვლელი მახასიათებელია. სხეულთა თვისებების უმრავლესობა, ასე ვთქვათ, ადამიანის ხელთ არის. წრთობით შეიძლება რბილი, ხელში ღუნვადი რკინა მაგარი და მსხვრევადი გავხადოთ. ულტრაბგერის ტალღის საშუალებით შეიძლება მღვრიე ხსნარი გამჭვირვალედ ვაქციოთ. მექანიკური, ელექტრული და სითბური თვისებები შეიძლება გარეგანი ზემოქმედების გავლენით შევცვალოთ. მაგრამ თუ სხეულს არ დავუმატებთ ნივთიერებას ან არ მოვაცილებთ არც ერთ ნაწილაკს, ისე, როგორ გარეგან ზემოქმედებებსაც არ უნდა მივმართოთ, სხეულის მასის შეცვლა შეუძლებელია [1].

---

[1] ამ მტკიცების ზოგიერთი შეზღუდვის შესახებ მკითხველს ქვემოთ ვესაუბრებით.

ქმედება და უკუქმედება

ჩვენ ხშირად არ ვაქცევთ ყურადღებას იმ გარემოებას, რომ ძალის ყოველ ქმედებას თან ახლავს უკუქმედება. თუ ზამბარებიან საწოლზე ჩემოდანს დავდებთ, საწოლი ჩაიღუნება. ის, რომ ჩემოდნის წონა საწოლზე მოქმედებს, ყველასათვის ცხადია. მაგრამ ზოგჯერ გვავიწყდება, რომ ჩემოდანზედაც მოქმედებს ძალა საწოლის მხრიდან. საწოლზე დადებული ჩემოდანი ძირს არ ვარდება; ეს კი იმას ნიშნავს, რომ საწოლიდან მასზე მოქმედებს ზევით მიმართული, ჩემოდნის წონის ტოლი ძალა.

სიმძიმის ძალის საწინააღმდეგოდ მიმართულ ძალებს ხშირად საყრდენის რეაქციებს უწოდებენ. სიტყვა „რეაქცია" ნიშნავს „საპასუხო ქმედებას". მაგიდის მოქმედება მასზე დადებულ წიგნზე, საწოლის მოქმედება მასზე დადებულ ჩემოდანზე საყრდენის რეაქციებია.

როგორც ზემოთ იყო ნათქვამი, სხეულის წონას ზამბარიანი სასწორით საზღვრავენ. სხეულის დაწოლა მის ქვეშ მოთავსებულ ზამბარაზე ან გამჭიმავი ძალა ზამბარისა, რომელზეც ტვირთია ჩამოკიდებული, სხეულის წონის ტოლია. მაგრამ, ცხადია, ზამბარის შეკუმშვა ან გაჭიმვა იმავე დროს საყრდენის რეაქციის სიდიდესაც გვიჩვენებს.

ასე რომ, როდესაც ზამბარის საშუალებით რაიმე ძალას ვზომავთ, ჩვენ ვზომავთ არა ერთი, არამედ ურთიერთსაწინააღმდეგოდ მიმართული ორი ძალის სიდიდეს. ზამბარიანი სასწორი ზომავს ტვირთის დაწოლასაც სასწორის თეფშზე და საყრდენის რეაქციასაც — სასწორის თეფშის მოქმედებას ტვირთზე. თუ ზამბარას კედელზე დავამაგრებთ და ხელით გავჭიმავთ, შეგვიძლია ერთდროულად გავზომოთ ძალა, რომლითაც ხელი სჭიმავს ზამბარას, და ძალა, რომლითაც ზამბარა ეწევა ხელს.

ამრიგად, ძალებს აქვს შესანიშნავი თვისება: ისინი ყოველთვის წყვილ-წყვილად გვხვდება და ამასთან ყოველთვის ტოლი და საწინააღმდეგოდ მიმართულია. სწორედ ასეთ ორ ძალას უწოდებენ ჩვეულებრივად ქმედებასა და უკუქმედებას.

ᲛᲘᲮᲔᲘᲚ ᲕᲐᲡᲘᲚᲘᲡ ᲫᲔ ᲚᲝᲛᲝᲜᲝᲡᲝᲕᲘ (1711—1765)—შესანიშნავი რუსი მეცნიერი, რუსეთში მეცნიერების ფუძემდებელი, დიდი განმანათლებელი. ფიზიკის დარგში იგი გადაჭრით იბრძოდა ელექტრული და სითბური „სითხეების“ შესახებ XVIII საუკუნეში გავრცელებული წარმოდგენების წინააღმდეგ და იცავდა მატერიის მოლეკულურ-კინეტიკურ თეორიას. ლომონოსოვმა პირველად დაამტკიცა ექსპერიმენტულად ქიმიურ გარდაქმნებში მონაწილე ნივთიერებათა მასის მუდმივობის კანონი. ლომონოსოვი ატარებდა ფართო კვლევას ატმოსფერული ელექტრობისა და მეტეოროლოგიის დარგში. მან ააგო შესანიშნავი ოპტიკური ხელსაწყოები, აღმოაჩინა ატმოსფერო ვენერაზე. ლომონოსოვმა შექმნა რუსული სამეცნიერო ენის საფუძვლები; მან იშვიათი სიმარჯვით თარგმნა ლათინური ენიდან ძირითადი ფიზიკური და ქიმიური ტერმინები.

„მარტოხელა" ძალები ბუნებაში არ არსებობს, რეალურად არსებობს მხოლოდ სხეულებს შორის ურთიერთქმედება; ამასთან ქმედებისა და უკუქმედების ძალები უსათუოდ ტოლია, ისინი ისე შეესაბამება ერთმანეთს, როგორც საგანი და მისი გამოსახულება სარკეში.

არ უნდა ავრიოთ ურთიერთგამაწონასწორებელი ძალები ქმედებისა და უკუქმედების ძალებთან.

ძალებზე მაშინ ამბობენ, გაწონასწორებულიაო, როდესაც ისინი ერთ სხეულზეა მოდებული; მაგალითად, მაგიდაზე დადებული წიგნის წონა (დედამიწის მოქმედება წიგნზე) გაწონასწორებულია მაგიდის რეაქციით (მაგიდის მოქმედება წიგნზე).

ორი ურთიერთქმედების გაწონასწორებისას წარმოქმნილი ძალების საწინააღმდეგოდ, ქმედებისა და უკუქმედების ძალები ერთ ურთიერთქმედებას ახასიათებენ, მაგალითად, მაგიდისას წიგნთან. ქმედება — «მაგიდა-წიგნი", უკუქმედება — „წიგნი-მაგიდა", რასაკვირველია, ეს ძალები სხვადასხვა სხეულებზეა მოდებული.

ახლა ვცადოთ ტრადიციული გაუგებრობის ახსნა: „ცხენი ეწევა საზიდავს, მაგრამ საზიდავიც ხომ ეწევა ცხენს; მაშ რატომღა მოძრაობენ ისინი?" უპირველეს ყოვლისა, უნდა გვახსოვდეს, რომ ცხენი ვერ წაიღებს საზიდავს, თუ გზა სიპია. მაშასადამე, მოძრაობის ასახსნელად უნდა გავითვალისწინოთ არა ერთი, არამედ ორი ურთიერთქმედება — არა მარტო „საზიდავი-ცხენი", არამედ „ცხენი-გზაც". მოძრაობა მაშინ დაიწყება, როცა გზასთან ცხენის ურთიერთქმედების ძალა (ძალა, რომლითაც ცხენი ფეხსა ჰკრავს გზას) მეტი იქნება ურთიერთქმედებაზე „ცხენი-საზიდავი" (ძალაზე, რომლითაც საზიდავი ეწევა ცხენს). რაც შეეხება ძალებს „საზიდავი ეწევა ცხენს" და „ცხენი ეწევა საზიდავს", ისინი ერთსა და იმავე ურთიერთქმედებას ახასიათებენ და, მაშასადამე, ტოლებია როგორც უძრაობის, ისე მოძრაობის ნებისმიერ მომენტში.

როგორ შევკრიბოთ სიჩქარეები

თუ მე ვიცადე ნახევარი საათი და კიდევ ერთი საათი, სულ საათნახევარი დრო დამიკარგავს. თუ ვინმემ მომცა მანეთი და შემდეგ კიდევ ორი მანეთი, მაშასადამე, სულ სამი მანეთი მიმიღია. თუ ჯერ 200 გ ყურძენი ვიყიდე და შემდეგ კიდევ 400 გ, სულ 600 გ ყურძენი მექნება. დროის, მასისა და სხვა მსგავსი სიდიდეების შესახებ ამბობენ, რომ ისინი ალგებრულად იკრიბებიან.

მაგრამ ყველა სიდიდე არ შეიძლება ასე უბრალოდ შევკრიბოთ და გამოვაკლოთ. როცა ვამბობთ, რომ მოსკოვიდან კოლომნამდე 100 კილომეტრია, ხოლო კოლომნიდან კაშირამდე — 40 კმ, ეს იმას არ ნიშნავს, თითქოს კაშირა მოსკოვიდან 140 კმ-ით იყოს დაშორებული. მანძილები არ იკრიბება ალგებრულად.

მაშ კიდევ რომელი ხერხით უნდა შევკრიბოთ სიდიდეები? ჩვენს მაგალითზე ადვილად ვიპოვით საჭირო წესს. გადავიტანოთ ქაღალდზე სამი წერტილი ჩვენთვის საინტერესო სამი პუნქტის მდებარეობის აღსანიშნავად (ნახ. 4). ამ სამ წერტილზე შეიძლება ავაგოთ სამკუთხედი. თუ მისი ორი გვერდი ცნობილია, შეიძლება ვიპოვოთ მესამეც. მაგრამ ამისათვის საჭიროა ორ მოცემულ მონაკვეთს შორის კუთხის ცოდნა.

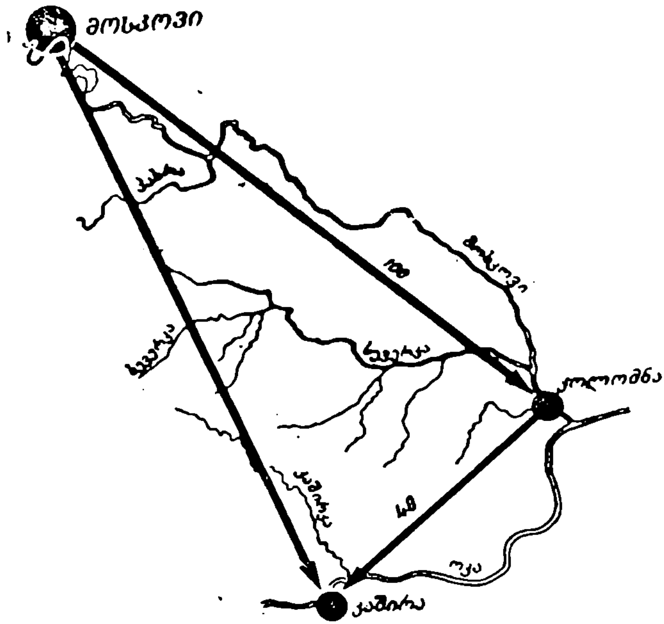
უცნობ მანძილს შემდეგნაირად პოულობენ: გადავზომოთ პირველი მონაკვეთი და მისი ბოლოდან მოცემული მიმართულებით ავაგოთ მეორე. ახლა შევაერთოთ პირველი მონაკვეთის დასაწყისი მეორის ბოლოსთან. საძიებელი მანძილი გამოისახება ჩამკეტი მონაკვეთით.

აღწერილი ხერხით შეკრებას გეომეტრიული ეწოდება, ხოლო სიდიდეებს, რომლებიც ამ წესით იკრიბება — ვექტორები.

იმისათვის, რომ განვასხვავოთ მონაკვეთის დასაწყისი და ბოლო, მას უკეთებენ ისარს. ასეთი მონაკვეთი — ვექტორი — გვიჩვენებს სიგრძეს და მიმართულებას.

ამ წესს რამდენიმე ვექტორის შესაკრებადაც იყენებენ. როცა ერთი წერტილიდან მეორეში გადავდივართ, მეორედან — მესამეში და ა. შ., ჩვენ გავივლით გზას, რომელიც ტე-

ხილი ხაზით შეიძლება გამოისახოს. მაგრამ იმავე წერტილში პირდაპირი გზითაც შეიძლება მისვლა გამოსვლის პუნქტიდან. სწორედ მრავალკუთხედის ჩამკეტი ეს მონაკვეთი იქნება ვექტორული ჯამი.



ნახ. 4.

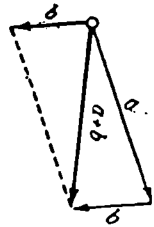
ვექტორთა სამკუთხედი, ცხადია, იმასაც გვიჩვენებს, თუ როგორ გამოვაკლოთ ერთი ვექტორი მეორეს. ამისათვის მათ ერთი წერტილიდან ავლებენ და მეორე ვექტორის ბოლოდან პირველის ბოლომდე გავლებული ვექტორი იქნება სწორედ ამ ვექტორების სხვაობა.

სამკუთხედის წესის გარდა შეიძლება გამოვიყენოთ მისი ტოლფასი პარალელოგრამის წესიც (ნახ. 5). ეს წესი მოითხოვს შესაკრებ ვექტორებზე პარალელოგრამის აგებას და მათი გადაკვეთიდან დიაგონალის გავლებას. ნახატზე ჩანს,

რომ სწორედ პარალელოგრამის დიაგონალია სამკუთხედის ჩამკეტი. მაშასადამე, ორივე წესი თანაბრად ვარგისია.

ვექტორებს იყენებენ არა მარტო გადაადგილების აღწერისათვის. ვექტორულ სიდიდეებს ფიზიკაში ხშირად ვხვდებით.

განვიხილოთ, მაგალითად, მოძრაობის სიჩქარე. სიჩქარე არის გადაადგილება დროის ერთეულში. რაკი გადაადგილება ვექტორია, სიჩქარეც იმავე მიმართულების მქონე ვექტორი იქნება. მრუდი ხაზის გასწვრივ მოძრაობისას გადაადგილების მიმართულება განუწყვეტლივ იცვლება. სიჩქარის მიმართულება? ამ კითხვას როგორღა ვუპასუხოთ? მრუდის მცირე მონაკვეთს ისეთივე მიმართულება აქვს, როგორც მხებს. ამიტომ სხეულის გადაადგილება და სიჩქარე ყოველ მოცემულ მომენტში მიმართულია მოძრაობის წირის მხების გასწვრივ.



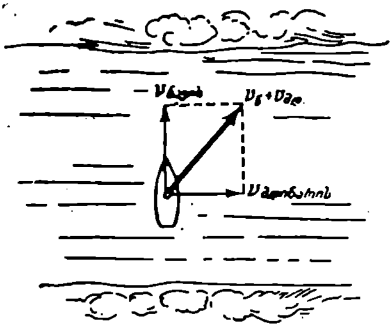
ნახ. 5.

სიჩქარეების ვექტორთა წესით შეკრება და გამოკლება მრავალ შემთხვევაშია საჭირო. სიჩქარეთა შეკრების საჭიროება მაშინ წარმოიშვება, როდესაც სხეული ერთდროულად ორ მოძრაობაში მონაწილეობს. ასეთი შემთხვევები კი ხშირად გვხვდება: ადამიანი დადის მატარებელში და, გარდა ამისა, მატარებელთან ერთად მოძრაობს; ვაგონის ფანჯრის მინაზე ჩამოგორებული წყლის წვეთი წონის გავლენით ქვევითაც მოძრაობს და თან მატარებელთან ერთად მოგზაურობს; დედამიწა მზის ირგვლივ მოძრაობს და, გარდა ამისა, მზესთან ერთად — სხვა ვარსკვლავების მიმართაც. ყველა მსგავს შემთხვევაში სიჩქარეები იკრიბება ვექტორთა შეკრების წესის მიხედვით.

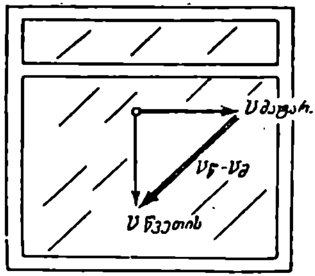
თუ ორივე მოძრაობა ერთი ხაზის გასწვრივ სრულდება და ერთ მხარეს არის მიმართული, მაშინ ვექტორული შეკრება ჩვეულებრივ შეკრებად იქცევა, ხოლო როცა მოძრაობები ურთიერთსაწინააღმდეგოა, მაშინ — ჩვეულებრივ გამოკლებად.

მაგრამ, ვთქვათ, მოძრაობები კუთხეს ქმნიან, როგორ მოვიქცეთ? ამ შემთხვევაში გეომეტრიულ შეკრებას გამოვიყენებთ.

როცა სწრაფ მდინარეზე გადასვლისას საჭეს დინების გარდიგარდმო მივმართავთ, დინება ქვევით ჩაგვიტანს. ნავი მონაწილეობს ორ მოძრაობაში: მდინარის გარდიგარდმო და მის გასწვრივ. ნავის ჯამური სიჩქარე ნაჩვენებია ნახ. 6-ზე.



ნახ. 6.



ნახ. 7.

კიდევ ერთი მაგალითი. როგორი ჩანს წვიმა მატარებლის ფანჯრიდან? თქვენ უთუოდ დაჰკვირვებიხართ, რომ იგი წყნარ ამინდშიც ირიბად მოდის, გეგონებათ ორთქლმავალს წინიდან ქარი უბერავსო (ნახ. 7).

თუ ამინდი უქაროა, წვიმის წვეთი ვერტიკალურად ეცემა ძირს. მაგრამ ფანჯრის გასწვრივ წვეთისვარდნის დროში მატარებელი კარგა მანძილს გადის, იგი ვარდნის ვერტიკალისაგან გარბის და წვიმაც ამიტომ გვეჩვენება ირიბი.

თუ მატარებლის სიჩქარეა $v_მ$, ხოლო წვეთის ვარდნის სიჩქარე $\vec{v}_წ$. მაშინ წვეთის ვარდნის სიჩქარე მატარებლის მგზავრის მიმართ მიიღება $\vec{v}_{მ-ის}$ $\vec{v}_{წ-დან}$[1] ვექტორული გამოკლებით. სიჩქარეთა სამკუთხედი ნაჩვენებია ნახ. 7-ზე. დახრილი ვექტორის მიმართულება წვიმის მიმართულებას გვიჩვენებს; ახლა გასაგებია, რატომ გვეჩვენება წვიმა დახრილად. დახრილი ვექტო-

---

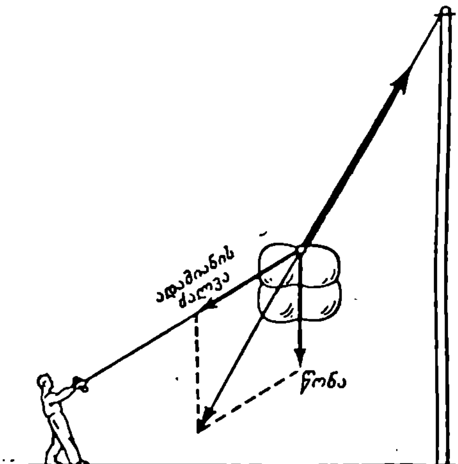
[1] აქ და შემდგომ ასოებს ზემოდან ისრებით აღვნიშნავთ ვექტორებს, ე. ი. მახასიათებლებს, რომელთათვისაც არსებითია არა მარტო სიდიდე, არამედ მიმართულებაც.

რის სიგრძე არჩეულ მასშტაბში გვაძლევს ამ სიჩქარის სიდიდეს. რაც უფრო ჩქარა მიდის მატარებელი და რაც უფრო ნელა ეცემა წვეთი, მით უფრო დახრილი გვეჩვენება წვიმა.

ძალა ვექტორია

ძალა, ისევე როგორც სიჩქარე, ვექტორული სიდიდეა. იგი ხომ ყოველთვის გარკვეული მიმართულებით მოქმედებს. მაშასადამე, ძალებიც იმ წესების მიხედვით უნდა შეიკრიბოს, რომლებზეც ზემოთ ვიმსჯელეთ.

ცხოვრებაში ხშირად გვხვდება ძალების ვექტორული შეკრების საილუსტრაციო მაგალითები. ნახ. 8-ზე ნაჩვენებია ბაგირი, ზედ დაკიდებული ფუთით. კაცი თოკით ფუთას განზე ეწევა. ბაგირი ორი ძალის მოქმედებით არის დაჭიმული: ფუთის სიმძიმის ძალითა და ადამიანის ძალით.



ნახ. 8.

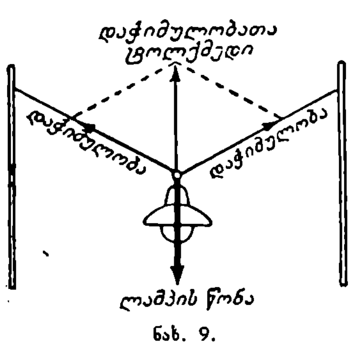
ძალთა ვექტორული შეკრების წესი საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ ბაგირის მიმართულება და გამოვთვალოთ მისი დაჭიმულობის ძალა. ფუთა უძრავია; მაშასადამე, მასზე მოქმედ ძალთა ჯამი ნულის ტოლი უნდა იყოს. შეიძ-

ლება ასეც ვთქვათ: ბაგირის დაჭიმულობა ტოლი უნდა იყოს ფუთის სიმძიმის ძალისა და იმ განზე გამწევი ძალის ჯამისა, რომელიც თოკის მეშვეობით ხორციელდება. ამ ძალთა ჯამი მოგვცემს პარალელოგრამის დიაგონალს, რომელიც ბაგირის გასწვრივ იქნება მიმართული (სხვანაირად, იგი ვერ „მოისპობა“ ბაგირის დაჭიმულობის ძალით). ამ ისრის სიგრძემ უნდა გვიჩვენოს ბაგირის დაჭიმულობის ძალა. ასეთი ძალით შესაძლებელია ფუთაზე მოქმედი ორი ძალის შეცვლა. ამიტომ ძალთა ვექტორულ ჯამს ხანდახან ტოლქმედს უწოდებენ.

ძალიან ხშირად ვხვდებით ხოლმე აგრეთვე ძალთა შეკრების საწინააღმდეგო ამოცანასაც. ლამპა ორ ტროსზე ჰკიდია. იმისათვის, რომ ტროსების დაჭიმულობის ძალები განვსაზღვროთ, ლამპის წონა ამ ორი მიმართულების გასწვრივ უნდა დაიშალოს.

ტოლქმედი ვექტორის ბოლოდან (ნახ. 9) გავავლოთ ტროსების პარალელური ხაზები, ვიდრე ისინი ტროსებს არ გადაკვეთავენ. ძალთა პარალელოგრამი აგებულია. თუ პარალელოგრამის გვერდების სიგრძეს გავზომავთ, ვიპოვით (იმავე მასშტაბში, როგორშიაც წონაა გამოსახული) ტროსების დაჭიმულობის სიდიდეებს.

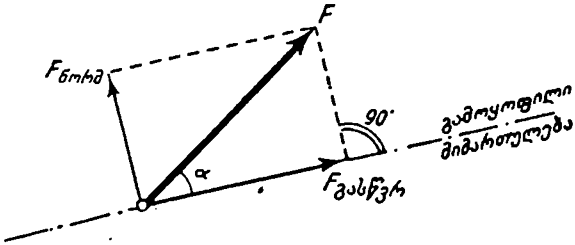
ასეთ აგებას ძალების დაშლა ეწოდება. უამრავი ხერხი არსებობს იმისათვის, რომ ყოველი რიცხვი ორი ან რამდენიმე რიცხვის ჯამის სახით წარმოვიდგინოთ; ეს ეხება ძალის ვექტორსაც: ყოველი ძალა შეგვიძლია დავშალოთ ორ ძალად — პარალელოგრამის გვერდებად, — რომელთაგანაც ერთი ნებისმიერად შეიძლება ავირჩიოთ. ცხადია ისიც, რომ ყოველ ვექტორზე შეიძლება ნებისმიერი მრავალკუთხედის აგება.



ნახ. 9.

ხშირად მოსახერხებელია ძალის დაშლა ორ ურთიერთპერპენდიკულარულ ძალად, რომელთაგან ერთი მიმართულია ჩვენთვის საინტერესო მიმართულებით, მეორე კი — ამ მიმარ-

თულების მართობად. მათ ძალის გასწვრივი და ნორმალური (პერპენდიკულარული) მდგენელები ეწოდება.



ნახ. 10.

ძალის მდგენელს რომელიმე მიმართულებით, აგებულს სწორკუთხედის გვერდების გასწვრივ დაშლით, უწოდებენ აგრეთვე ძალის პროექციას ამ მიმართულებაზე.

ცხადია, რომ ნახ. 10-ზე

$$F^2=F^2_{\text{გასწვრ}}+F^2_{\text{ნორმ}},$$

სადაც $F_{\text{გასწვრ}}$ და $F_{\text{ნორმ}}$—ძალის პროექციებია არჩეულ მიმართულებაზე და მისდამი ნორმალზე.

ტრიგონომეტრიის მცოდნენი ადვილად დაადგენენ, რომ

$$F_{\text{გასწვრ}}=F\cdot\cos\alpha,$$

სადაც α არის კუთხე ძალის ვექტორსა და იმ მიმართულებას შორის, რომელზეც მას ვაგეგმილებთ.

ძალების დაშლის ძალზედ საინტერესო მაგალითს წარმოადგენს იალქნიანი ხომალდის მოძრაობა. როგორ ხერხდება გაშლილი იალქნით ქარის საწინააღმდეგოდ სვლა? თუ როდისმე დაკვირვებიხართ იალქნიან იახტას ასეთ მდგომარეობაში, შეამჩნევდით, რომ იგი ზიგზაგისებურად მოძრაობს, მეზღვაურები ასეთ მოძრაობას ლავირებას უწოდებენ.

პირდაპირ ქარის საწინააღმდეგოდ სვლა გაშლილი იალქნებით, რასაკვირველია, შეუძლებელია, მაგრამ როგორ ახერხებენ ამას თუნდაც კუთხით სვლის დროს?

ქარის წინააღმდეგ ლავირების შესაძლებლობა ორ გარემოებას ემყარება. ჯერ ერთი, ქარი იალქანს ყოველთვის მისი

სიბრტყისადმი მართობი მიმართულებით უბიძგებს. დახედეთ 11, ა ნახატს: ქარის ძალა ორ მდგენელადაა დაშლილი — ერთი მათგანი ჰაერს აიძულებს იალქნის გასწვრივ ისრიალოს, მეორე — ნორმალური მდგენელი — იალქანს აწვება. მეორეც ის, რომ ნავი იქით კი არ მოძრაობს, საითაც მას ქარის ძალა უბიძგებს, არამედ იქით, საითკენაც მისი ცხვირია მიმართული.

ეს იმით აიხსნება, რომ ნავის მოძრაობას ხერხემლის ხაზის მართობი მიმართულებით წყლის ძალიან დიდი წინააღმდეგობა ხვდება. მაშასადამე, იმისათვის, რომ ნავმა ცხვირით წინ იმოძრაოს, საჭიროა იალქანზე დაწოლის ძალას ჰქონდეს წინ მიმართული ნავის ხერხემლის ხაზის გასწვრივი მდგენელი.

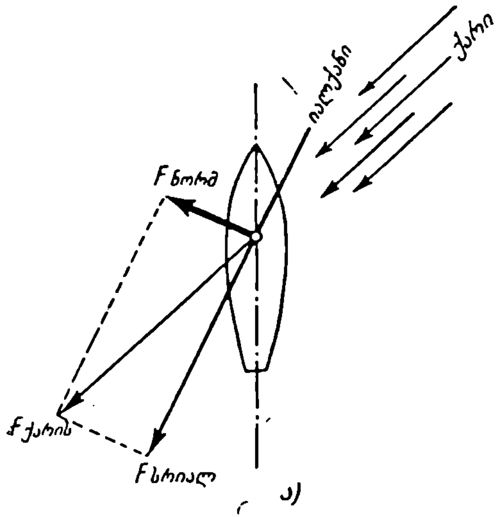
ახლა ნახ. 11, ბ, რომელზეც ქარის საწინააღმდეგოდ მიმავალი ნავია გამოსახული, თქვენთვის გასაგები უნდა იყოს. იალქანს ისე აყენებენ, რომ მისი სიბრტყე შუაზე ჰყოფდეს კუთხეს ნავის სვლის მიმართულებასა და ქარის მიმართულებას შორის.

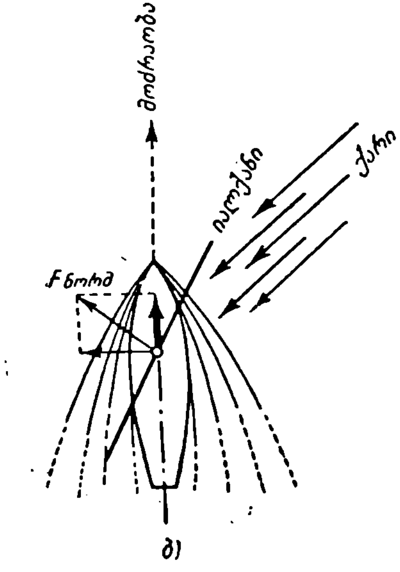
იმისათვის, რომ ვიპოვოთ ძალა, რომელსაც ნავი წინ მიჰყავს, ქარის ძალა ორჯერ უნდა დავშალოთ. ჯერ იალქნის გასწვრივ და მის პერპენდიკულარულად — მნიშვნელობა აქვს მხოლოდ ნორმალურ მდგენელს, შემდეგ ეს ნორმალური მდგენელი უნდა დავშალოთ ხერხემლის ხაზის გასწვრივ და გარდიგარდმო. სწორედ გასწვრივ მდგენელს მიჰყავს ნავი ქარისადმი კუთხით.

დახრილი სიბრტყე

ციცაბო აღმართის დაძლევა უფრო ძნელია, ვიდრე დამრეცისა. სხეულის აგორება სიმაღლეზე დახრილი სიბრტყით უფრო ადვილია, ვიდრე მისი ვერტიკალის გასწვრივ ატანა. რატომ არის ასე და რამდენად უფრო ადვილია დახრილ სიბრტყეზე სხეულის აგორება? ძალთა შეკრების კანონი საშუალებას გვაძლევს გავერკვეთ ამ საკითხებში.

ნახ. 12-ზე ნაჩვენებია ბორბლებიანი ურიკა. მას დაჭიმული თოკი აკავებს დახრილ სიბრტყეზე. წევის გარდა ურიკაზე კი-

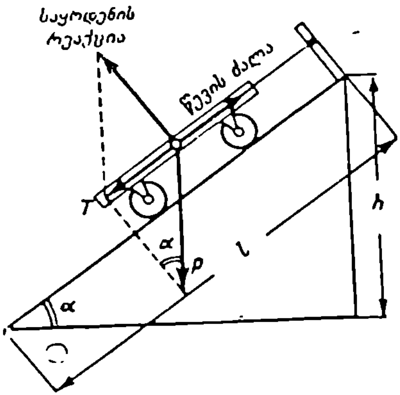

ქარი
იალქანი
F ნორმ
F ქარის
F სრიალ
ა)


მოძრაობა
ქარი
იალქანი
F ნორმ
ბ)

ნახ. 11.

დევ ორი ძალა მოქმედებს — წონა და საყრდენის რეაქციის ძალა, რომელიც ყოველთვის ზედაპირისადმი ნორმალის გასწვრივ მოქმედებს, იმისგან დამოუკიდებლად, ჰორიზონტალურია საყრდენის ზედაპირი თუ დახრილი.

როგორც უკვე ვთქვით, თუ სხეული საყრდენს აწვება, მაშინ საყრდენი წინააღმდეგობას უწევს დაწოლას ან, როგორც ამბობენ, ჰქმნის რეაქციის ძალას.



ნახ. 12.

ჩვენ გვაინტერესებს, რამდენად უფრო ადვილია ურიკის აგორება დახრილ სიბრტყეზე, ვიდრე მისი ვერტიკალურად ატანა.

დავშალოთ ძალები ისე, რომ ერთი იყოს მიმართული იმ ზედაპირისადმი მართობულად, რომელზეც სხეული მოძრაობს, მეორე კი — ამ ზედაპირის გასწვრივ. იმისათვის, რომ სხეული უძრავად გაჩერდეს დახრილ სიბრტყეზე, თოკის დაჭიმულობის ძალამ მხოლოდ გასწვრივი მდგენელი უნდა გააწონასწოროს. რაც შეეხება მეორე მდგენელს, მას საყრდენის რეაქცია აწონასწორებს.

ბაგირის დაჭიმულობის ჩვენთვის საინტერესო T ძალა შეიძლება ვიპოვოთ ან გეომეტრიული აგების საშუალებით, ანდა ტრიგონომეტრიის დახმარებით. გეომეტრიული აგებისათვის წონის P ვექტორის ბოლოდან სიბრტყისადმი პერპენდიკულარი უნდა გავავლოთ.

სურათზე შეიძლება ვიპოვოთ ორი მსგავსი სამკუთხედი. დახრილი სიბრტყის l სიგრძის ფარდობა h სიმაღლესთან ძალთა სამკუთხედის შესაბამისი გვერდების ფარდობის ტოლია. ამრიგად,

$$\frac{T}{P}=\frac{h}{l}.$$

რაც უფრო დამრეცია დახრილი სიბრტყე $\left(\frac{h}{l}\right.$ არ არის დიდი$\left.\right)$, ცხადია, მით უფრო ადვილია სხეულის ზევით ათრევა.

ახლა კი იმათთვის, ვინც ტრიგონომეტრია იცის: რადგანაც წონის გასწვრივ მდგენელსა და წონის ვექტორს შორის კუთხე ტოლია დახრილი სიბრტყის α კუთხისა (ისინი ურთიერთმართობ გვერდებიანი კუთხეებია), ამიტომ

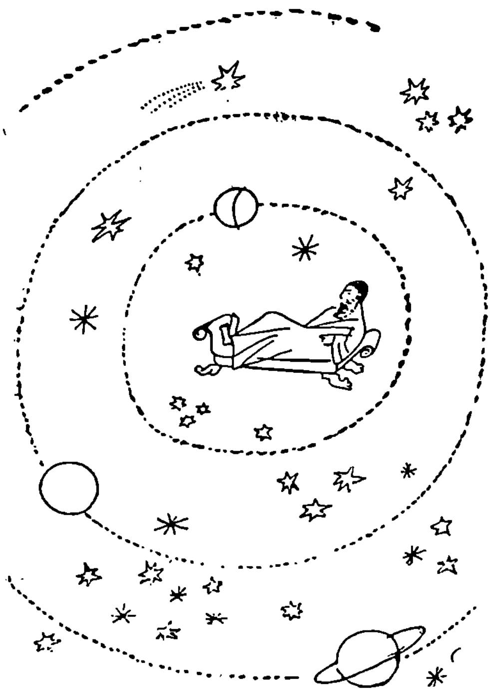
$$\frac{T}{P}=\sin\alpha \text{ და } T=P\cdot\sin\alpha.$$

ამგვარად, ურიკის აგორება α-კუთხიან დახრილ სიბრტყეზე $\sin\alpha$-ჯერ უფრო ადვილია, ვიდრე მისი ვერტიკალურად ატანა.

სასარგებლოა დავიხსომოთ ტრიგონომეტრიული ფუნქციების მნიშვნელობები 30, 45 და 60°-იანი კუთხეებისათვის. თუკი გვეცოდინება ეს მნიშვნელობები სინუსისათვის $\left(\sin 30°=\frac{1}{2};\ \sin 45°=\frac{\sqrt{2}}{2};\ \sin 60°=\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$, მაშინ ნათლად წარმოვიდგენთ, რა ძალას მოვიგებთ დახრილ სიბრტყეზე მოძრაობისას.

ფორმულებიდან ჩანს, რომ თუ სიბრტყის დახრის კუთხე 30°-ია, მაშინ ჩვენი ძალვა წონის ნახევარს შეადგენს: $T=P\cdot\frac{1}{2}$. როდესაც კუთხე 45° და 60°-ია, მაშინ ბაგირი დაახლოებით ურიკის წონის 0,7 და 0,9 ძალით უნდა გავწიოთ. როგორც ვხედავთ, ასეთი ციცაბო სიბრტყეები დიდად ვერ აადვილებენ საქმეს.

II. მოძრაობის კანონები



სხვადასხვა თვალსაზრისი მოძრაობაზე

ჩემოდანი ვაგონის თაროზე დევს და ამავე დროს მოძრაობს მატარებელთან ერთად. სახლი დედამიწაზე დგას, მაგრამ მასთან ერთად მოძრაობს. ერთსა და იმავე სხეულზე შეიძლება ითქვას: მოძრაობს სწორხაზოვნად, უძრავია, ბრუნავს და თვითეული მსჯელობა სწორი იქნება, მხოლოდ სხვადასხვა თვალსაზრისით.

არა მარტო მოძრაობის სურათი, მოძრაობის თვისებებიც შეიძლება სრულიად სხვადასხვაგვარი იყოს, თუ მათ სხვადასხვა თვალსაზრისით განვიხილავთ.

მოიგონეთ, რა ემართება საგნებს გემზე ზღვის ღელვის დროს. რა ურჩები არიან ისინი! მაგიდაზე დადგმული საფერფლე გადაბრუნდა და საწოლის ქვეშ შევარდა. სურაში წყალი აღარ ჩერდება, ლამპა ქანქარასავით ქანაობს. რაიმე აშკარა მიზეზის გარეშე ზოგი საგანი მოძრაობას იწყებს, ზოგიც ჩერდება. მოძრაობის ძირითადი კანონი, შეიძლება თქვას ასეთ გემზე მყოფმა დამკვირვებელმა, ის გახლავთ, რომ დროის ნებისმიერ მომენტში დაუმაგრებელ სხეულს შეუძლია სამოგზაუროდ გაეშუროს ნებისმიერი მიმართულებით და თანაც სულ სხვადასხვა სიჩქარით.

ეს მაგალითი გვიჩვენებს, რომ მოძრაობაზე არსებულ სხვადასხვა თვალსაზრისს შორის ზოგი აშკარად მოუხერხებელია.

მაშ რომელი თვალსაზრისია ყველაზე უფრო „გონივრული“?

მაგიდაზე დადგმული ლამპა რომ უეცრად, ყოველგვარი მიზეზის გარეშე, დაყირავდეს ან პრეს-პაპიე ზევით ახტეს, თქვენ იფიქრებთ, რომ მოგეჩვენათ ეს ყველაფერი. მსგავსი სასწაულები რომ გამეორდეს, მაშინ დაჟინებით დაიწყებთ იმ მიზეზის ძიებას, რომელსაც ეს სხეულები უძრაობის მდგომარეობიდან გამოჰყავს.

ამიტომ სრულიად ბუნებრივია მოძრაობაზე რაციონალურ შეხედულებად მივიღოთ ის თვალსაზრისი, რომლის მიხედვითაც უძრავი სხეულები არ იწყებენ მოძრაობას ძალის მოქმედების გარეშე.

ასეთი თვალსაზრისი სრულიად ბუნებრივი ჩანს: თუ სხეული უძრავია, მასზე მოქმედ ძალთა ჯამი ნულის ტოლია. თუ იგი ადგილიდან დაიძრა, მაშასადამე, მასზე რაღაც ძალამ იმოქმედა.

რაიმე თვალსაზრისი დამკვირვებლის არსებობას გულისხმობს. მაგრამ ჩვენ გვაინტერესებს არა თვით დამკვირვებელი, არამედ ადგილი, სადაც ის იმყოფება. ამიტომ „მოძრაობაზე თვალსაზრისის“ ნაცვლად ჩვენ ვიტყვით ხოლმე: „ათვლის სისტემა, რომელშიაც განვიხილავთ მოძრაობას“ ან უბრალოდ „ათვლის სისტემა“.

დედამიწაზე მცხოვრებთათვის ათვლის მნიშვნელოვან სისტემას დედამიწა წარმოადგენს. თუმცა ხშირად ათვლის სისტე-

ჩა შეიძლება დედამიწაზე მოძრავი სხეულები, ვთქვათ, გემი ან მატარებელი იყოს.

ახლა დავუბრუნდეთ „თვალსაზრისს“ მოძრაობაზე, რომელსაც ჩვენ რაციონალური ვუწოდეთ. ათვლის ამ სისტემას ინერციული ეწოდება.

ამ ტერმინის წარმოშობაზე ცოტა ქვემოთ ვისაუბრებთ.

ამგვარად, ათვლის ინერციული სისტემის თვისება შემდეგნაირია: ამ სისტემის მიმართ უძრავი სხეულები არ განიცდიან ძალების მოქმედებას, ე. ი. ამ სისტემაში არც ერთი მოძრაობა არ იწყება ძალის მოქმედების გარეშე. ათვლის ასეთი სისტემის სიმარტივე და მოხერხებულობა აშკარაა და ამიტომ მიზანშეწონილია საფუძვლად იგი მივიღოთ.

მეტად მნიშვნელოვანია ის გარემოება, რომ დედამიწასთან დაკავშირებული ათვლის სისტემა დიდად არ განსხვავდება ინერციული სისტემისაგან. ამიტომ ჩვენ უკვე შეგვიძლია შევუდგეთ მოძრაობის ძირითად კანონზომიერებათა შესწავლას, თუკი მათ დედამიწის თვალსაზრისით განვიხილავთ. თუმცაღა უნდა გვახსოვდეს, რომ, მკაცრად თუ ვიმსჯელებთ, ყველაფერი, რაც შემდეგ პარაგრაფშია ნათქვამი, ათვლის ინერციულ სისტემას ეხება.

ინერციის კანონი

საკამათო არ არის, რომ ათვლის ინერციული სისტემა მოხერხებულია და მას ფასდაუდებელი უპირატესობა აქვს.

მაგრამ ერთადერთია ასეთი სისტემა, თუ მრავალი ინერციული სისტემა არსებობს? ძველი ბერძნები, მაგალითად, პირველ თვალსაზრისზე იდგნენ. მათ თხზულებებში ჩვენ ვხვდებით მრავალ გულუბრყვილო მსჯელობას მოძრაობის მიზეზთა შესახებ, რაც დასრულებული სახით არისტოტელეს აქვს მოცემული. ამ ფილოსოფოსის აზრით, სხეულის ბუნებრივ მდგომარეობას წარმოადგენს უძრაობა — რასაკვირველია, დედამიწის მიმართ. ხოლო სხეულის ყოველგვარ გადაადგილებას დედამიწის მიმართ უნდა ჰქონდეს მიზეზი — ძალა. როცა მოძრაობის მიზეზი აღარ არის, სხეული უნდა გაჩერდეს, დაუბრუნდეს თავის ბუნებრივ მდგომარეობას. ეს კი არის

უძრაობა დედამიწის მიმართ. ამ თვალსაზრისით დედამიწა ერთადერთი ინერციული სისტემაა.

ჭეშმარიტების აღმოჩენას და ამ მცდარი, მაგრამ გულუბრყვილო ფსიქოლოგიისათვის მეტად მახლობელი აზრის უარყოფას ჩვენ უნდა ვუმადლოდეთ გამოჩენილ იტალიელს — გალილეო გალილეის (1564—1642).

დავუფიქრდეთ მოძრაობის არისტოტელესეულ განმარტებას და მოვძებნოთ ჩვენთვის ნაცნობ მოვლენებში დედამიწაზე მყოფ სხეულთა ბუნებრივი უძრაობის აზრის დადასტურება ან უარყოფა.

წარმოვიდგინოთ, რომ ვზივართ თვითმფრინავში, რომელიც აეროდრომიდან განთიადზე გაემგზავრა. მზეს ჯერ არ გაუთბია ჰაერი, არ არის „ჰაერის ორმოები", ამდენ უსიამოვნებას რომ აყენებენ ზოგიერთ მგზავრს. თვითმფრინავი არ ინჯღრევა, მისი მოძრაობა არც იგრძნობა. ილუმინატორიდან თუ არ გაიხედეთ, ვერც შეამჩნევთ, რომ მიფრინავთ. თავისუფალ სავარძელზე წიგნი დევს, მაგიდაზე — ვაშლი. თვითმფრინავში ყველა სხეული უძრავია. განა ეს ასე უნდა იყოს, თუკი არისტოტელე მართალია? რასაკვირველია, არა. არისტოტელეს მიხედვით, სხეულის ბუნებრივი მდგომარეობა არის უძრაობა დედამიწაზე. მაშ რატომ არ გროვდებიან ეს სხეულები თვითმფრინავის უკანა კედელთან, რატომ არ ცდილობენ ჩამორჩნენ თვითმფრინავის მოძრაობას და არ „სურთ" გადავიდნენ „ჭეშმარიტი" უძრაობის მდგომარეობაში? რა აიძულებს მაგიდაზე დადებულ ვაშლს, ოდნავ რომ ეხება მაგიდის ზედაპირს, იმოძრაოს უზარმაზარი, საათში რამდენიმე ასეული კილომეტრის სიჩქარით?

მაშ როგორია მოძრაობის მიზეზის საკითხის სწორი გადაწყვეტა? ჯერ იმით დავინტერესდეთ, რატომ ჩერდება მოძრავი სხეულები. მაგალითად, რატომ ჩერდება მიწაზე გაგორებული ბურთულა. სწორი პასუხის გასაცემად საჭიროა დავუფიქრდეთ, რა შემთხვევაში ჩერდება ბურთულა სწრაფად და რა შემთხვევაში — ნელა. ამისათვის საგანგებო ცდები არ არის საჭირო. ყოველდღიური გამოცდილებიდან კარგად არის ცნობილი: რაც უფრო გლუვია ზედაპირი, რომელზეც ბურთულა მიგორავს, მით უფრო შორს გაგორდება იგი. მსგავსი ცდები-

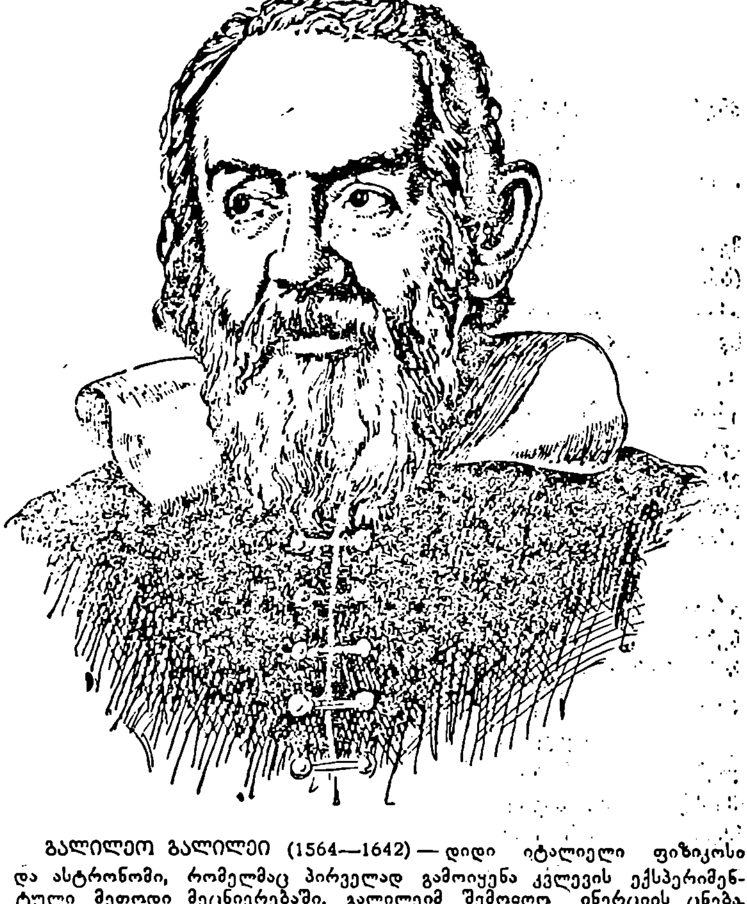
დან იქმნება ბუნებრივი წარმოდგენა ხახუნის ძალებზე. ეს ძალები აბრკოლებენ მოძრაობას და სხეულების დამუხრუჭების მიზეზს წარმოადგენენ. ხახუნი შეიძლება სხვადასხვა საშუალებებით შევამციროთ. გლუვი გზა, კარგი საცხი, სრულყოფილი საკისრები საშუალებას აძლევენ მოძრავ სხეულს თავისუფლად, ძალის მოქმედების გარეშე გაიაროს მით მეტი მანძილი, რაც უფრო მეტად ვეცდებით მოძრაობის დამაბრკოლებელი ყოველგვარი წინააღმდეგობების მოსპობას.

იბადება კითხვა: რა მოხდებოდა წინააღმდეგობა და ხახუნის ძალები რომ არ ყოფილიყო? მაშინ, ცხადია, მოძრაობა დაუსრულებლად გაგრძელდებოდა უცვლელი სიჩქარით ერთი და იმავე სწორი ხაზის გასწვრივ.

ჩვენ ინერციის კანონი დაახლოებით იმ სახით ჩამოვაყალიბეთ, რა სახითაც იგი პირველად მოგვცა გალილეიმ. ინერცია არის მოკლე აღნიშვნა სხეულის უნარისა, იმოძრაოს სწორხაზოვნად და თანაბრად... ყოველგვარი მიზეზის გარეშე, წინააღმდეგ არისტოტელეს შეხედულებისა. ინერცია არის სამყაროში ყოველი ნაწილაკის განუყოფელი თვისება.

როგორ შევამოწმოთ ამ შესანიშნავი კანონის სამართლიანობა? რასაკვირველია, შეუძლებელია ისეთი პირობების შექმნა, რომ მოძრავ სხეულზე არავითარმა ძალამ არ იმოქმედოს. ეს უდავოა, მაგრამ, სამაგიეროდ, საწინააღმდეგო გარემოებაც გვხვდება. ნებისმიერ შემთხვევაში, როდესაც სხეული სიჩქარეს ან მოძრაობის მიმართულებას იცვლის, ყოველთვის შეიძლება ვიპოვოთ მიზეზი — ამ ცვლილების გამომწვევი ძალა. დედამიწაზე ვარდნისას სხეული იძენს სიჩქარეს; ამის მიზეზია დედამიწის მიზიდულობის ძალა. თოკზე გამობმული ქვა ბრუნავს და წრეხაზს აღწერს; სწორხაზოვანი მიმართულებიდან ქვის გადახრის მიზეზი თოკის დაჭიმულობაა. თუ თოკი გაწყდა, ქვა იმ მიმართულებით გაიტყორცნება, რომლითაც იგი თოკის გაწყვეტის მომენტში მოძრაობდა. როცა ავტომობილი გამორთული მოტორით მიდის, მისი სიჩქარე თანდათან მცირდება; მიზეზია ჰაერის წინააღმდეგობა, საბურავების ხახუნი გზაზე და საკისრების არასრულყოფილობა.

ინერციის კანონი ის საძირკველია, რომელსაც ეყრდნობა მთელი მოძღვრება სხეულთა მოძრაობაზე.



გალილეო გალილეი (1564—1642) — დიდი იტალიელი ფიზიკოსი და ასტრონომი, რომელმაც პირველად გამოიყენა კვლევის ექსპერიმენტული მეთოდი მეცნიერებაში. გალილეიმ შემოიღო ინერციის ცნება, დაადგინა მოძრაობის ფარდობითობა; შეისწავლა სხეულთა ვარდნისა და დახრილ სიბრტყეზე მოძრაობის კანონები, მოძრაობის კანონები ჰორიზონტისადმი კუთხით სხეულის გასროლისას, გამოიყენა ქანქარა დროის გასაზომად. კაცობრიობის ისტორიაში მან პირველმა მიმართა ჭოგრი ცისაკენ, აღმოაჩინა მრავალი ახალი ვარსკვლავი, დაამტკიცა, რომ ირმის ნახტომი ვარსკვლავების უზარმაზარი რიცხვისგან შედგება, აღმოაჩინა იუპიტერის თანამგზავრები, მზის ლაქები, მზის ბრუნვა, გამოიკვლია მთვარის ზედაპირის აგებულება. გალილეი აქტიურად უჭერდა მხარს იმ დროს კათოლიკური ეკლესიის მიერ აკრძალულ კოპერნიკის ჰელიოცენტრულ სისტემას. ინკვიზიცია სასტიკად დევნიდა დიდ მეცნიერს სიცოცხლის უკანასკნელი ათი წლის განმავლობაში.

მოძრაობა ფარდობითია

ინერციის კანონს იმ დასკვნამდე მივყავართ, რომ მრავალი ინერციული სისტემა არსებობს.

ერთი კი არა, მრავალი ათვლის სისტემა გამორიცხავს „უმიზეზო“ მოძრაობებს.

თუ ერთი ასეთი სისტემა ვიპოვეთ, მაშინვე მოიძებნება მეორეც, რომელიც პირველის მიმართ ასრულებს გადატანით (ბრუნვის გარეშე), თანაბარ და სწორხაზოვან მოძრაობას. ამასთან, ერთი რომელიმე ინერციული სისტემა არაფრით არა სჯობს სხვებს, არაფრით არ განსხვავდება მათგან. ყოვლად შეუძლებელია ინერციულ სისტემათა სიმრავლეში მოიძებნოს ერთი ყველაზე უკეთესი. მოძრაობის კანონები ყველა ინერციულ სისტემაში ერთნაირია: სხეულები მხოლოდ ძალების გავლენით იწყებენ მოძრაობას, ძალების გავლენით მუხრუჭდებიან, ხოლო როდესაც ძალები აღარ არის, ისინი ან უძრავი არიან, ან თანაბრად და სწორხაზოვნად მოძრაობენ.

ის გარემოება, რომ ცდების საშუალებით შეუძლებელია ერთი რომელიმე ინერციული სისტემის გამოყოფა დანარჩენებისაგან, არის ეგრეთ წოდებული გალილეის ფარდობითობის პრინციპის არსი. ეს კანონი ფიზიკის ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს კანონს წარმოადგენს.

მაგრამ თუმც იმ დამკვირვებელთა თვალსაზრისი, რომლებიც მოვლენებს ორ სხვადასხვა ინერციულ სისტემაში შეისწავლიან, სავსებით თანაბარუფლებიანია, ისინი მაინც სხვადასხვანაირად მსჯელობენ ერთსა და იმავე ფაქტზე. დავუშვათ, ერთი დამკვირვებელი ამბობს, რომ სკამი, რომელზედაც იგი ზის მიმავალ მატარებელში მუდამ სივრცის ერთსა და იმავე ადგილას იმყოფება, მეორე დამკვირვებელი კი, რომელიც ბაქანზე დგას, ამტკიცებს, რომ ეს სკამი ადგილს ინაცვლებს. ან ერთი დამკვირვებელი თოფის გასროლის შემდეგ ამბობს, რომ ტყვია 500 მ/წმ სიჩქარით გაიტყორცნა, მეორე კი, თუ ის იმყოფება სისტემაში, რომელიც იმავე მიმართულებით 200 მ/წმ სიჩქარით მოძრაობს, იტყვის, ტყვია გაცილებით ნელა — 300 მ/წმ სიჩქარით მოძრაობსო.

რომელი მათგანი იქნება მართალი? ორივე. მოძრაობის ფარდობითობის პრინციპი არც ერთ ინერციულ სისტემას არ ანიჭებს უპირატესობას.

გამოდის, რომ სივრცეში ადგილისა და მოძრაობის სიჩქარის შესახებ არ შეიძლება საერთო, უცილობლად სამართლიანი, როგორც იტყვიან, აბსოლუტური მსჯელობა. სივრცის ადგილისა და მოძრაობის სიჩქარის ცნებები ფარდობითია. როდესაც ასეთ ფარდობით ცნებებზე ვლაპარაკობთ, აუცილებელია მივუთითოთ, რომელი ათვლის ინერციული სისტემა იგულისხმება.

ამრიგად, მოძრაობაზე ერთადერთი „სწორი“ თვალსაზრისის არარსებობას სივრცის ფარდობითობის აღიარებამდე მივყავართ. სივრცისთვის შეიძლებოდა აბსოლუტური მხოლოდ იმ შემთხვევაში გვეწოდებინა, თუკი მასში მოიძებნებოდა უძრავი სხეული — უძრავი ყველა დამკვირვებლის თვალსაზრისით. მაგრამ შეუძლებელიც სწორედ ეს არის.

სივრცის ფარდობითობა უფლებას არ გვაძლევს, ისე წარმოვიდგინოთ სივრცე, თითქოს შიგ სხეულები ჩაწინწკლული იყოს.

სივრცის ფარდობითობის აღიარებამდე მეცნიერები ერთბაშად არ მისულან. ისეთ გენიალურ სწავლულსაც კი, როგორიც ნიუტონი იყო, მიაჩნდა, რომ სივრცე აბსოლუტურია, თუმცა ესმოდა, რომ ამის დადგენა შეუძლებელია. ეს არასწორი თვალსაზრისი ფიზიკოსთა მნიშვნელოვან ნაწილში თვით XIX საუკუნის ბოლომდე იყო გავრცელებული. ამის მიზეზებს, როგორც ჩანს, ფსიქოლოგიური ხასიათი უნდა ჰქონდეს: ჩვენ ძვალსა და რბილში გვაქვს გამჯდარი, რომ ირგვლივ ყოველთვის ურყევ „სივრცის ერთსა და იმავე ადგილებს“ ვხედავთ.

ახლა გავარკვიოთ, რა აბსოლუტური მსჯელობა შეიძლება მოძრაობის ხასიათზე.

თუ სხეულები ერთი ათვლის სისტემის მიმართ $\vec{v}_1$ და $\vec{v}_2$ სიჩქარეებით მოძრაობენ, მაშინ მათი სხვაობა (ცხადია, ვექტორული). $\vec{v}_1-\vec{v}_2$ ერთნაირი იქნება ნებისმიერი ინერციული დამკვირვებლისათვის, რადგანაც ორივე სიჩქარე $\vec{v}_1$ და $\vec{v}_2$

ათვლის სისტემის შეცვლისას ერთი და იმავე სიდიდით იცვლება.

ამრიგად, ორი სხეულის სიჩქარეთა ვექტორული სხვაობა აბსოლუტურია. თუკი ასეა, მაშინ ერთი და იმავე სხეულის სიჩქარის ვექტორული ნაზარდი დროის გარკვეულ შუალედში აბსოლუტურია, ე. ი. მისი სიდიდე ერთნაირია ყველა ინერციული დამკვირვებლისათვის.

ისევე, როგორც სიჩქარის ცვლილებას, სხეულის ბრუნვასაც აბსოლუტური ხასიათი აქვს. ბრუნვის მიმართულება და ბრუნვათა რიცხვი წუთში ერთნაირი იქნება ყველა ინერციული სისტემების თვალსაზრისით.

ვარსკვლავიერი დამკვირვებლის თვალსაზრისი

ჩვენ გადავწყვიტეთ შევისწავლოთ მოძრაობა ინერციულ სისტემათა თვალსაზრისით. მაშინ უარის თქმა ხომ არ დაგვჭირდება დედამიწაზე მყოფი დამკვირვებლისაგან დამარების მიღებაზე? დედამიწა, როგორც ეს კოპერნიკმა დაამტკიცა, თავისი ღერძისა და მზის გარშემო ბრუნავს. დღეს მკითხველს ალბათ გაუჭირდება იგრძნოს კოპერნიკის აღმოჩენის რევოლუციურობა, ძნელია იმის წარმოდგენა, რომ მისი იდეების სამართლიანობის დასაცავად ჯორდანო ბრუნო კოცონზე წაკიდა, ხოლო გალილეიმ ათასგვარი დამცირება და გადასახლება გადაიტანა.

მაინც რა არის კოპერნიკის გენიის გმირობა? რატომ უტოლდება დედამიწის ბრუნვის აღმოჩენა ადამიანური სამართლიანობის იდეებს, რომლებისთვისაც მოწინავე ადამიანებს შეეძლოთ სიცოცხლე შეეწირათ?

გალილეიმ თავის ნაშრომში „საუბარი სამყაროს ორი მთავარი, პტოლომესა და კოპერნიკის, სისტემების შესახებ", რომლისთვისაც მას ეკლესია დევნიდა, კოპერნიკის სისტემის მოწინააღმდეგეს სიმპლიჩიო — „გულუბრყვილო" დაარქვა.

მართლაც, სამყაროს მარტივი, უშუალო აღქმის თვალსაზრისით, იმ თვალსაზრისით, რომელსაც არცთუ მთლად სამართლიანად „საღ აზრს" უწოდებენ, კოპერნიკის სისტემა მეტის-

მეტად უცნაური ჩანს. როგორ თუ დედამიწა ბრუნავს. მე ხომ ვხედავ, იგი უძრავია, აი, მზე და ვარსკვლავები მართლაც მოძრაობენ.

ღვთისმეტყველთა დამოკიდებულება კოპერნიკის აღმოჩენისადმი ნათლად ჩანს თეოლოგთა კრების შემდეგ დასკვნაში (1616 წ.): „მოძღვრება იმის შესახებ, რომ მზე სამყაროს ცენტრშია და უძრავია, მცდარია და უაზრო, იგი ფორმალურად ერეტიკულია და საღმრთო წერილს ეწინააღმდეგება, ხოლო მოძღვრება, თითქოს დედამიწა არ იმყოფება სამყაროს ცენტრში, მოძრაობს, და თან დღეღამურ ბრუნვასაც ასრულებს, ცრუ და უაზროა ფილოსოფიური თვალსაზრისით, ღვთისმეტყველების თვალსაზრისით კი, მეტი რომ არ ვთქვათ, მცდარია".

ეს დასკვნა, რომელშიც ბუნების კანონების გაუგებრობა და რელიგიის დოგმატთა უცოდველობის რწმენა შეზავებულია ცრუ „საღ აზრთან", საუკეთესო დადასტურებაა კოპერნიკისა და მისი მიმდევრების სულისა და გონების ძალისა. ისინი გადაჭრით განუდგნენ XVII საუკუნის „ჭეშმარიტებებს".

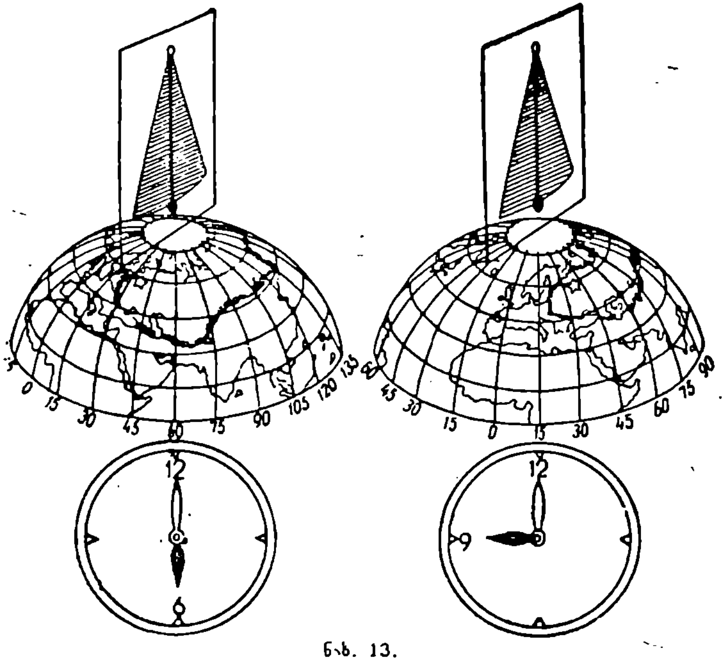
მაგრამ დავუბრუნდეთ ზემოთ დასმულ კითხვას.

თუ დამკვირვებლის მოძრაობის სიჩქარე იცვლება, ანდა დამკვირვებელი ბრუნავს, მაშინ იგი უნდა გამოირიცხოს „მართებული" დამკვირვებლების რიცხვიდან. დედამიწაზე მყოფი დამკვირვებელი კი სწორედ ასეთ პირობებში იმყოფება. მაგრამ თუ სიჩქარის ცვლილება ან დამკვირვებლის შემობრუნება იმ დროში, რომელშიაც იგი მოძრაობას აკვირდება, მცირეა, მაშინ ასეთი დამკვირვებელი პირობით „მართებულად" შეიძლება ჩაითვალოს. სამართლიანი იქნება თუ არა ეს დედამიწაზე მყოფი დამკვირვებლისათვის?

ერთი წამის განმავლობაში დედამიწა გრადუსის 1/240 ნაწილით, ე. ი. დაახლოებით 0,00007 რადიანით შემობრუნდება. ეს არცთუ ისე ბევრია. ამიტომაც საკმაოდ მრავალრიცხოვან მოვლენათა მიმართ დედამიწა სავსებით ინერციული სისტემაა.

მაგრამ ხანგრძლივი მოვლენების შემთხვევაში უკვე არ უნდა დავივიწყოთ, რომ დედამიწა ბრუნავს.

ლენინგრადში ისააკის ტაძრის გუმბათის ქვეშ ერთ დროს უზარმაზარი ქანქარა ჩამოჰკიდეს. თუ ამ ქანქარას რხევით მოძრაობაში მოვიყვანთ, ცოტა ხანში შევნიშნავთ, რომ მისი რხევის სიბრტყე ნელ-ნელა ბრუნავს. რამდენიმე საათის შემდეგ რხევის სიბრტყე შესამჩნევი კუთხით მობრუნდება. ასეთი ცდა მსგავსი ქანქარით პირველად ფრანგმა მეცნიერმა ფუკომ ჩაატარა და მას შემდეგ მისი სახელი დაერქვა. ფუკოს ცდა თვალსაჩინოდ გვიჩვენებს დედამიწის ბრუნვას (ნახ. 13).



ნახ. 13.

ამრიგად, თუ მოძრაობა დიდხანს გრძელდება, იძულებული ვართ უარი ვთქვათ დედამიწაზე მყოფი დამკვირვებლის დახმარებაზე და საფუძვლად მზესა და ვარსკვლავებთან დაკავშირებული ათვლის სისტემა მივიღოთ. ასეთი სისტემით სარგებლობდა კოპერნიკი, როცა მზე და ვარსკვლავები ჩვენს ირგვლივ უძრავად მიაჩნდა.

მაგრამ სინამდვილეში კოპერნიკის სისტემა სავსებით ინერციული არ არის.

სამყარო ვარსკვლავების მრავალ დაჯგუფებათაგან — სამყაროს კუნძულებისაგან შედგება. მათ გალაქტიკები ეწოდება. იმ გალაქტიკაში, რომელშიაც ჩვენი მზის სისტემა შედის, დაახლოებით ასი მილიარდი ვარსკვლავია. თავისი გალაქტიკის ცენტრის მიმართ მზე ბრუნავს დაახლოებით 180 მილიონი წლის პერიოდითა და 250 კმ/წმ სიჩქარით.

მაშ რა შეცდომას დავუშვებთ თუ მზიურ დამკვირვებელს ინერციულად ჩავთვლით?

მიწიერი და მზიური დამკვირვებლების ღირსებათა შედარების მიზნით, გამოვითვალოთ, რა კუთხით მობრუნდება ათვლის მზის სისტემა ერთი წამის განმავლობაში. თუ სრული შემობრუნება $180 \cdot 10^{6}$ წლის ($6 \cdot 10^{15}$ წამის) განმავლობაში სრულდება, მაშინ ერთი წამის განმავლობაში ათვლის მზის სისტემა 10^{-14} გრადუსით, ანუ 10^{-15} რადიანის ტოლი კუთხით შემობრუნდება. შეიძლება ითქვას, რომ მზიური დამკვირვებელი მიწიერზე 100 მილიარდჯერ უკეთესია".

ასტრონომებს სურთ უფრო მეტად მიუახლოვდნენ ინერციულ სისტემას და ამიტომ საფუძვლად რამდენიმე გალაქტიკასთან დაკავშირებულ ათვლის სისტემას იღებენ. ათვლის ასეთი სისტემა ყველაზე ინერციულია ყველა შესაძლო სისტემას შორის. უკეთესი სისტემის პოვნა უკვე შეუძლებელია.

ასტრონომებს ვარსკვლავიერი დამკვირვებლები ორი აზრით შეიძლება ვუწოდოთ: ისინი ვარსკვლავებს აკვირდებიან და ციურ მნათობთა მოძრაობას ვარსკვლავური თვალსაზრისით აღწერენ.

აჩქარება

სიჩქარის ცვალებადობის დასახასიათებლად ფიზიკა აჩქარების ცნებით სარგებლობს.

აჩქარება ეწოდება სიჩქარის ცვლილებას დროის ერთეულში. ნაცვლად იმისა, რომ ვთქვათ: სხეულის სიჩქარე 1 წამში a სიდიდით შეიცვალაო, ჩვენ მოკლედ ვამბობთ: სხეულის აჩქარება a ტოლია.

თუ v_1-ით აღვნიშნავთ სწორხაზოვანი სიჩქარის სიდიდეს დროის პირველ მომენტში, ხოლო v_2 — სიჩქარეს შემდგომ მომენტში, მაშინ a აჩქარების გამოთვლის წესი გამოისახება ფორმულით

$$a=\frac{v_2-v_1}{t},$$

სადაც t არის დრო, რომლის განმავლობაშიც სიჩქარე იცვლებოდა.

სიჩქარე იზომება სმ/წმ-ით (ან მ/წმ-ით და ა. შ.), დრო — წამებით. მაშასადამე, აჩქარება იზომება სმ/წმ-ით წამში. სანტიმეტრების რიცხვი წამში წამებზე იყოფა. ამრიგად, აჩქარების ერთეული იქნება სმ/წმ^2 (ან მ/წმ^2 და ა. შ.).

რასაკვირველია, აჩქარება შეიძლება მოძრაობის დროს შეიცვალოს. მაგრამ ამ არაპრინციპული გარემოებით ჩვენ არ გავართულებთ განხილვას. უბრალოდ უსიტყვოდ ვიგულისხმებთ, რომ მოძრაობის დროს სიჩქარე თანაბრად მატულობს. ასეთ მოძრაობას თანაბრად აჩქარებული ეწოდება.

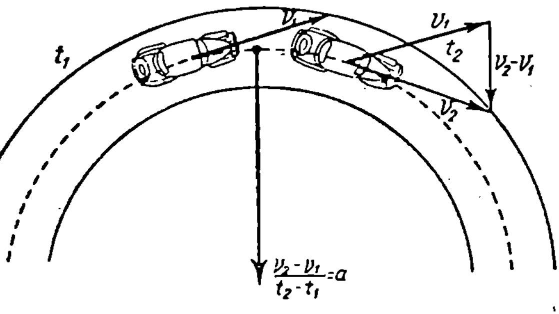
რა არის მრუდხაზოვანი მოძრაობის აჩქარება?

სიჩქარე ვექტორია, სიჩქარეთა ცვლილება (სხვაობა) ვექტორია, მაშასადამე, აჩქარებაც ვექტორია. იმისათვის, რომ ვიპოვოთ აჩქარების ვექტორი, სიჩქარეთა ვექტორული სხვაობა უნდა გავყოთ დროზე, ხოლო როგორ ავაგოთ სიჩქარის ცვლილების ვექტორი, ჩვენ ამაზე ზემოთ გვქონდა საუბარი.

გზა უხვევს. დავნიშნოთ ავტომანქანის ორი მახლობელი მდებარეობა და მისი სიჩქარეები ვექტორების საშუალებით გამოვსახოთ (ნახ. 14). ვექტორების გამოკლებით მივიღებთ სიდიდეს, რომელიც სულაც არ არის ნულის ტოლი; მისი გაყოფით დროის შუალედზე, ვიპოვით აჩქარების სიდიდეს. აჩქარება მაშინაც არსებობს, როდესაც სიჩქარის სიდიდე მოსახვევში არ იცვლება. მრუდხაზოვანი მოძრაობა ყოველთვის აჩქარებულია. აჩქარება არა აქვს მხოლოდ თანაბარ სწორხაზოვან მოძრაობას.

როდესაც სხეულის მოძრაობის სიჩქარეზე ვლაპარაკობდით, ყოველთვის აღვნიშნავდით ხოლმე თვალსაზრისს მოძრაობაზე. სხეულის სიჩქარე ფარდობითია. ერთი ინერციული სისტემის თვალსაზრისით შეიძლება იგი დიდი იყოს, მეორე

ინერციული სისტემის თვალსაზრისით — მცირე. ხომ არ არის საჭირო ასეთივე შენიშვნების გაკეთება აჩქარებაზე საუბრისას. რასაკვირველია, არა. სიჩქარის საპირისპიროდ აჩქარება



ნახ. 14.

აბსოლუტურია. ყველა შესაძლო ინერციული სისტემის თვალსაზრისით აჩქარება ერთი და იგივე იქნება. მართლაც, აჩქარება ხომ დამოკიდებულია სხეულის პირველ და მეორე მომენტში სიჩქარეთა სხვაობაზე, ხოლო ეს სხვაობა, როგორც უკვე ვიცით, ერთნაირი იქნება ყველა თვალსაზრისით, ე. ი. ის აბსოლუტურია.

აჩქარება და ძალა

თუ სხეულზე ძალები არ მოქმედებს, მას შეუძლია მხოლოდ აჩქარების გარეშე იმოძრაოს. პირიქით, ძალის მოქმედება სხეულზე აჩქარებას იწვევს, ამასთან, რაც უფრო მეტია ძალა, მით მეტია სხეულის აჩქარება. რაც უფრო სწრაფად ავამოძრავებთ დატვირთულ ურიკას, მით უფრო მეტად დაგვეძაბება კუნთები. როგორც წესი, მოძრავ სხეულზე ორი ძალა მოქმედებს: ამჩქარებელი — წევის ძალა და დამმუხრუჭებელი — ხახუნის ძალა ან ჰაერის წინააღმდეგობა.

ამ ორი ძალის სხვაობა, ეგრეთ წოდებული მარეზულტირებელი ძალა, შეიძლება მოძრაობის გასწვრივ ან მის საწინააღმდეგოდ იყოს მიმართული. პირველ შემთხვევაში სხეული

მოძრაობას აჩქარებს, მეორეში — ანელებს. თუ ეს ორი, საწინააღმდეგოდ მოქმედი ძალა ერთმანეთის ტოლია (ერთმანეთს აწონასწორებს), სხეული თანაბრად მოძრაობს, თითქოს მასზე საერთოდ არ მოქმედებდეს ძალები.

როგორ უკავშირდება ერთმანეთს ძალა და მის მიერ გამოწვეული აჩქარება? პასუხი თურმე ძალზე მარტივია: აჩქარება ძალის პროპორციულია:

$$a \backsim F.$$

(სიმბოლო $\backsim$ ნიშნავს „პროპორციულია").

მაგრამ გადასაჭრელი რჩება კიდევ ერთი საკითხი: რა გავლენას ახდენენ სხეულის თვისებები მის უნარზე,ააჩქაროს მოძრაობა ამა თუ იმ ძალის გავლენით? ხომ ცხადია, რომ ერთი და იგივე ძალა, თუ იგი სხვადასხვა სხეულებზე მოქმედებს, სხვადასხვა აჩქარებებს ანიჭებს მათ.

დასმულ კითხვაზე პასუხს ჩვენ ის გარემოება გვაძლევს, რომ დედამიწაზე ყველა სხეული ერთნაირი აჩქარებით ვარდება. ამ აჩქარებას g ასოთი აღნიშნავენ. მოსკოვის მახლობლად აჩქარება $g=981$ სმ/წმ².

ერთი შეხედვით უშუალო დაკვირვება არ ადასტურებს აჩქარების ერთნაირობას ყველა სხეულისათვის. საქმე ის გახლავთ, რომ სხეულების ვარდნისას ჩვეულებრივ პირობებში მათზე, სიმძიმის ძალის გარდა, „ხელის შემშლელი" ძალა — ჰაერის წინააღმდეგობაც მოქმედებს. მსუბუქ და მძიმე სხეულთა ვარდნის ხასიათის განსხვავება ძალიან აფიქრებდა ძველი დროის ფილოსოფოსებს. რკინის ნაჭერი სწრაფად ვარდება, ბუმბული ლივლივებს ჰაერში. ქაღალდის გაშლილი ფურცელი დედამიწაზე ნელ-ნელა ეშვება, მაგრამ, იგივე ფურცელი, თუ მას დავჭმუჭნით და გუნდას ფორმას მივცემთ, გაცილებით სწრაფად დავარდება. ჰაერი რომ დედამიწის გავლენით სხეულის „ნამდვილი" მოძრაობის სურათს ამრუდებს, ეს ძველმა ბერძნებმა უკვე იცოდნენ. მაგრამ დემოკრიტეს აზრით, კიდეც რომ არ ყოფილიყო ჰაერი, მძიმე სხეულები ყოველთვის უფრო სწრაფად დავარდებოდნენ, ვიდრე მსუბუქები. მაგრამ ჰაერის წინააღმდეგობას ხომ საწინააღმდეგო მოვლენის გამოწვევაც შეუძლია — მაგალითად, ალუმინის ძალიან

ისააკ ნიუტონი (1643—1727) — გენიალური ინგლისელი ფიზიკოსი და მათემატიკოსი, ერთ-ერთი უდიდესი მეცნიერი კაცობრიობის ისტორიაში. ნიუტონმა ჩამოაყალიბა მექანიკის ძირითადი ცნებები და კანონები, აღმოაჩინა მსოფლიო მიზიდულობის კანონი, რითაც შექმნა სამყაროს ფიზიკური სურათი, რომელიც ხელუხლებელი დარჩა XX საუკუნის დასაწყისამდე. მან დაამუშავა ციურ სხეულთა მოძრაობის თეორია, განმარტა მთვარის მოძრაობის უმთავრესი თვისებები, ახსნა მოქცევები და უკუქცევები. ნიუტონს ეკუთვნის შესანიშნავი აღმოჩენები ოპტიკაში, რომლებმაც ხელი შეუწყვეს ფიზიკის ამ დარგის არაჩვეულებრივად სწრაფ განვითარებას. ნიუტონმა დაამუშავა ბუნების მათემატიკური კვლევის მძლავრი მეთოდი; მას ეკუთვნის პატივი დიფერენციალური და ინტეგრალური აღრიცხვის შექმნისა. ამან უდიდესი გავლენა მოახდინა ფიზიკის მთელ შემდგომ განვითარებაზე, ხელი შეუწყო ფიზიკაში კვლევის მათემატიკური მეთოდების დანერგვას.

თხელი ფურცელი (ფართოდ გაშლილი) უფრო ნელა დავარდება, ვიდრე დაჭმუჭნილი და გუნდად ქცეული ზუსტად ასეთივე ფურცელი.

სხვათა შორის, ამჟამად იმდენად წვრილი ლითონის მავთული მზადდება (რამდენიმე მიკრონის სისქის), რომ იგი ჰაერში ბუმბულივით ლივლივებს.

არისტოტელეს მიაჩნდა, რომ ვაკუუმში ყველა სხეული ერთნაირად უნდა ვარდებოდეს. მაგრამ ამ გონებაჭვრეტითი დასკვნიდან მას ასეთი პარადოქსალური შედეგი გამოჰყავდა: „სხვადასხვა სხეულების ერთნაირი სიჩქარით ვარდნა იმდენად აბსურდულია, რომ, ცხადია, ვაკუუმის არსებობა შეუძლებელია".

ძველი და შუა საუკუნეების სწავლულთაგან არავის არ მოსვლია აზრად პრაქტიკულად შეემოწმებინა, ერთნაირი თუ სხვადასხვა აჩქარებებით ვარდება სხეულები დედამიწაზე. მხოლოდ გალილეიმ (მან შეისწავლა ბურთულების მოძრაობა დახრილ სიბრტყეებზე და პიზის დახრილი კოშკის თავიდან ჩამოგდებული სხეულების ვარდნა) აჩვენა თავისი შესანიშნავი ცდებით, რომ ყველა სხეული, მისი მასისაგან დამოუკიდებლად, დედამიწის ერთსა და იმავე ადგილას ერთნაირი აჩქარებით ვარდება. ამჟამად ამ ცდების დემონსტრირება ძალიან ადვილია გრძელი მილის დახმარებით, რომლიდანაც ამოტუმბულია ჰაერი. ბუმბული და ქვა ასეთ მილში სრულიად ერთნაირად ვარდება: სხეულებზე მოქმედებს მხოლოდ ერთი ძალა — წონა, ჰაერის წინააღმდეგობა ნულამდეა დაყვანილი. როდესაც არ არის ჰაერის წინააღმდეგობა, მაშინ ნებისმიერი სხეულის ვარდნა თანაბრად აჩქარებული მოძრაობაა.

ახლა დავუბრუნდეთ ზემოთ დასმულ კითხვას. რა დამოკიდებულებაშია სხეულის თვისებებთან მისი უნარი,ააჩქაროს მოძრაობა მოცემული ძალის გავლენით?

გალილეის კანონი ამბობს, რომ ყველა სხეული, მისი მასისაგან დამოუკიდებლად, ერთნაირი აჩქარებით ვარდება; მაშასადამე, m კგ მასა m კგ ძალის გავლენით g აჩქარებით მოძრაობს.

ახლა დავუშვათ, რომ სხეულების ვარდნაზე არ არის ლაპარაკი და m მასაზე 1 კგ ძალა მოქმედებს. რადგანაც აჩქარება ძალის პროპორციულია, იგი g-ზე m-ჯერ ნაკლები იქნება.

ამგვარად, სხეულის a აჩქარება მოცემული ძალისათვის (ჩვენ შემთხვევაში 1 კგ-ძალა) მასის უკუპროპორციულია.

თუ ორივე დასკვნას გავაერთიანებთ, შეიძლება დავწეროთ:

$$a \backsim \frac{F}{m},$$

ე. ი. უცვლელი მასის შემთხვევაში აჩქარება ძალის პროპორციულია, ხოლო უცვლელი ძალის შემთხვევაში — მასის უკუპროპორციული.

კანონი, რომელიც ერთმანეთთან აკავშირებს სხეულის აჩქარებას, მასას და მასზე მოქმედ ძალას, დიდმა ინგლისელმა მეცნიერმა ისააკ ნიუტონმა (1643—1727) აღმოაჩინა და მის სახელს ატარებს [1].

აჩქარება პროპორციულია მოქმედი ძალისა, უკუპროპორციულია სხეულის მასისა და დამოკიდებული არ არის სხეულის სხვა რომელიმე თვისებაზე. ნიუტონის კანონიდან გამომდინარეობს, რომ სხეულის „ინერტულობის" ზომას სწორედ მასა წარმოადგენს. თუ სხეულებზე ერთი და იგივე ძალა მოქმედებს, მაშინ მეტი მასის მქონე სხეულის აჩქარება უფრო ძნელია. ამრიგად, მასის ცნებამ, ამ „უბრალო" სიდიდემ, რომელიც ბერკეტიან სასწორზე აწონვით განისაზღვრება, ახალი ღრმა აზრი შეიძინა: მასა სხეულის დინამიკურ თვისებებს განსაზღვრავს.

ნიუტონის კანონი შეიძლება ასე დავწეროთ:

$$kF = ma,$$

სადაც k მუდმივი კოეფიციენტია. ეს კოეფიციენტი ჩვენს მიერ არჩეული ერთეულებისაგან არის დამოკიდებული.

---

[1] თვით ნიუტონი აღნიშნავს, რომ მოძრაობა სამ კანონს ექვემდებარება. ის კანონი, რომელზეც ჩვენ ახლა ვლაპარაკობთ, ნიუტონს მეორე ნომრითა აქვს აღნიშნული. პირველ კანონს იგი ინერციის კანონს უწოდებდა, ხოლო მესამეს — ქმედებისა და უკუქმედების კანონს.

იმის ნაცვლად, რომ ვისარგებლოთ უკვე ნაცნობი ძალის ერთეულით (კგ ძალა), ჩვენ სხვანაირად მოვიქცევით. როგორც ამის გაკეთებას ხშირად ცდილობენ ფიზიკოსები, ძალის ერთეული ისე ავირჩიოთ, რომ პროპორციულობის კოეფიციენტი ნიუტონის კანონში ერთის ტოლი იყოს. მაშინ ნიუტონის კანონი ასეთ სახეს მიიღებს:

$$F = ma.$$

როგორც უკვე ვთქვით, ფიზიკაში მიღებულია მასის გრამებში, მანძილის — სანტიმეტრებში და დროის — წამებში გაზომვა. ამ სამ ძირითად ერთეულზე დაფუძნებულ ერთეულთა სისტემას *CGS* სისტემას უწოდებენ (გამოითქმის „ცე-ჟე-ეს") ან რუსულად СГС.

ახლა ზემოთ ჩამოყალიბებული პრინციპი გამოვიყენოთ და ძალის ერთეული ავირჩიოთ. ცხადია, ძალა იმ შემთხვევაში იქნება ერთეულის ტოლი, თუ იგი 1 გ მასას 1 სმ/წმ²-ის ტოლ აჩქარებას მიანიჭებს. ასეთმა ძალამ ამ სისტემაში **დინის** სახელწოდება მიიღო.

თანახმად ნიუტონის კანონისა, $F = ma$, ძალა გამოიხატება დინებში, თუ m გრამი გამრავლდება a სმ/წმ²-ზე, ამიტომ ასე ვწერთ:

$$1 \text{ დინი} = 1 \frac{\text{გ.სმ}}{\text{წმ}^2}.$$

სხეულის წონა ჩვეულებრივად P ასოთი აღინიშნება. P ძალა სხეულს g აჩქარებას ანიჭებს და, ცხადია, დინებში გვექნება:

$$P = mg$$

მაგრამ ჩვენ უკვე გვქონდა ძალის ერთეული — კილოგრამი (კგ ძალა). ძველ და ახალ ერთეულებს შორის კავშირს მყისვე ვპოულობთ უკანასკნელი ფორმულიდან:

1 კილოგრამი (წონა) = 981 000 დინს.

დინი ძალიან მცირე ძალაა. იგი დაახლოებით ერთი მილიგრამი წონის ტოლია.

ჩვენ უკვე მოვიხსენიეთ ერთეულთა ახალი სისტემა (სი), რომელიც ახლახან შეიმუშავეს. ძალის ახალ ერთეულს სავსებით დამსახურებულად მისცეს სახელწოდება ნ ი უ ტ ო ნ ი (ნ). თუ ასეთ ერთეულს ავირჩევთ, ნიუტონის კანონი უმარტივესი სახით ჩაიწერება, ხოლო ეს ერთეული ასე განისაზღვრება:

$$1 \text{ ნიუტონი} = \frac{\text{კგ} \cdot \text{მ}}{\text{წმ}^2},$$

ე. ი. 1 ნ ი უ ტ ო ნ ი არის ძალა, რომელიც 1 კგ მასას 1 მ/წმ² აჩქარებას ანიჭებს.

ეს ახალი ერთეული ადვილად უკავშირდება დინსა და კილოგრამს:

$$1 \text{ ნიუტონი} = 100\,000 \text{ დინს} = \frac{1}{9{,}8} \text{ კგ-ძ.}$$

მუდმივაჩქარებიანი სწორხაზოვანი მოძრაობა

ასეთი მოძრაობა, ნიუტონის კანონის თანახმად, მაშინ წარმოიშვება, როდესაც ჯამში სხეულზე მოქმედებს მუდმივი ძალა და წინ ეწევა ან ამუხრუჭებს მას.

მსგავსი პირობები (თუმცა მთლად ზუსტად არა) საკმაოდ ხშირად იქმნება: როცა მიმავალი ავტომანქანის მოტორი გამორთულია, იგი დაახლოებით მუდმივი ხახუნის ძალის მოქმედებით მუხრუჭდება. მუდმივი სიმძიმის ძალის გავლენით მძიმე სხეული სიმაღლიდან ვარდება.

თუკი ვიცით მარეზულტირებელი ძალის სიდიდე და სხეულის მასა, $a = \frac{F}{m}$ ფორმულის შემწეობით ვიპოვით აჩქარების სიდიდეს. როგორც ვიცით,

$$a = \frac{v - v_0}{t},$$

სადაც t მოძრაობის დროა, v — საბოლოო სიჩქარე, ხოლო v_0 — საწყისი სიჩქარე. მაშასადამე, ამ ფორმულის დახმარებით

შეიძლება პასუხი გავცეთ შემდეგი ხასიათის კითხვებს: რამდენი ხნის შემდეგ გაჩერდება მატარებელი, თუ ცნობილია დამმუხრუჭებელი ძალა, მატარებლის მასა და საწყისი სიჩქარე? რა სიჩქარეს მოიკრებს ავტომანქანა, თუ ცნობილია მოტორის ძალა, წინააღმდეგობის ძალა, მანქანის მასა და სიჩქარის მატების დრო?

ჩვენ ხშირად გვაინტერესებს მანძილი, რომელსაც სხეული თანაბრად აჩქარებული მოძრაობისას გადის. თუ მოძრაობა თანაბარია, განვლილ მანძილს ვპოულობთ მოძრაობის სიჩქარის გამრავლებით მოძრაობის ხანგრძლივობაზე. თუ მოძრაობა თანაბრად აჩქარებულია, მაშინ განვლილ მანძილს ისე გამოვითვლით, თითქოს სხეული იმავე t დროის განმავლობაში თანაბრად მოძრაობდეს საწყის და საბოლოო სიჩქარეთა ნახევარჯამის ტოლი სიჩქარით:

$$S=\frac{1}{2}(v_0+v)\,t.$$

ამრიგად, თანაბრად აჩქარებული (ან შენელებული) მოძრაობისას სხეულის მიერ განვლილი მანძილი ტოლია საწყის და საბოლოო სიჩქარეთა ნახევარჯამის ნამრავლისა მოძრაობის ხანგრძლივობაზე. ასეთსავე მანძილს გაივლიდა სხეული იმავე დროში $\frac{1}{2}(v_0+v)$ სიჩქარით თანაბარი მოძრაობისას. ამ აზრით $\frac{1}{2}(v_0+v)$-ზე შეიძლება ითქვას, რომ ის თანაბრად აჩქარებული მოძრაობის საშუალო სიჩქარეა.

სასარგებლოა შევადგინოთ ისეთი ფორმულა, რომელიც გვიჩვენებს, რა დამოკიდებულებაშია განვლილი მანძილი აჩქარებასთან. თუ უკანასკნელ ფორმულაში ჩავსვამთ $v=v_0+at$, მივიღებთ:

$$S=v_0t+\frac{at^2}{2},$$

ან, თუ მოძრაობას საწყისი სიჩქარე არა აქვს, მაშინ

$$S=\frac{at^2}{2}.$$

თუ ერთ წამში სხეულმა 5 მ გაიარა, მაშინ ორ წამში იგი (4×5) მ გაივლის, სამ წამში — (9×5) მ და ა. შ., განვლილი მანძილი დროის კვადრატის პროპორციულად იზრდება.

ამ კანონის მიხედვით ვარდება სიმაღლიდან მძიმე სხეული. თავისუფალი ვარდნისას აჩქარება g-ს ტოლია და ფორმულა ასეთ სახეს იღებს:

$$S=\frac{981}{2}\,t^2\ [\text{სმ}],$$

თუ t-ს წამებში ჩავსვამთ.

სხეულს რომ შეეძლოს დაბრკოლების გარეშე ვარდნა, ვარდნის დაწყებიდან სულ რაღაც 100 წამის განმავლობაში იგი უზარმაზარ მანძილს — დაახლოებით 50 კმ გაივლიდა. ამასთან, პირველი 10 წამის განმავლობაში მხოლოდ 1/2 კმ-ს — აი, რას ნიშნავს აჩქარებული მოძრაობა.

მაგრამ რა სიჩქარეს განავითარებს სხეული მოცემული სიმაღლიდან ვარდნისას? ამ კითხვაზე პასუხის გასაცემად დაგვჭირდება ის ფორმულები, რომლებიც განვლილ მანძილს აჩქარებასა და სიჩქარესთან აკავშირებენ. თუ ფორმულაში $S=\frac{1}{2}(v_0+v)\,t$ ჩავსვამთ მოძრაობის ხანგრძლივობის მნიშვნელობას $t=\frac{v-v_0}{a}$, მივიღებთ:

$$S=\frac{1}{2a}\left(v^2-v_0^2\right),$$

ან, თუ საწყისი სიჩქარე ნულის ტოლია,

$$S=\frac{v^2}{2a},\qquad v=\sqrt{2aS}.$$

ათი მეტრი მომცრო, ორ ან სამსართულიანი სახლის სიმაღლეა. რატომ არის სახიფათო ასეთი სახლის სახურავიდან გადმოხტომა? უბრალო გამოთვლა გვიჩვენებს, რომ თავისუფალი ვარდნის სიჩქარე $v=\sqrt{2\cdot 9{,}8\cdot 10}$ მ/წმ$=14$ მ/წმ≈ 50კმ/სთ მნიშვნელობას მიაღწევს, ეს კი ავტომანქანის ქალაქში მოძრაობის სიჩქარეა.

ჰაერის წინააღმდეგობა დიდად არ შეამცირებს ამ სიჩქარეს.

ჩვენს მიერ გამოყვანილ ფორმულებს სულ სხვადასხვა გამოთვლებისათვის იყენებენ. ვისარგებლოთ ამ ფორმულებით და გავიგოთ, როგორ ხორციელდება მოძრაობა მთვარეზე.

უელსის რომანში „პირველი ადამიანები მთვარეზე“ მოთხრობილია იმ მოულოდნელობათა შესახებ, რასაც მოგზაურები თავიანთი ფანტასტიკური სეირნობის დროს წააწყდნენ. მთვარეზე სიმძიმის აჩქარება დედამიწასთან შედარებით დაახლოებით 6-ჯერ ნაკლებია. თუ დედამიწაზე ვარდნილი სხეული პირველი წამის განმავლობაში 5 მ გადის, მთვარეზე იგი მხოლოდ 80 სმ-ით ეშვება (აჩქარება დაახლოებით 1,6 მ/წმ² ტოლია).

დაწერილი ფორმულები საშუალებას გვაძლევს სწრაფად გავიანგარიშოთ მთვარისეული „სასწაულები“.

ნახტომი h სიმაღლიდან გრძელდება $t=\sqrt{\frac{2h}{g}}$ დროის განმავლობაში. იმის გამო, რომ მთვარისეული აჩქარება მიწისეულზე 6-ჯერ ნაკლებია, მთვარეზე გადმოხტომას $\sqrt{6}\approx 2{,}45$-ჯერ მეტი დრო დასჭირდება. რამდენჯერ შემცირდება ნახტომის საბოლოო სიჩქარე ($v=\sqrt{2gh}$)?

მთვარეზე თამამად შეიძლება სამსართულიანი სახლის სახურავიდან გადმოხტომა. იმავე საწყისი სიჩქარით გაკეთებული (ფორმულა $h=\frac{v^2}{2g}$) ნახტომის სიმაღლე ექვსჯერ გაიზრდება. ნახტომი, რომელიც დედამიწაზე რეკორდს აღემატება, იქ ბავშვისთვისაც ხელმისაწვდომი იქნება.

ტყვიის გზა

ადამიანი უხსოვარ დროთაგან ეძებდა საშუალებებს, რაც შეიძლებოდა შორს გაეტყორცნა საგანი. ხელით ან შურდულით გატყორცნილი ქვა, შვილდით გატყორცნილი ისარი, თო-

ფის ტყვია, საარტილერიო ჭურვი, ბალისტიკური რაკეტა — აი, ამ დარგში მოპოვებულ წარმატებათა მოკლე ნუსხა.

გასროლილი სხეული მრუდი ხაზის გასწვრივ მოძრაობს. ამ ხაზს პარაბოლა ეწოდება. პარაბოლის აგება ადვილია, თუ გასროლილი სხეულის მოძრაობას ორი ერთდროული და ერთმანეთისაგან დამოუკიდებელი, ჰორიზონტალური და ვერტიკალური მოძრაობის ჯამის სახით განვიხილავთ. სიმძიმის ძალის აჩქარება ვერტიკალურია, ამიტომ გასროლილი ტყვია მოძრაობს ჰორიზონტალური მიმართულებით, ინერციით, მუდმივი სიჩქარით და, ამასთან ერთად, მუდმივი აჩქარებით ვერტიკალურად ვარდება დედამიწაზე. როგორ შევკრიბოთ ეს ორი მოძრაობა? დავიწყოთ უბრალო შემთხვევით — საწყისი სიჩქარე ჰორიზონტალურია (ვთქვათ, თოფის ლულა, საიდანაც ისვრიან, ჰორიზონტალურია).

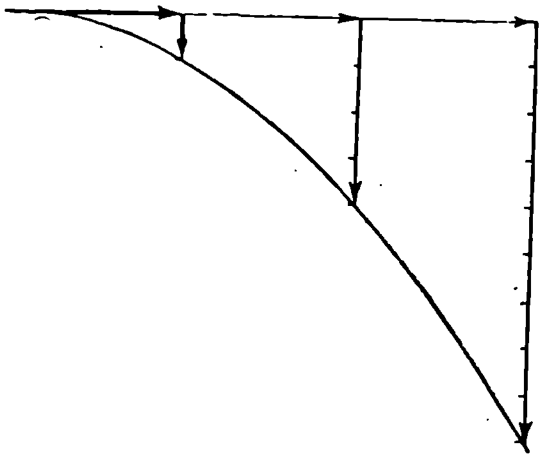
ავიღოთ მილიმეტრებიანი ქაღალდის ფურცელი და ზედ ვერტიკალური და ჰორიზონტალური ხაზები გავავლოთ (ნახ. 15). რადგანაც ორივე მოძრაობა დამოუკიდებლად სრულდება, t წამის შემდეგ სხეული გადაინაცვლებს v_0t მონაკვეთით მარჯვნივ და $\frac{gt^2}{2}$ მონაკვეთით ქვევით. გადავზომოთ ჰორიზონტალური მიმართულებით v_0t მონაკვეთი და მისი ბოლოდან — ვერტიკალური მონაკვეთი $\frac{gt^2}{2}$. ვერტიკალური მონაკვეთის ბოლო გვიჩვენებს წერტილს, რომელშიაც სხეული t წამის შემდეგ აღმოჩნდება.

ასეთი აგება რამდენიმე წერტილისათვის, ე. ი. დროის რამდენიმე მომენტისათვის უნდა გაკეთდეს. ამ წერტილებზე გაივლის გლუვი მრუდი — პარაბოლა, რომელიც სხეულის ტრაექტორიას გამოსახავს. რაც უფრო ხშირად გადავზომავთ წერტილებს, მით უფრო ზუსტად ავაგებთ ტყვიის გასროლის ტრაექტორიას.

ნახ. 16-ზე აგებულია ტრაექტორია იმ შემთხვევისათვის, როდესაც საწყისი სიჩქარე v_0 კუთხით არის მიმართული.

უპირველეს ყოვლისა v_0 ვექტორი უნდა დაიშალოს ვერტიკალურ და ჰორიზონტალურ მდგენელებად. ჰორიზონტალური ხაზის გასწვრივ გადავზომოთ $v_{\text{ჰორ}}t$ — მანძილი, რო-

მელზეც გადაინაცვლებს ტყვია ჰორიზონტალის გასწვრივ t წამის განმავლობაში.



ნახ. 15.

მაგრამ ერთდროულად ტყვია ზევითკენაც მოძრაობს. t წამის განმავლობაში სხეული ავა $h = v_{ვერტიკ.}\, t - \frac{gt^2}{2}$ სიმაღლეზე. ჩავსვათ ამ ფორმულაში ჩვენთვის საინტერესო დროის მომენტები, გამოვთვალოთ ვერტიკალური გადანაცვლებები და გადავზომოთ ისინი ვერტიკალური ღერძის გასწვრივ. დასაწყისში მივიღებთ h-ის ზრდად სიდიდეებს (ზევით ასვლა), ხოლო შემდეგ — კლებადს.

ამის შემდეგ გრაფიკზე ისევე უნდა გადავიტანოთ ტრაექტორიის წერტილები, როგორც წინა მაგალითში გავაკეთეთ, და ზედ გლუვი მრუდი გავავლოთ.

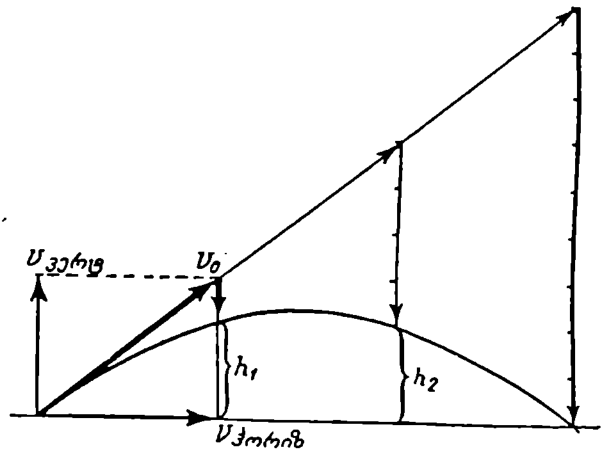
თუ თოფის ლულას ჰორიზონტალურად მივმართავთ, ტყვია მალე ჩაეფლობა მიწაში; თუ ლულას ვერტიკალური მდგომარეობა აქვს, იგი იმავე ადგილზე დაეცემა, საიდანაც გაისროლეს. მაშასადამე, იმისათვის, რომ რაც შეიძლება შორს ვისროლოთ, თოფის ლულა ჰორიზონტის მიმართ რაღაც კუთხით უნდა მივმართოთ, მაგრამ რა კუთხით?

კვლავ იმავე ხერხს გამოვიყენებთ — საწყისი სიჩქარის ვექტორს ორ მდგენელად დავშლით: ვერტიკალის გასწვრივ სიჩქარე v_1-ის ტოლია, ხოლო ჰორიზონტალის გასწვრივ — v_2. დრო გასროლის მომენტიდან ტყვიის უმაღლეს წერტილზე ასვლამდე $\frac{v_1}{g}$ ტოლია. ყურადღება მივაქციოთ იმას, რომ ამავე ხნის განმავლობაში ტყვია ვარდება ძირს, ე. ი. ტყვიის მოძრაობის სრული დრო დედამიწაზე დაცემამდე არის $\frac{2v_1}{g}$

რაკი ჰორიზონტალის გასწვრივ მოძრაობა თანაბარია, სროლის სიშორე იქნება

$$S=\frac{2v_1v_2}{g}$$

(ამასთან, უგულვებელვყავით თოფის სიმაღლე მიწის დონიდან).



ნახ. 16.

ჩვენ მივიღეთ ფორმულა, რომელიც გვიჩვენებს, რომ სროლის სიშორე სიჩქარის მდგენელთა ნამრავლის პროპორციულია. რა მიმართულებით გასროლისათვის იქნება ეს ნამრავლი უდიდესი? ეს კითხვა შეიძლება გეომეტრიის ენაზე გამო-

ითქვას. v_1 და v_2 სიჩქარეები სიჩქარეთა მართკუთხედს ქმნიან, სადაც დიაგონალს სრული სიჩქარე v წარმოადგენს. v_1v_2 ნამრავლი ამ მართკუთხედის ფართის ტოლია.

ამრიგად, ჩვენი კითხვა ასეთ სახეს მიიღებს: თუ დიაგონალის სიგრძე ცნობილია, როგორი გვერდები უნდა ავირჩიოთ, რომ უდიდესფართობიანი მართკუთხედი მივიღოთ? გეომეტრიაში მტკიცდება, რომ ამ პირობას კვადრატი აკმაყოფილებს. ე. ი. ტყვიას ყველაზე შორს მაშინ გავისვრით, როდესაც $v_1 = v_2$, ანუ როდესაც სიჩქარეთა მართკუთხედი კვადრატად იქცევა. სიჩქარეთა კვადრატის დიაგონალი ჰორიზონტალთან 45°-იან კუთხეს ქმნის — სწორედ ასეთი კუთხით უნდა მივმართოთ თოფი, რომ ტყვია რაც შეიძლება შორს წავიდეს.

თუ v ტყვიის სრული სიჩქარეა, მაშინ კვადრატის შემთხვევაში $v_1 = v_2 = \frac{v}{\sqrt{2}}$. სროლის სიშორის ფორმულა ამ საუკეთესო შემთხვევისათვის ასეთი სახისაა: $S = \frac{v^2}{g}$ ე. ი. სიშორე ორჯერ მეტი იქნება იმასთან შედარებით, თუ ისეთივე საწყისი სიჩქარით ვერტიკალურად გავისვრით ზევით.

ზეასვლის სიმაღლე 45°-იანი კუთხით გასროლის შემთხვევაში იქნება $h = \frac{v_1^2}{2g} = \frac{v^2}{4g}$, ე. ი. სროლის სიშორეზე ოთხჯერ ნაკლები.

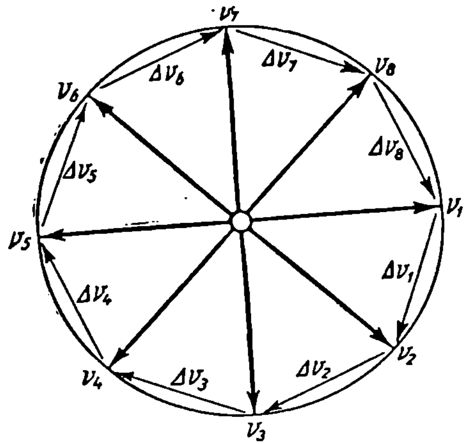
უნდა ვაღიაროთ, რომ ფორმულები, რომლებითაც ჩვენ ვსარგებლობდით, ზუსტ შედეგებს მხოლოდ პრაქტიკულისაგან საკმაოდ დაშორებულ შემთხვევაში იძლევიან — მაშინ როდესაც ჰაერი არ არის. ჰაერის წინააღმდეგობა ხშირად გადამწყვეტ როლს ასრულებს და საფუძვლიანად სცვლის მთელ სურათს.

წრეხაზზე მოძრაობა

თუ წერტილი წრეხაზზე მოძრაობს, მოძრაობა აჩქარებულია. თუნდაც იმიტომ, რომ დროის ყოველ მომენტში სიჩქარე მიმართულებას იცვლის. სიდიდის მიხედვით სიჩქარე შეიძლე-

ბა უცვლელი დარჩეს და ჩვენც სწორედ ასეთ შემთხვევაზე შევაჩერებთ ყურადღებას.

ვხატოთ სიჩქარის ვექტორები დროის მომდევნო შუალედებში და ვექტორთა დასაწყისები ერთ წერტილში მოვათავსოთ (ამის უფლება ჩვენ გვაქვს). თუ სიჩქარის ვექტორი მცირე კუთხით მობრუნდა, მაშინ, როგორც ვიცით, სიჩქარის ცვლილება ტოლფერდა სამკუთხედის ფუძით გამოისახება. ავაგოთ სიჩქარის ცვლილებები სხეულის სრული შემობრუნების დროში (ნახ. 17). სრული შემობრუნების დროში სიჩ-



ნახ. 17.

ქარის სიდიდის ცვლილებათა ჯამი გამოხატული მრავალკუთხედის გვერდების ჯამის ტოლი იქნება. ყოველი სამკუთხედის აგებისას, ჩვენ უსიტყვოდ ვგულისხმობდით, რომ სიჩქარის ვექტორი ნახტომისებურად შეიცვალა, სინამდვილეში კი სიჩქარის ვექტორის მიმართულება უწყვეტად იცვლება. სრულიად აშკარაა, რომ მით უფრო ნაკლებია შეცდომა, რაც უფრო მცირეა სამკუთხედის კუთხე. რაც უფრო მცირეა მრავალკუთხედის გვერდები, მით უფრო მჭიდროდ ეკვრის ის v რადიუსის მქონე წრეხაზს. ამიტომ წერტილის შემობრუნების დროში სიჩქარის ცვლილებათა აბსოლუტური სიდიდეების

ზუსტი ჯამი წრეხაზის $2\pi r$ სიგრძის ტოლი იქნება. აჩქარების სიდიდეს ვიპოვით, თუ მას გავყოფთ სრული შემობრუნების T დროზე.

ამრიგად, წრეხაზზე თანაბარი მოძრაობის აჩქარების სიდიდე გამოიხატება ფორმულით $a = \frac{2\pi v}{T}$.

მაგრამ სრული შემობრუნების დრო R რადიუსის მქონე წრეხაზზე მოძრაობისას შეიძლება ასეთი სახით დაიწეროს: $T = \frac{2\pi R}{v}$, თუ ამ გამოსახულებას წინა ფორმულაში ჩავსვამთ, აჩქარებისათვის მივიღებთ: $a = \frac{v^2}{R}$.

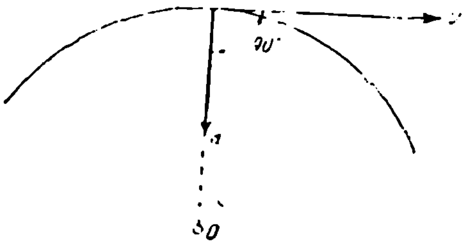
ბრუნვის უცვლელი რადიუსის შემთხვევაში აჩქარება სიჩქარის კვადრატის პროპორციულია. მოცემული სიჩქარისას აჩქარება რადიუსის უკუპროპორციულია.

იგივე მსჯელობა გვიჩვენებს, როგორ არის მიმართული დროის ყოველ მომენტში წრიული მოძრაობის აჩქარება. რაც უფრო მცირეა კუთხე მტკიცებისათვის გამოყენებულ ტოლფერდა სამკუთხედების წვეროში, მით უფრო ახლოა 90°-თან სიჩქარის ნაზარდსა და სიჩქარეს შორის კუთხე.

მაშასადამე, თანაბარი წრიული მოძრაობის აჩქარება სიჩქარისადმი მართობულადაა მიმართული; როგორღა არის მიმართული სიჩქარე და აჩქარება ტრაექტორიისადმი? რამდენადაც სიჩქარე გზის მხებია, აჩქარება მიმართულია რადიუსის გასწვრივ და ამასთან წრეხაზის ცენტრისკენ. ეს თანაფარდობები კარგად ჩანს ნახ. 18-ზე.

სცადეთ და ქვა თოკით დაატრიალეთ. აშკარად იგრძნობთ, რომ ამისათვის კუნთები უნდა დაძაბოთ. რა საჭიროა ძალა? სხეული ხომ თანაბრად მოძრაობს? საქმეც ისაა, რომ არა. სხეული სიდიდის მიხედვით უცვლელი სიჩქარით მოძრაობს, მაგრამ სიჩქარის მიმართულების განუწყვეტელი ცვლა ამ მოძრაობას აჩქარებულს ხდის. ძალა აუცილებელია იმისათვის, რომ სხეული ინერციული სწორხაზოვანი გზიდან გადავხაროთ. ძალა საჭიროა იმისათვის, რომ შევქმნათ ზემოთ გამოთვლილი $\frac{v^2}{R}$ აჩქარება.

ნიუტონის კანონის თანახმად, ძალა იქით იმზირება, საითაც აჩქარებაა მიმართული. მაშასადამე, წრეხაზზე უცვლელი სიჩქარით მბრუნავი სხეული რადიუსის გასწვრივ ცენტრისკენ მიმართული ძალის მოქმედებას უნდა განიცდიდეს. ძალა, რომელიც თავის მხრივ მოქმედებს ქვაზე, სწორედ $\frac{v^2}{R}$ აჩქარებას უზრუნველჰყოფს და ამ ძალის სიდიდე არის $\frac{mv^2}{R}$.



ნახ. 16.

თოკი ქვას ეწევა, ქვა თოკს ეწევა. ამ ორ ძალაში ჩვენ ვიცანით „საგანი და მისი გამოსახულება სარკეში" — ქმედებისა და უკუქმედების ძალები. ხშირად ძალას, რომლითაც ქვა თოკზე მოქმედებს, ცენტრიდანულს უწოდებენ. ცენტრიდანული ძალა, ცხადია, $\frac{mv^2}{R}$-ის ტოლია და მიმართულია რადიუსის გასწვრივ ბრუნვის ცენტრიდან. ცენტრიდანული ძალა იმ სხეულზეა მოდებული, რომელიც ეწინააღმდეგება მბრუნავი სხეულის ინერციულ მისწრაფებას სწორხაზოვნად იმოძრაოს.

ზემოთქმული იმ შემთხვევასაც ეხება, როდესაც „თოკის" როლს სიმძიმის ძალა ასრულებს. მთვარე დედამიწის ირგვლივ ბრუნავს. რა აკავებს ჩვენს თანამგზავრს? რატომ არ მიდის იგი ინერციის კანონის თანახმად პლანეტთაშორის სამოგზაუროდ? დედამიწა მთვარეს აკავებს „უხილავი თოკით" — მიზიდულობის ძალით. ეს ძალა $\frac{mv^2}{R}$-ის ტოლია, სადაც v

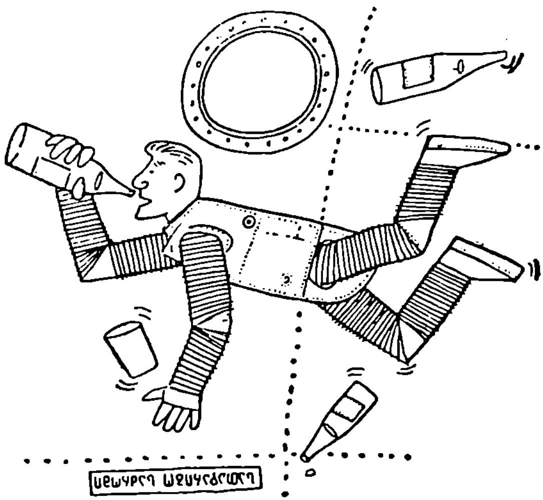
მთვარის ორბიტაზე მოძრაობის სიჩქარეა, ხოლო R — მთვარემდე მანძილი. ცენტრიდანული ძალა ამ შემთხვევაში დედამიწაზეა მოდებული, მაგრამ რადგანაც დედამიწას დიდი მასა აქვს, იგი მხოლოდ უმნიშვნელო გავლენას ახდენს ჩვენი პლანეტის მოძრაობაზე.

ვთქვათ, საჭიროა დედამიწის ხელოვნური თანამგზავრი გავიყვანოთ წრიულ ორბიტაზე დედამიწის ზედაპირიდან 300 კმ მანძილზე. როგორი უნდა იყოს ასეთი თანამგზავრის სიჩქარე? 300 კმ მანძილზე სიმძიმის ძალის აჩქარება ცოტა უფრო ნაკლებია, ვიდრე დედამიწის ზედაპირზე და 8,9 მ/წმ²-ის ტოლია. წრეხაზზე მოძრავი თანამგზავრის აჩქარება $\frac{v^2}{R}$-ის ტოლია, სადაც R არის მანძილი ბრუნვის ცენტრიდან (ე. ი. დედამიწის ცენტრიდან) და დაახლოებით $6600 = 6{,}6 \cdot 10^6$ მ უდრის. მეორე მხრივ, ეს აჩქარება სიმძიმის ძალის g აჩქარების ტოლია. მაშასადამე, $g = \frac{v^2}{R}$, საიდანაც ორბიტაზე თანამგზავრის მოძრაობის სიჩქარეს ვპოულობთ:

$$v = \sqrt{gR} = \sqrt{8{,}9 \cdot 6{,}6 \cdot 10^6} = 7700 \text{ მ/წმ} = 7{,}7 \text{ კმ/წმ}.$$

ჰორიზონტალურად გასროლილი სხეულის დედამიწის ხელოვნურ თანამგზავრად გადაქცევისათვის საჭირო მინიმალურ სიჩქარეს პირველი კოსმოსური სიჩქარე ეწოდება. მოყვანილი მაგალითიდან ჩანს, რომ ეს სიჩქარე 8 კმ/წმ-ს უახლოვდება.

III. მოძრაობა „არაგონივრული“ თვალსაზრისით



ეკვივალენტურობის პრინციპი

წინა თავში ჩვენ ვიპოვეთ „გონივრული“ თვალსაზრისი მოძრაობაზე. თუმცა ასეთი „გონივრული“ თვალსაზრისები, რომლებსაც ინერციული სისტემები ვუწოდეთ, უსასრულოდ მრავალი აღმოჩნდა.

ახლა, როცა უკვე გავეცანით მოძრაობის კანონებს, შეგვიძლია დავინტერესდეთ, როგორ გამოიყურება მოძრაობა „არაგონივრული“ თვალსაზრისით. არაინერციული სისტემების მკვიდრთა ცხოვრებისადმი ინტერესი სულაც არ არის უქმი, თუნდაც იმიტომ, რომ ჩვენ თვითონ ასეთ სისტემაში ვცხოვრობთ.

წარმოვიდგინოთ, რომ ავიღეთ გამზომი ხელსაწყოები, ჩავსხედით საპლანეტათშორისო ხომალდში და გავემგზავრეთ ვარსკვლავთა სამყაროში.

სწრაფად გარბის დრო. მზე უკვე პაწაწინა ვარსკვლავს წააგავს, ძრავა გამორთულია, ხომალდი შორს არის სხეულებისაგან, რომლებსაც მიზიდვა შეუძლიათ.

ვნახოთ ახლა, რა ხდება ჩვენს მფრინავ ლაბორატორიაში. რატომ ჰკიდია ჰაერში და არ ეცემა იატაკზე ლურსმნიდან ჩამოვარდნილი თერმომეტრი? რა უცნაურ მდგომარეობაშია გაჩერებული კედელზე ჩამოკიდებული „ვერტიკალიდან“ გადახრილი ქანქარა? ჩვენ მყისვე ვპოულობთ ახსნას: ხომალდი ხომ დედამიწაზე არ არის, იგი პლანეტთაშორის სივრცეშია. საგნებმა წონა დაკარგეს.

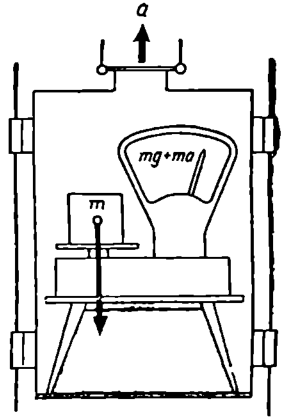
უჩვეულო სურათის ჭვრეტის შემდეგ ჩვენ კურსის შეცვლას მოვისურვებთ. თითს ღილაკზე ვაჭერთ, ვრთავთ ძრავას და უცებ... საგნები ჩვენს ირგვლივ თითქოს ცოცხლდებიან. ყველა სხეული, რომელიც მკვიდრად არ იყო დამაგრებული, ამოძრავდა. თერმომეტრი ჩამოვარდა, ქანქარამ ქანაობა დაიწყო, თანდათან დამშვიდდა და ვერტიკალური მდგომარეობა მიიღო, ბალიში მორჩილად ჩაიზნიქა ზედ დადებული ჩემოდნის ქვეშ. დავხედოთ ხელსაწყოებს და ვნახოთ, რა მიმართულებით დაიწყო ჩვენმა ხომალდმა აჩქარებული მოძრაობა. რასაკვირველია, ზევით. ხელსაწყოები გვიჩვენებენ, რომ ხომალდის შესაძლებლობებისათვის მცირე — 9,8 $м/წმ^2$ აჩქარებით აგვირჩევია მოძრაობა. ჩვენი შეგრძნებები სავსებით ჩვეულებრივია, თავს ისე ვგრძნობთ, როგორც დედამიწაზე. მაგრამ რატომ არის ასე? წინანდებურად წარმოუდგენლად შორსაა ხომალდი იმ მასებისაგან, რომლებსაც მიზიდვა შეუძლია, მიზიდულობის ძალები არ არის, სხეულებმა კი წონა შეიძინეს.

გავუშვათ ხელიდან ბურთულა და გავზომოთ რა აჩქარებით დაეცემა ის ხომალდის იატაკზე. თურმე აჩქარება 9,8 $მ/წმ^2$ ტოლია. ეს რიცხვი ხომ ეს-ეს არის ამოვიკითხეთ ხომალდის აჩქარების გამზომ ხელსაწყოებზე. ხომალდი ისეთივე აჩქარებით მოძრაობს ზევითკენ, როგორითაც სხეულები ჩვენს მფრინავ ლაბორატორიაში ქვევით ეცემიან.

მაგრამ რა არის „ზევით“ და „ქვევით“ მფრინავ ხომალდში? რა უბრალოდ იყო ყველაფერი, სანამ დედამიწაზე ვცხოვრობდით. იქ ცა იყო ზევით, დედამიწა — ქვევით. აქ კი? ჩვენს

„ზეკითს“ უდავო ნიშანი აქვს — იგი რაკეტის აჩქარების მი-მარსიულებაა.

ჩვენი დაკვირვებების აზრის გაგება არ არის ძნელი: ხელიდან გაშვებულ ბურთულაზე არავითარი ძალა არ მოქმედებს, იგი ინერციით მოძრაობს. მხოლოდ რაკეტა მოძრაობს აჩქარებით ბურთულას მიმართ და ჩვენ, რაკეტაში მყოფთ, გვეჩვენება, რომ ბურთულა „ვარდება“ რაკეტის აჩქარების საწინააღმდეგო მიმართულებით. ცხადია, ამ „ვარდნის“ აჩქარება სიდიდით რაკეტის ჭეშმარიტი აჩქარების ტოლია. ცხადია, ისიც, რომ ყველა სხეული რაკეტაში ერთნაირი აჩქარებით „ვარდება“.



ნახ. 19.

ზემოთ თქმულიდან საინტერესო დასკვნის გაკეთება შეიძლება: აჩქარებით მოძრავ რაკეტაში სხეულები „წონას“ იძენენ. ამასთან, „მიზიდულობის ძალა“ მიმართულია რაკეტის აჩქარების საწინააღმდეგო მიმართულებით, ხოლო „თავისუფალი“ ვარდნის აჩქარება სიდიდით რეაქტიული ხომალდის მოძრაობის აჩქარების ტოლია. ყველაზე უფრო შესანიშნავი კი ის არის, რომ ჩვენ პრაქტიკულად არ ძალგვიძს განვასხვავოთ სისტემის აჩქარებული მოძრაობა შესაბამის სიმძიმის ძალისგან[1]. ფანჯრებდახურულ კოსმოსურ ხომალდში, ჩვენ ვერ მივხვდებით, უძრავად იმყოფება ის დედამიწაზე თუ 9,8 მ/წმ^2 აჩქარებით მოძრაობს. აჩქარებისა და სიმძიმის ძალის მოქმედების ტოლფასობას ფიზიკაში ექვივალენტურობის პრინციპი ეწოდება.

---

[1] მხოლოდ პრაქტიკულად. პრინციპულად არის განსხვავება. დედამიწაზე სიმძიმის ძალები რადიუსების გასწვრივ დედამიწის ცენტრისკენ არის მიმართული. ეს იმას ნიშნავს, რომ აჩქარებათა მიმართულებები ორ სხვადასხვა წერტილში ერთმანეთთან კუთხეს ქმნიან. აჩქარებით მოძრავ რაკეტაში სიმძიმის მიმართულება ყველა წერტილში მკაცრად პარალელურია. დედამიწაზე აჩქარება იცვლება აგრეთვე სიმაღლის მიხედვით; აჩქარებით მოძრავ რაკეტაში ეს ეფექტი არ არის.

ეს პრინციპი, როგორც ახლა მაგალითებზე ვნახავთ, საშუალებას იძლევა მრავალი ამოცანა ამოიხსნას, თუ რეალურ ძალებს აჩქარებით მოძრავ სისტემებში არსებულ სიმძიმის ფიქტიურ ძალას დავუმატებთ.

პირველ მაგალითად შეიძლება ლიფტი გამოვიყენოთ. ავიღოთ ზამბარიანი სასწორი, საწონები და ლიფტით ზევით გავემგზავროთ. დავაკვირდეთ სასწორის ისარს, რომელზეც კილოგრამიანი საწონი დევს (ნახ. 19). ასვლა დაიწყო; ჩვენ ვხედავთ, რომ სასწორის მაჩვენებელმა დაიწია, თითქოს საწონის წონა კილოგრამზე მეტი იყოს. ექვივალენტურობის პრინციპით ადვილია ამ ფაქტის ახსნა. a აჩქარებით ლიფტის ზევით მოძრაობისას წარმოიშვება ქვევით მიმართული სიმძიმის დამატებითი ძალა. რადგანაც ამ ძალის აჩქარება a-ს ტოლია, ამიტომ დამატებითი წონა ma-ს უდრის. მაშასადმე, სასწორი გვიჩვენებს $mg+ma$ წონას. აჩქარება დამთავრდა და ლიფტი თანაბრად მოძრაობს — ზამბარა დაუბრუნდა საწყის მდგომარეობას და 1 კგ წონას გვიჩვენებს. ვუახლოვდებით ზემოთა სართულს, ლიფტის მოძრაობა ნელდება. რა მოუვა სასწორის ზამბარას? რასაკვირველია, ახლა ტვირთი ერთ კილოგრამზე ნაკლებს იწონის. ლიფტის მოძრაობის შენელებისას აჩქარების ვექტორი ქვევით იყურება. მაშასადამე, დამატებითი, ფიქტიური სიმძიმის ძალა ზევითაა მიმართული, დედამიწის მიზიდულობის საწინააღმდეგო მხარეს. ახლა a უარყოფითია და სასწორი mg-ზე ნაკლებ სიდიდეს გვიჩვენებს. ლიფტის გაჩერების შემდეგ ზამბარა საწყის მდგომარეობას უბრუნდება. დავიწყოთ დაშვება. ლიფტის მოძრაობა აჩქარდება; აჩქარების ვექტორი ქვევით არის მიმართული, მაშასადამე, დამატებითი სიმძიმის ძალა მიმართულია ზევით. ახლა ტვირთი კილოგრამზე ნაკლებს იწონის. როცა მოძრაობა თანაბარი გახდება, დამატებითი ძალა გაქრება და ლიფტით ჩვენი მოგზაურობის დამთავრების წინ — ქვევითკენ შენელებული მოძრაობისას — ტვირთი კილოგრამზე მეტს აიწონის.

ლიფტის მოძრაობის სწრაფი აჩქარებისა და შენელების დროს განცდილი უსიამოვნო შეგრძნებები წონის განხილულ ცვლილებასთან არის დაკავშირებული.

თუ ლიფტი აჩქარებით ვარდება, შიგ მყოფი სხეულები

თითქოს უფრო მსუბუქდება. რაც უფრო დიდია ეს აჩქარება, მით მეტია წონის დაკლება. სისტემის თავისუფალი ვარდნის დროს რაღა მოხდება? პასუხი ნათელია: ამ შემთხვევაში სხეულები შეწყვეტენ სადგამზე დაწოლას — აღარ ექნებათ წონა: დედამიწის მიზიდულობის ძალა გაწონასწორდება დამატებითი სიმძიმის ძალით, რომელიც მსგავს თავისუფლად ვარდნილ სისტემაში არსებობს. ასეთ „ლიფტში" ყოფნისას თავისუფლად შეგვიძლია მხრებზე ერთი ტონა ტვირთი დავიდოთ.

ამ პარაგრაფის დასაწყისში ჩვენ აღვწერეთ ცხოვრება „წონის გარეშე" საპლანეტათშორისო ხომალდში, რომელიც მიზიდულობის სფეროს ფარგლებს გარეთ გავიდა. სწორხაზოვანი და თანაბარი მოძრაობისას ასეთ ხომალდში წონა არ არის, მაგრამ იგივე მეორდება სისტემის თავისუფალი ვარდნისას. მაშასადამე, საჭირო არ არის მიზიდულობის სფეროს გარეთ გასვლა: წონა არ არსებობს არც ერთ საპლანეტათშორისო ხომალდში, რომელიც გამორთული ძრავით მოძრაობს. თავისუფალი ვარდნა ასეთ სისტემებში წონის დაკარგვას იწვევს. ექვივალენტურობის პრინციპმა იმ დასკვნამდე მიგვიყვანა, რომ თითქმის (იხ. შენიშვნა 65 გვერდზე) სავსებით ტოლფასნი არიან მიზიდულობის ძალების მოშორებით სწორხაზოვნად და თანაბრად მოძრავი ათვლის სისტემა და სიმძიმის გავლენით თავისუფლად ვარდნილი ათვლის სისტემა. პირველ სისტემაში წონა არ არის, ხოლო მეორეში „წონა ქვევითკენ" წონასწორდება „წონით ზევითკენ". სისტემებს შორის ჩვენ ვერავითარ განსხვავებას ვერ ვიპოვით.

დედამიწის ხელოვნურ თანამგზავრზე „წონის გარეშე" ცხოვრება იმ მომენტიდან იწყება, როდესაც ხომალდი ორბიტაზეა გაყვანილი და ურაკეტოდ მოძრაობს.

პლანეტათშორის პირველი მოგზაური იყო ძაღლი ლაიკა, მაგრამ მალე ადამიანიც შეეგუა „წონის გარეშე" ცხოვრებას კოსმოსური ხომალდის კაბინაში. ამ გზაზე პირველი იყო საბჭოთა მფრინავი-კოსმონავტი ი. გაგარინი.

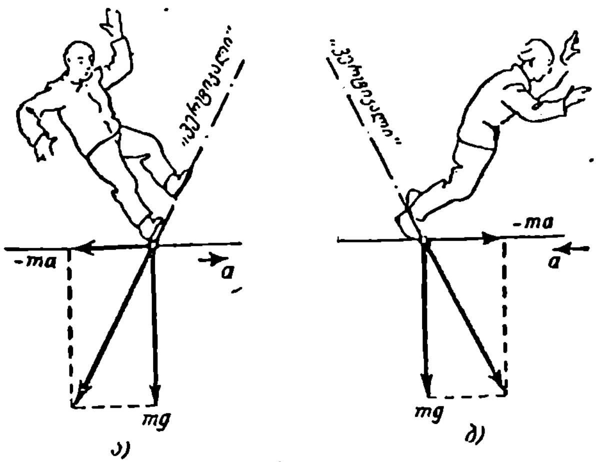
კაბინაში ცხოვრებას ჩვეულებრივ ცხოვრებას ვერ ვუწოდებთ. ბევრი გამოგონებისა და ახალი ხერხის გამოყენება გახდა საჭირო იმისათვის, რომ დაემორჩილებინათ საგნები, რომლებიც ასე ადვილად ექვემდებარებიან სიმძიმის ძალას.

შეიძლება თუ არა, მაგალითად, ჩავასხათ წყალი ბოთლიდან ჭიქაში? წყალი ხომ სიმძიმის ძალის გავლენით „ქვევით“ ისხმება. ან საჭმლის მომზადება, თუ ქურაზე წყალს ვერ გავაცხელებთ? (თბილი წყალი ცივს არ შეერევა). როგორ ვწეროთ ფანქრით ქაღალდზე, თუ ფანქრით მაგიდისთვის მიყენებული ოდნავი ბიძგიც კი საკმარისია იმისათვის, რომ გვერდზე გადავვარდეთ? ჩვენ ვერ ავანთებთ ვერც ასანთს, ვერც სანთელს და ვერც გაზის სანთურს, რადგან ნამწვი გაზები ზევით ვერ ავა (ზევით ხომ არ არსებობს!) და ჟანგბადს გზას ვერ მისცემს. აუცილებელია იმაზე ფიქრიც, რომ ადამიანის ორგანიზმში ბუნებრივი პროცესები ნორმალურად მიმდინარეობდეს, — ეს პროცესები ხომ დედამიწის მიზიდულობის ძალას „არიან მიჩვეული“.

ახლა ფიზიკური დაკვირვებები აჩქარებულად მოძრავ ავტობუსში ან ტრამვაიში ჩავატაროთ. ამ მაგალითის თავისებურება, წინა მაგალითისაგან განსხვავებით, შემდეგში მდგომარეობს. ლიფტში დამატებითი სიმძიმე და დედამიწის მიზიდულობა ერთი ხაზის გასწვრივ იყო მიმართული. ტრამვაიში, რომელიც ამუხრუჭებს ან ზრდის სიჩქარეს, დამატებითი სიმძიმის ძალა დედამიწის მიზიდულობისადმი მართ კუთხეს ქმნის. ეს იწვევს მგზავრში თავისებურ, თუმცა ნაცნობ შეგრძნებებს. თუ ტრამვაი ზრდის სიჩქარეს, მაშინ წარმოიშვება მოძრაობის მიმართულების საწინააღმდეგოდ მიმართული დამატებითი ძალა. შევკრიბოთ ეს ძალა და დედამიწის მიზიდულობის ძალა. საბოლოო ჯამში ვაგონში მყოფ ადამიანზე იმოქმედებს მოძრაობის მიმართულებისადმი ბლაგვი კუთხით მიმართული ძალა. თუ ვაგონში ჩვეულებრივად, პირით მოძრაობისკენ ვიმყოფებით, ვიგრძნობთ, რომ ჩვენი „ზემო ნაწილი“ გადაადგილდება. რომ არ წავიქცეთ, „ვერტიკალურად“ გაჩერებას მოვიწადინებთ, ისე როგორც ნაჩვენებია ნახ. 20 ა-ზე. ჩვენი „ვერტიკალი“ დახრილია. იგი მოძრაობის მიმართულებისადმი მახვილ კუთხეს ქმნის. და თუ ადამიანი ისე დადგება, რომ ხელს არაფერს მოსჭიდებს, იგი უსათუოდ უკან გადავარდება.

ბოლოს და ბოლოს, ტრამვაის მოძრაობა თანაბარი გახდა და ჩვენ შეგვიძლია მშვიდად ვიდგეთ. მაგრამ ახალი გაჩერება ახლოვდება. ვაგონს მძღოლი ამუხრუჭებს და... ჩვენი „ვერ-

ტიკალი“ იხრება. ახლა, როგორც ნახ. 20 ბ-ზე ჩანს, იგი მოძრაობისადმი ბლაგვი კუთხით არის მიმართული. იმისათვის, რომ არ წაიქცეს, მგზავრი უკან იხრება. მაგრამ ამ მდგომა-



ნახ. 20.

რეობაში იგი დიდხანს არ რჩება. ვაგონი ჩერდება, სიჩქარის შენელება ისპობა და „ვერტიკალი“ წინანდელ მდგომარეობას უბრუნდება. ისევ საჭიროა სხეულის მდგომარეობის შეცვლა. შეამოწმეთ თქვენი შეგრძნებები. ხომ მართალია, დამუხრუჭების დაწყების მომენტში გეჩვენებათ, თითქოს ზურგში გკრეს ხელი (ვერტიკალი ზურგს უკან არის). თქვენ „გასწორდით“. მაგრამ ახლა ვაგონი გაჩერდა — ვერტიკალი წინ არის და ამიტომ გგონიათ, რომ ვიღაცამ მკერდში გიბიძგათ.

მსგავსი მოვლენები მეორდება, როცა ტრამვაი უხვევს. ჩვენ ვიცით, რომ წრეხაზზე მოძრაობა, თუნდაც სიდიდით უცვლელი სიჩქარით, აჩქარებულ მოძრაობას წარმოადგენს.

აჩქარება v^2/R მით უფრო მეტი იქნება, რაც უფრო სწრაფად მოძრაობს ტრამვაი და რაც უფრო მცირეა მოხვევის R რადიუსი. ამ მოძრაობის აჩქარება რადიუსის გასწვრივ ცენტრისკენ არის მიმართული. მაგრამ ეს ექვივალენტურია ცენტრიდან მიმართული დამატებითი სიმძიმის წარმოშობისა

მაშასადამე, მოსახვევში მგზავრზე დამატებით იმოქმედებს mv^2/R ძალა, რომელიც მას მოსახვევის გარეთა მხრისაკენ გადახრის. რადიალურ mv^2/R ძალას ცენტრიდანული ეწოდება. ამავე ძალას, თუმცა განხილულს რამდენადმე სხვა თვალსაზრისით, ჩვენ უკვე ადრეც შევხვდით, 61 გვერდზე.

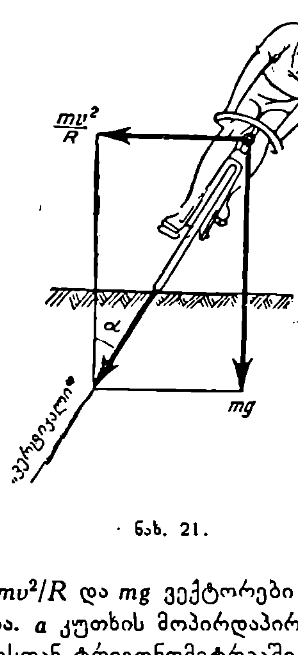
ავტობუსის ან ტრამვაის მოხვევისას ცენტრიდანული ძალა მხოლოდ უმნიშვნელო უსიამოვნებას თუ მოგვაყენებს. ამ შემთხვევაში mv^2/R ძალა არ არის დიდი. მაგრამ სწრაფი მოძრაობისას მოსახვევში ცენტრიდანულმა ძალებმა შეიძლება დიდ სიდიდეებს მიაღწიოს და სიცოცხლისათვის სახიფათოდ იქცეს.

mv^2/R სიდიდის დიდ მნიშვნელობებთან აქვთ საქმე მფრინავებს, როდესაც თვითმფრინავი ეგრეთ წოდებულ მკვდარ მარყუჟს ასრულებს. როცა თვითმფრინავი წრეხაზს აღწერს, მფრინავზე მოქმედებს ცენტრიდანული ძალა და მას სავარძელზე აჭერს. რაც უფრო მცირეა მარყუჟის წრეწირი, მით მეტია დამატებითი სიმძიმე, რომელიც მფრინავს სავარძელზე აკრავს. თუ ეს სიმძიმე დიდია, ადამიანი შეიძლება „დაიხეს" — ცოცხალი ორგანიზმის ქსოვილს ხომ განსაზღვრული სიმტკიცე აქვს, იგი ვერ უძლებს ნებისმიერ სიმძიმეს.

რამდენად შეიძლება „დამძიმდეს" ადამიანი, რომ ეს სიცოცხლისათვის არსებითად სახიფათო არ გახდეს? ეს დამოკიდებულია დატვირთვის ხანგრძლივობაზე. თუ დატვირთვა წამის ნაწილების განმავლობაში გრძელდება, მაშინ ადამიანს შეუძლია გაუძლოს რვა-ათმაგ წონას, ე. ი. 7—9 g-ს ტოლ გადატვირთვას. ათი წამის განმავლობაში მფრინავს შეუძლია აიტანოს 3—5 g-ს ტოლი გადატვირთვა. კოსმონავტებს აინტერესებთ ისეთი გადატვირთვის საკითხი, რომლის ატანაც ადამიანს ათეული წუთების, ან იქნებ საათების განმავლობაშიც კი შეუძლია. ასეთ შემთხვევებში გადატვირთვა უთუოდ გაცილებით ნაკლები უნდა იყოს. გამოვითვალოთ იმ მარყუჟების რადიუსები, რომელთაც თვითმფრინავი შემოწერს სხვადასხვა სიჩქარეებზე მფრინავისათვის საფრთხის გარეშე. ავიღოთ საშუალო ციფრი $4g$. ეს აჩქარების მნიშვნელობაა, ე. ი. $\frac{v^2}{R}=4g$ და $R=\frac{v^2}{4g}$. როდესაც სიჩქარეა 360 კმ/სთ$=$100

მ/წმ, მარყუჟის რადიუსი იქნება 250 მ; ხოლო თუ სიჩქარე 4-ჯერ გაიზრდება, ე. ი. 1440 კმ/სთ გახდება (ასეთ სიჩქარეებს კი თანამედროვე რეაქტიულმა თვითმფრინავებმა უკვე გადააჭარბეს), მარყუჟის რადიუსი 16-ჯერ უნდა გადიდდეს. მარყუჟის მინიმალური რადიუსი 4 კმ-ს უტოლდება.

უყურადღებოდ არ უნდა დავტოვოთ ტრანსპორტის უფრო უბრალო სახეობაც — ველოსიპედი. ყველას უნახავს, როგორ იხრება ველოსიპედისტი მოსახვევში. წინადადება მივცეთ ველოსიპედისტს, შემოწეროს R რადიუსის წრეხაზი v სიჩქარით, ე. ი. იმოძრაოს ცენტრისკენ მიმართული v^2/R აჩქარებით. მაშინ დედამიწის მიზიდულობის გარდა ველოსიპედისტზე იმოქმედებს წრეხაზის ცენტრიდან ჰორიზონტალის გასწვრივ მიმართული დამატებითი, ცენტრიდანული ძალა. ნახ. 21-ზე ნაჩვენებია ეს ძალები და მათი ჯამი. ცხადია, ველოსიპედისტი „ვერტიკალურად" უნდა გაიმართოს, წინააღმდეგ შემთხვევაში ის დაეცემა, მაგრამ... მისი ვერტიკალი დედამიწისას არ ემთხვევა.

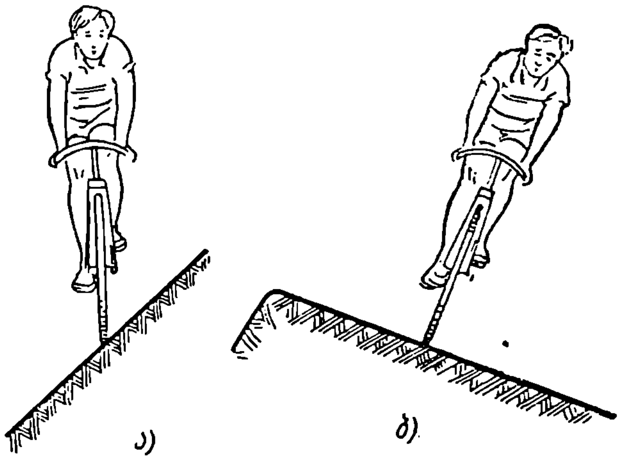


ნახ. 21.

ნახატიდან ჩანს, რომ mv^2/R და mg ვექტორები მართკუთხა სამკუთხედის კათეტებია. α კუთხის მოპირდაპირე კათეტის შეფარდებას მიმდებარესთან ტრიგონომეტრიაში α კუთხის ტანგენსი ეწოდება. ჩვენ შემთხვევაში $\operatorname{tg}\alpha=\frac{v^2}{Rg}$; მასა შეიკვეცა ექვივალენტურობის პრინციპის სრული შესატყვისობით. მაშასადამე, ველოსიპედისტის დახრის კუთხე არ არის დამოკიდებული მისი მასისაგან—მსუქანი და გამხდარი მორბენალი ერთნაირად უნდა დაიხაროს. ფორმულა და სურათზე-

გამოსახული სამკუთხედი გვიჩვენებს დახრის დამოკიდებულებას მოძრაობის სიჩქარისაგან (მატულობს მისი გაზრდისას) და წრეხაზის რადიუსისგან (მატულობს მისი შემცირებისას).

ჩვენ გამოვარკვიეთ, რომ ველოსიპედისტის ვერტიკალი არ ემთხვევა დედამიწის ვერტიკალს. მაგრამ რას იგრძნობს ამ დროს ველოსიპედისტი? საჭიროა 21 ნახაზის მობრუნება. გზას ახლა ისეთი შესახედაობა აქვს, როგორც მთის ფერდობს (ნახ. 22 ა), და ჩვენთვის ცხადია, რომ თუ სალტესა და გზის საფარს (სველი ასფალტი) შორის ხახუნის ძალა საკმარისი არ იქნა, ველოსიპედისტი შეიძლება დასხლტეს და მკვეთრი მოხვევა კიუვეტში ჩავარდნით დამთავრდეს.



ნახ. 22.

იმისათვის, რომ ეს არ მოხდეს, მკვეთრ მოსახვევებში (ან, როგორც ამბობენ, ვირაჟებში) შოსე დახრილი კეთდება, ე. ი. ველოსიპედისტისათვის ჰორიზონტალური — ისე, როგორც ნახ. 22 ბ-ზეა. ამ გზით შეიძლება ძალიან შემცირდეს ან სულაც მოისპოს დასხლეტისაკენ მიდრეკილება. სწორედ ასეა მოწყობილი მოსახვევები ველოსიპედის ტრეკებზე და ავტოსტრადებზე.

ბრუნვა

ახლა განვიხილოთ მბრუნავი სისტემები. ასეთი სისტემის მოძრაობას განსაზღვრავს ღერძის ირგვლივ სისტემის ბრუნვათა რიცხვი წამში. საჭიროა, რასაკვირველია, ვიცოდეთ აგრეთვე ბრუნვის ღერძის მიმართულებაც.

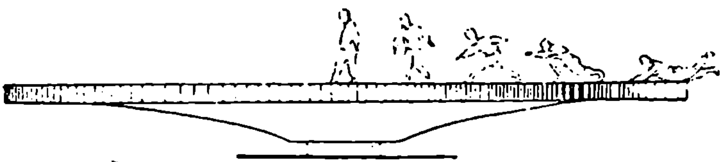
რომ უკეთესად გავიგოთ მბრუნავ სისტემებში ცხოვრების თავისებურებანი, განვიხილოთ ცნობილი ატრაქციონი — „სიცილის ბორბალი". იგი მეტად მარტივადაა მოწყობილი. გლუვი დისკო, რომლის დიამეტრი რამდენიმე მეტრია, სწრაფად ბრუნავს. მსურველებს წინადადება ეძლევათ დასხდნენ ამ დისკოზე და სცადონ ზედ თავის შემაგრება. ისინიც კი, ვინც ფიზიკა არ იცის, მალე ერკვევიან შექმნილ სიტუაციაში: საჭიროა დისკოს ცენტრში მოთავსდეთ, რადგან რაც უფრო შორს დაჯდებით ცენტრიდან, მით უფრო ძნელი იქნება დისკოზე თავის შემაგრება.

ასეთი დისკო წარმოადგენს ზოგიერთი განსაკუთრებული თვისების მქონე არაინერციულ სისტემას. დისკოზე დამაგრებული ყოველი საგანი მოძრაობს R რადიუსის მქონე წრეხაზზე v სიჩქარით, ე. ი. v^2/R აჩქარებით. როგორც უკვე ვიცით, არაინერციული დამკვირვებლის თვალსაზრისით ეს იმას ნიშნავს, რომ არსებობს ცენტრიდან რადიუსის გასწვრივ მიმართული დამატებითი mv^2/R სიმძიმე. ეს რადიალური სიმძიმის ძალა „ეშმაკის ბორბლის" ნებისმიერ წერტილში იმოქმედებს და ნებისმიერ წერტილში შექმნის რადიალურ v^2/R აჩქარებას. ერთ წრეხაზზე განლაგებული წერტილებისათვის ამ აჩქარების სიდიდე ერთნაირი იქნება. მაგრამ სხვადასხვა წრეხაზებზე? ნუ იჩქარებთ იმის თქმას, რომ v^2/R ფორმულის თანახმად აჩქარება მით უფრო გაიზრდება, რაც უფრო მცირე იქნება ცენტრიდან მანძილი. ეს არ არის სწორი; ბორბლის ცენტრიდან დაშორებული წერტილების სიჩქარე ხომ უფრო მეტია. მართლაც, თუ ბორბლის ბრუნვათა რიცხვს წამში n ასოთი აღვნიშნავთ, მაშინ მანძილი, რომელსაც ცენტრიდან R მანძილზე მყოფი ბორბლის წერტილი ერთ წამში გაივლის, ე. ი. ამ წერტილის სიჩქარე, შეიძლება ასე გამოისახოს: $2\pi Rn$.

წერტილის სიჩქარე ცენტრიდან მისი მანძილის პროპორციულია. ახლა შეიძლება აჩქარების ფორმულა გადაიწეროს:

$$a = 4\pi^2 n^2 R$$

ხოლო რადგანაც ბრუნვათა რიცხვი წამში ბორბლის ყველა წერტილისათვის ერთნაირია, ჩვენ ვღებულობთ ასეთ შედეგს: მბრუნავ ბორბალზე მოქმედი „რადიალური სიმძიმის“ ძალის აჩქარება ბორბლის ცენტრიდან წერტილის დაშორების პროპორციულად იზრდება.



ნახ. 23.

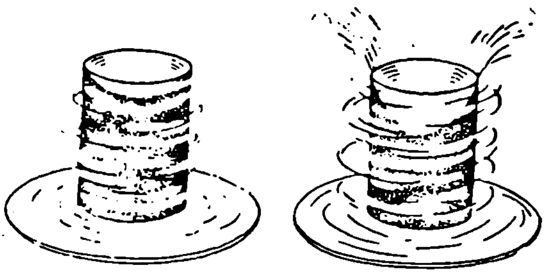
ამ საინტერესო არაინერციულ სისტემაში სიმძიმის ძალა სხვადასხვა წრეხაზზე სხვადასხვანაირია. მაშასადამე, ცენტრიდან სხვადასხვა მანძილზე მყოფი სხეულებისათვის „ვერტიკალების“ მიმართულებაც სხვადასხვა იქნება. დედამიწის მიზიდულობის ძალა, რასაკვირველია, ბორბლის ყველა წერტილში ერთნაირია. ხოლო დამატებითი რადიალური სიმძიმის დამახასიათებელი ვექტორი ცენტრიდან დაშორების მიხედვით გრძელდება. მაშასადამე, სწორკუთხედების დიაგონალები დედამიწის ვერტიკალიდან სულ უფრო მეტად იხრება.

თუ თანმიმდევრობით წარმოვიდგენთ იმ ადამიანის შეგრძნებებს, რომელიც „სიცილის ბორბლიდან“ სხლტება, და ამასთან მის თვალსაზრისზე დავდგებით, შეიძლება ვთქვათ, რომ ცენტრიდან დაშორების მიხედვით დისკო სულ უფრო და უფრო მეტად „იხრება“ და ზედ თავის შემაგრება შეუძლებელი ხდება.

მაგრამ შეიძლება თუ არა ამ არაინერციული სისტემისათვის დახრილი შოსეს მსგავსი მოწყობილობა მოვიგონოთ? რასაკვირველია, შეიძლება, მაგრამ მაშინ დისკო ისეთი ზედაპირით

უნდა შევცვალოთ, რომ მის ყოველ წერტილში სიმძიმის სრული ძალა ზედაპირის მართობი იყოს. ასეთი ზედაპირის ფორმა შეიძლება გავიანგარიშოთ. მას პარაბოლოიდი ეწოდება. ეს სახელწოდება შემთხვევითი არ არის: თავის ყოველ ვერტიკალურ კვეთაში პარაბოლოიდი იძლევა პარაბოლას — მრუდს, რომლის გასწვრივაც სხეულებივარდება. პარაბოლოიდი მიიღება პარაბოლის ბრუნვით მისი ღერძის ირგვლივ.

ასეთი ზედაპირის შექმნა ძალზე ადვილია, თუ სწრაფად ვაბრუნებთ წყლით სავსე ჭურჭელს. სწორედ მბრუნავი სითხის ზედაპირი წარმოადგენს პარაბოლოიდს. წყლის ნაწილაკების გადანაცვლება მაშინ შეწყდება, როდესაც ყოველი ნაწილაკის ზედაპირზე მიმჭერი ძალა ზადაპირის მართობი გახდება. ბრუნვის ყოველ სიჩქარეს თავისი პარაბოლოიდი შეესაბამება (ნახ. 24).



ნახ. 24.

თუ პარაბოლოიდს მყარი მასალისგან დავამზადებთ, მაშინ მისი თვისება შეიძლება თვალსაჩინოდ ვაჩვენოთ. გარკვეული სიჩქარით მბრუნავი პარაბოლოიდის ნებისმიერ წერტილში მოთავსებული პატარა ბურთულა უძრავად რჩება. ეს იმას ნიშნავს, რომ მასზე მოქმედი ძალა ზედაპირის პერპენდიკულარული იქნება. სხვანაირად რომ ვთქვათ, მბრუნავი პარაბოლოიდის ზედაპირს თითქოს ჰორიზონტალური ზედაპირის თვისებები აქვს. ასეთ ზედაპირზე ისევე შეიძლება სიარული, როგორც დედამიწაზე, და, ამასთან, თავს სავსებით მდგრადად ვიგრძნობთ. მაგრამ სიარულის დროს ვერტიკალის მიმართულება შეიცვლება.

ცენტრიდანულ მოვლენებს ტექნიკაში ფართოდ იყენებენ. ამ მოვლენებს ემყარება, მაგალითად, ცენტრიფუგის მოწყობილობა.

ცენტრიფუგი წარმოადგენს საკუთარი ღერძის ირგვლივ სწრაფად მბრუნავ დოლს. რა მოხდება, პირამდე წყლით სავსე ასეთ დოლში სხვადასხვა სხეულები რომ ჩავაგდოთ?

ჩავუშვათ წყალში ლითონის ბურთულა — იგი ფსკერისკენ წავა, მაგრამ ჩვენი ვერტიკალის გასწვრივ კი არა, თანდათან დაშორდება ბრუნვის ღერძს და კედელთან გაჩერდება. ახლა დოლში კორპის ბურთულა ჩავაგდოთ — ის კი, პირიქით, მაშინვე დაიწყებს ბრუნვის ღერძისკენ მოძრაობას და იქ გაჩერდება.

თუ ამ მოდელის ცენტრიფუგის დოლი დიდი დიამეტრისაა, ჩვენ შევამჩნევთ, რომ ცენტრიდან დაშორების მიხედვით აჩქარება მკვეთრად მატულობს.

ეს მოვლენები ჩვენთვის სავსებით გასაგებია. ცენტრიფუგის შიგნით არსებობს დამატებითი რადიალური სიმძიმე. თუ ცენტრიფუგი საკმაოდ სწრაფად ბრუნავს, მაშინ მისი „ქვევითა მხარე" დოლის კედლებია. ლითონის ბურთულა „იძირება" წყალში, ხოლო კორპისა — „ტივტივებს". რაც უფრო შორს არის წყალში „ვარდნილი" სხეული ბრუნვის ღერძიდან, მით უფრო „მძიმდება" იგი.

საკმაოდ სრულყოფილ ცენტრიფუგებში ბრუნვის სიჩქარე აღწევს 60.000 ბრუნვას წუთში, ე. ი. 10^3 ბრუნვას წამში. ბრუნვის ღერძიდან 10 სმ მანძილზე რადიალური სიმძიმის ძალის აჩქარება დაახლოებით

$$40 \cdot 10^6 \cdot 0{,}1 = 4 \cdot 10^6 \text{ მ/წმ}^2$$

ტოლი იქნება, ე. ი. დედამიწაზე თავისუფალი ვარდნის აჩქარებაზე 400.000-ჯერ მეტი.

ცხადია, ასეთი მანქანებისათვის დედამიწასთან დაკავშირებული სიმძიმე შეიძლება მხედველობაში არ მივიღოთ, ჩვენ მართლაც გვაქვს უფლება ჩავთვალოთ, რომ ცენტრიფუგის „ძირი" დოლის კედლებია.

ნათქვამიდან გასაგებია ცენტრიფუგის გამოყენების დარგები. როცა გვსურს ნარევში მძიმე ნაწილაკები მსუბუქს და-

ვაცილოთ, ყოველთვის მიზანშეწონილია ცენტრიფუგის გამოყენება. ყველასათვის ცნობილია გამოთქმა: „მღვრიე სითხე დაიწმინდა“. თუ მღვრიე წყალი საკმაოდ დიდხანს დგას, მაშინ სიმღვრიე (ჩვეულებრივ, წყალზე მძიმე) ძირში დაილექება. მაგრამ დალექვის პროცესი ხანდახან თვეობით გრძელდება, კარგი ცენტრიფუგის დახმარებით კი წყალი შეიძლება უცბად დავწმინდოთ.

წუთში ათეული ათასი ბრუნვის სიჩქარით მბრუნავ ცენტრიფუგებს შეუძლიათ ყველანაირი ნალექისაგან გაწმინდონ არა მარტო წყალი, არამედ სხვა ბლანტი სითხეებიც.

ცენტრიფუგებს იყენებენ ქიმიურ მრეწველობაში კრისტალების იმ ხსნარისაგან გამოსაცალკევებლად, რომლიდანაც ისინი გაიზარდნენ; მარილების გასაუწყლოებლად, ლაქების დასაწმენდად, კვების მრეწველობაში — ბადაგისა და შაქრის ფხვნილის გასაცალკევებლად.

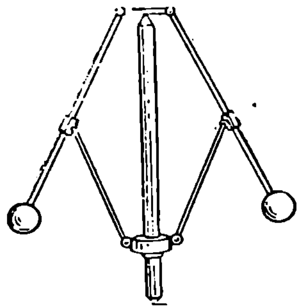
ცენტრიფუგებს, რომლებსაც სითხის დიდი რაოდენობიდან მყარი ან თხევადი ჩანართების გამოსაყოფად იყენებენ, სეპარატორებს უწოდებენ და უმთავრესად რძის დასამუშავებლად ხმარობენ. რძის სეპარატორები წუთში 2—6 ათასი ბრუნვის სიჩქარით ტრიალებს, მათი დოლის დიამეტრი 5 მ აღწევს.

მეტალურგიაში ფართოდ არის გავრცელებული ცენტრიდანული ჩამოსხმა. მაშინაც კი, როცა წუთში მხოლოდ 300—500 ბრუნვა სრულდება, მბრუნავ ყალიბში მოქცეული თხევადი ლითონი საკმაო ძალით ეკვრის ყალიბის გარეთა კედლებს. ასე ასხამენ ლითონის მილებს. ისინი უფრო მკვრივი და ერთგვაროვანია, თან არც ნიჟარები აქვს და არც ბზარები.

ცენტრიდანულ ძალას სხვა გამოყენებაც აქვს. ნახ. 25-ზე გამოსახულია მარტივი მოწყობილობა. მისი დანიშნულებაა მანქანის მბრუნავი ნაწილების ბრუნვათა რიცხვის რეგულირება. ამ მოწყობილობას ცენტრიდანული რეგულატორი ეწოდება. ბრუნვის სიჩქარის ზრდასთან ერთად იზრდება ცენტრიდანული ძალა და რეგულატორის ბურთულები შორდება ღერძს. ბურთულებთან დამაგრებული საწევები იხრება და ინჟინრის მიერ გაანგარიშებული გარკვეული გადახრისას შეიძლება რაიმე ელექტრული კონტაქტების განრთვა, ხოლო ორთქლის მანქანაში კი იმ სარქველების გახსნა, რომლებიც

ზედმეტ ორთქლს გამოუშვებენ. ამის შედეგად ბრუნვის სიჩქარე შემცირდება და საწევები ნორმალურ მდგომარეობას დაუბრუნდება.

საინტერესოა ასეთი ცდა. ელექტრული მოტორის ღერძზე ჩამოვაცვათ მუყაოს წრე. ჩავრთოთ დენი და მბრუნავ წრესთან ხის ნაჭერი მივიტანოთ. საკმაო სისქის ნაჭერი ისევე ადვილად იხერხება შუაზე, როგორც ფოლადის ხერხით.



ნახ. 25.

რასაკვირველია, სასაცილო იქნება მუყაო ხელის ხერხად ვიხმაროთ და ხის ნაჭრის გადახერხვა ვცადოთ. მაშ მბრუნავი მუყაო რატომ ჭრის ხეს? წრეხაზზე განლაგებულ მუყაოს ნაწილაკებზე უზარმაზარი ცენტრიდანული ძალა მოქმედებს. გვერდითი ძალები, რომელთაც მუყაოს სიბრტყის გამრუდება შეეძლოთ, უმნიშვნელოა ცენტრიდანულ ძალებთან შედარებით. რაკი მუყაოს წრე უცვლელად ინარჩუნებს თავის სიბრტყეს, მას საშუალება ეძლევა შეიჭრას ხეში.

დედამიწის ბრუნვის გამო წარმოშობილი ცენტრიდანული ძალა აპირობებს სხეულის წონის განსხვავებას სხვადასხვა განედებზე, რაზედაც ზემოთ იყო ლაპარაკი.

ეკვატორზე სხეული ნაკლებს იწონის, ვიდრე პოლუსზე, ორი მიზეზის გამო. დედამიწის ზედაპირზე განლაგებული სხეულები დედამიწის ღერძიდან სხვადასხვა მანძილებზე იმყოფებიან იმის მიხედვით, თუ როგორია ადგილის განედი. ცხადია, პოლუსიდან ეკვატორისაკენ გადასვლისას ეს მანძილი იზრდება. გარდა ამისა, პოლუსზე სხეული ბრუნვის ღერძზე იმყოფება და ცენტრიდანული აჩქარება $a=4\pi^2n^2R$ ნულის ტოლია (ბრუნვის ღერძიდან მანძილი $R=0$). ეკვატორზე კი, პირიქით, ეს აჩქარება მაქსიმალურია. ცენტრიდანული ძალა ამცირებს მიზიდულობის ძალას. ამიტომ ეკვატორზე სხეულის დაწოლა სადგამზე (სხეულის წონა) უმცირესია.

დედამიწას რომ ზუსტად სფეროს ფორმა ჰქონდეს, მაშინ კილოგრამიანი საწონი, პოლუსიდან ეკვატორზე გადატანის შედეგად 3,5 გრამით ნაკლები იქნებოდა. ამ მნიშვნელობას თქვენ ადვილად იპოვით ფორმულიდან

$$4\pi^2 n^2 Rm,$$

რომელშიც უნდა ჩავსვათ $n=1$ ბრუნვას დღე-ღამეში, $R=6.300$ კმ და $m=1000$ გ. მხოლოდ ნუ დაგავიწყდებათ საზომი ერთეულების წამებზე და სანტიმეტრებზე დაყვანა.

მაგრამ სინამდვილეში კილოგრამიანი საწონი კარგავს წონაში არა 3,5, არამედ 5,3 გრამს. ეს იმიტომ, რომ დედამიწა შეჰყლეტილ სფეროს წარმოადგენს, რომელსაც გეომეტრიაში ელიფსოიდი ეწოდება. მანძილი პოლუსიდან დედამიწის ცენტრამდე ეკვატორზე გამავალ რადიუსზე ნაკლებია დაახლოებით მისი 1/300 ნაწილით.

დედამიწის სფეროს ამ შეჰყლეტილობის მიზეზიც იგივე ცენტრიდანული ძალაა. იგი ხომ ჩვენი პლანეტის ყველა ნაწილაკზე მოქმედებს. შორეულ წარსულში ცენტრიდანულმა ძალამ იმოქმედა დედამიწის „ფორმირებაზე" და მას შეჰყლეტილი ფორმა მისცა.

კორიოლისის ძალა

მბრუნავ სისტემათა სამყაროს თავისებურება რადიალური სიმძიმის ძალების არსებობით არ ამოიწურება. გავეცნოთ კიდევ ერთ საინტერესო ეფექტს, რომლის თეორიაც 1835 წელს მოგვცა ფრანგმა მეცნიერმა კორიოლისმა.

დავსვათ ჩვენს წინაშე ასეთი საკითხი: როგორი სახე აქვს სწორხაზოვან მოძრაობას მბრუნავი ლაბორატორიის თვალსაზრისით? ასეთი ლაბორატორიის გეგმა გამოსახულია ნახ. 26-ზე. ცენტრზე გამავალი ხაზი გვიჩვენებს რაღაც სხეულის სწორხაზოვან ტრაექტორიას. ჩვენ ისეთ შემთხვევას ვიხილავთ, როდესაც სხეულის გზა ჩვენი მბრუნავი ლაბორატორიის ცენტრზე გადის. დისკო, რომელზეც მოთავსებულია ლაბორატორია, თანაბრად ბრუნავს; ნახატზე ნაჩვენებია ლაბორატო-

რის ხუთი მდებარეობა სწორხაზოვანი ტრაექტორიის მიმართ. ასეთი სახე აქვს ლაბორატორიისა და სხეულის ტრაექტორიის ურთიერთმდებარეობას ერთი, ორი, სამი და ა. შ. წამის შემდეგ. ლაბორატორია, თუ მას ზემოდან დავხედავთ, საათის ისრის საწინააღმდეგოდ მოძრაობს.

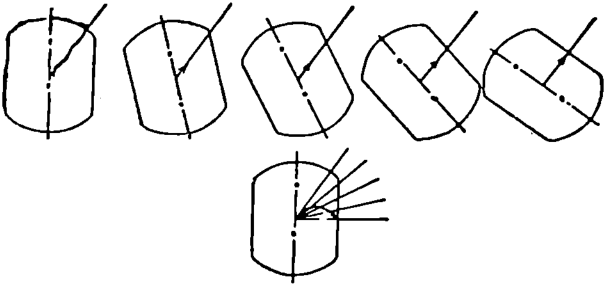
გზის წირზე დატანილი ისრები, იმ მონაკვეთების შესაბამისია, რომლებსაც სხეული გადის ერთ, ორ, სამ და ა. შ. წამში. ყოველ წამში სხეული ერთნაირ გზას გადის, რადგახაც აქ ლაპარაკია თანაბარ და სწორხაზოვან მოძრაობაზე (უძრავი დამკვირვებლის თვალსაზრისით).

წარმოიდგინეთ, რომ მოძრავი სხეული დისკოზე მგორავი ახლად შეღებილი ბურთულაა. როგორი კვალი დარჩება დისკოზე? ამ კითხვაზე ჩვენი აგება გვაძლევს პასუხს. ისრის დაბოლოებით აღნიშნული წერტილები ხუთი ნახატიდან ერთ ნახაზზეა გადატანილი. ახლა ეს წერტილები მდოვრე მრუდით შევაერთოთ. აგების შედეგი ჩვენ არ გაგვაკვირვებს: სწორხაზოვანი და თანაბარი მოძრაობა მბრუნავი დამკვირვებლის თვალსაზრისით მრუდხაზოვანი სახისაა. ყურადღებას იქცევს ასეთი წესი: მოძრავი სხეული მთელი გზის მანძილზე მოძრაობის მიმართულებისაგან მარჯვნივ იხრება. წარმოვიდგინოთ, რომ დისკო საათის ისრის მიმართულებით ბრუნავს, და აგების გამეორება მკითხველს მივანდოთ. იგი გვიჩვენებს, რომ ამ შემთხვევაში მბრუნავი დამკვირვებლის თვალსაზრისით მოძრავი სხეული მოძრაობის მიმართულებისაგან მარცხნივ გადაიხრება.

ჩვენ ვიცით, რომ მბრუნავ სისტემებში წარმოიშვება ცენტრიდანული ძალა. მაგრამ მისი მოქმედება არ შეიძლება გზის გამრუდების მიზეზი იყოს, იგი ხომ რადიუსის გასწვრივ არის მიმართული. მაშასადამე, მბრუნავ სისტემებში ცენტრიდანული ძალის გარდა წარმოიშვება კიდევ დამატებითი ძალა. მას კორიოლისის ძალას უწოდებენ.

წინა მაგალითებში რატომ არ ვხვდებოდით კორიოლისის ძალას და მშვენივრად ვჯერდებოდით მარტოოდენ ცენტრიდანულს? მიზეზი ის გახლავთ, რომ აქამდე ჩვენ არ ვიხილავდით სხეულების მოძრაობას მბრუნავი დამკვირვებლის თვალსაზრისით, ხოლო კორიოლისის ძალა მხოლოდ ამ შემთხვე-

ვაში წარმოიშვება. მბრუნავ სისტემაში უძრავ სხეულებზე მხოლოდ ცენტრიდანული ძალა მოქმედებს. მბრუნავი ლაბორატორიის მაგიდა იატაკზეა მიხრახნილი და მასზე მხოლოდ ცენტრიდანული ძალა მოქმედებს, ხოლო ბურთი, რომელიც მაგიდიდან ჩამოვარდა და მბრუნავი ლაბორატორიის იატაკზე გაგორდა, ცენტრიდანული ძალის გარდა კორიოლისის ძალის გავლენასაც განიცდის.



ნახ. 26.

რა სიდიდეებზეა დამოკიდებული კორიოლისის ძალის მნიშვნელობა? იგი შეიძლება გამოვითვალოთ, მაგრამ ეს გამოთვლები მეტისმეტად რთულია იმისათვის, რომ ისინი აქ მოვიყვანოთ. ამიტომ მხოლოდ გამოთვლების შედეგებს აღვწერთ.

ცენტრიდანული ძალისაგან განსხვავებით, რომლის მნიშვნელობაც ბრუნვის ღერძიდან მანძილზეა დამოკიდებული, კორიოლისის ძალა არ არის დამოკიდებული სხეულის მდებარეობისაგან. მისი სიდიდე განისაზღვრება სხეულის მოძრაობის სიჩქარით და, ამასთან, არა მარტო სიჩქარის სიდიდით, არამედ მისი მიმართულებითაც ბრუნვის ღერძის მიმართ. თუ სხეული ბრუნვის ღერძის გასწვრივ მოძრაობს, მაშინ კორიოლისის ძალა ნულის ტოლია. რაც უფრო დიდია კუთხე სიჩქარის ვექტორსა და ბრუნვის ღერძს შორის, მით მეტია კორიოლისის ძალა; მაქსიმალურ მნიშვნელობას ძალა ღებულობს სხეულის მოძრაობისას ღერძის მიმართ სწორი კუთხით.

როგორც ვიცით, სიჩქარის ვექტორი ყოველთვის შეიძლება დავშალოთ რაიმე მდგენელებად და ცალ-ცალკე განვიხილოთ მიღებული ორი მოძრაობა, რომლებშიც სხეული ერთდროულად მონაწილეობს.

თუ სხეულის სიჩქარეს დავშლით $v_{\parallel}$ და $v_{\perp}$ — ბრუნვის ღერძისადმი პარალელურ და პერპენდიკულარულ მდგენელებად, მაშინ პირველი მოძრაობა არ განიცდის კორიოლისის ძალის მოქმედებას. კორიოლისის F_k ძალის მნიშვნელობა განისაზღვრება სიჩქარის $v_{\perp}$ მდგენელით. გამოთვლები გვაძლევს ფორმულას

$$F_k = 4\pi n v_{\perp} m.$$

აქ m არის სხეულის მასა, ხოლო n — მბრუნავი სისტემის ბრუნვათა რიცხვი დროის ერთეულში. როგორც ფორმულიდან ჩანს, კორიოლისის ძალა მით უფრო მეტია, რაც უფრო სწრაფად ბრუნავს სისტემა და რაც უფრო სწრაფად მოძრაობს სხეული.

გამოთვლებით მიიღება აგრეთვე კორიოლისის ძალის მიმართულებაც. ეს ძალა ყოველთვის მართობია ბრუნვის ღერძისა და მოძრაობის მიმართულებისადმი. ამასთან, როგორც ზემოთ უკვე ვთქვით, ძალა მიმართულია მოძრაობის მიმართულებისგან მარჯვნივ საათის ისრის საწინააღმდეგოდ მბრუნავ სისტემაში.

კორიოლისის ძალის მოქმედებით აიხსნება ბევრი საინტერესო მოვლენა დედამიწაზე. დედამიწა სფეროა და არა დისკო. ამიტომაც კორიოლისის ძალების გამოვლინება აქ უფრო რთულია. ეს ძალები იჩენენ თავს როგორც დედამიწის ზედაპირის გასწვრივ მოძრაობისას, ისე სხეულების დედამიწაზე ვარდნის დროსაც.

ვარდება თუ არა სხეული ზუსტად ვერტიკალის გასწვრივ? მთლად ზუსტად არა. ზუსტად ვერტიკალის გასწვრივ სხეული მხოლოდ პოლუსზე ვარდება. მოძრაობის მიმართულება და დედამიწის ბრუნვის ღერძი ერთმანეთს ემთხვევა. ამიტომ კორიოლისის ძალა არ წარმოიშვება. სხვაგვარად არის საქმე ეკვატორზე; აქ მოძრაობის მიმართულება დედამიწის ღერძთან სწორ კუთხეს ადგენს. თუ ჩრდილოეთი პოლუსის მხრიდან შევხედავთ, მაშინ დედამიწის მოძრაობა საათის ისრის

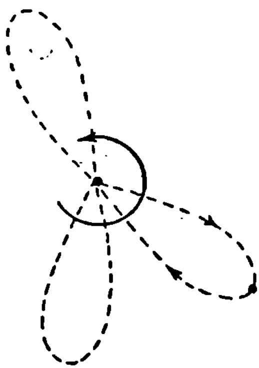
საწინააღმდეგოდ წარმოგვიდგება. მაშასადამე, თავისუფლად ვარდნილი სხეული მოძრაობის მიმართულებისაგან მარჯვნივ, ე. ი. აღმოსავლეთისაკენ უნდა გადაიხაროს. აღმოსავლეთისკენ გადახრის სიდიდე უდიდესია ეკვატორზე, პოლუსებთან მიახლოებისას კი იგი ნულამდე მცირდება.

გამოვითვალოთ გადახრის სიდიდე ეკვატორზე. რადგანაც თავისუფლად ვარდნილი სხეული თანაბრად აჩქარებულად მოძრაობს, ამიტომ კორიოლისის ძალა დედამიწასთან მიახლოებისას მატულობს. შემოვისაზღვროთ მიახლოებითი გამოთვლით. დავუშვათ, სხეული 80 მ სიმაღლიდან ვარდება, მაშინ ვარდნა დაახლოებით 4 წამს გაგრძელდება $\left(t=\sqrt{\frac{2h}{g}}\right.$ ფორმულის მიხედვით$\left.\right)$. ვარდნის საშუალო სიჩქარე 20 მ/წმ იქნება.

სიჩქარის სწორედ ეს მნიშვნელობა ჩავსვათ კორიოლისის აჩქარების $4\pi nv$ ფორმულაში. მნიშვნელობა $n=1$ ბრუნვას 24 საათში გადავიყვანოთ წამში ბრუნვების რიცხვში. 24 საათი 24.3600 წამს შეიცავს, მაშასადამე, n ტოლია 1/86400 ბრ/წმ და კორიოლისის ძალით წარმოშობილი აჩქარება ტოლია $\frac{\pi}{1080}$ მ/წმ^2. ასეთი აჩქარებით 4 წამის განმავლობაში განვლილი გზა $\frac{1}{2}\cdot\frac{\pi}{1080}\cdot 4^2=2{,}3$ სმ ტოლია. სწორედ ეს არის აღმოსავლეთით გადახრის სიდიდე ჩვენი მაგალითისათვის. ზუსტი გამოანგარიშება, რომელიც არათანაბარ ვარდნას ითვალისწინებს, იძლევა რამდენადმე განსხვავებულ მნიშვნელობას — 3,1 სმ.

თუ სხეულის გადახრა თავისუფალი ვარდნისას მაქსიმალურია ეკვატორზე და ნულის ტოლია პოლუსებზე, შებრუნებული სურათი გვექნება კორიოლისის ძალის გავლენით გადახრისათვის იმ შემთხვევაში, როდესაც სხეული ჰორიზონტალურ სიბრტყეში მოძრაობს.

ჰორიზონტალური მოედანი ჩრდილო ან სამხრეთ პოლუს-ზე არაფრით არ განსხვავდება მბრუნავი დისკოსაგან, რომლის განხილვითაც დავიწყეთ კორიოლისის ძალის შესწავლა. ჩრდილო პოლუსზე ასეთ მოედანზე მოძრავი სხეული კო-რიოლისის ძალის გავლენით მოძრაობის მიმართულებიდან მარჯვნივ გადაიხრება, სამხრეთ პოლუსზე კი — მარცხნივ. თუკი კორიოლისის აჩქარების იგივე ფორმულას გამოვიყე-ნებთ, ადვილად გამოვითვლით, რომ თოფიდან 500 მ/წმ სა-წყისი სიჩქარით გასროლილი ტყვია ჰორიზონტალურ სი-ბრტყეში ერთი წამის განმავლობაში (ე. ი. 500 მ სიგრძის გზაზე) მიზნიდან 3,5 სმ ტოლი მონაკვეთით გადაიხრება.



ნახ. 27.

მაგრამ რატომ არის ეკვატორზე ჰორიზონტალურ სიბრტყეში გადახრა ნულის ტოლი? მკაცრი დამტკიცების გარეშე გასაგებია, რომ სხვანაირად არ შეიძლება იყოს. ჩრდილოეთ პოლუსზე სხეული მოძრაობის მიმართულებიდან მარჯვნივ იხრება, სამხრეთისაზე—მარ-ცხნივ, მაშასადამე, პოლუსებს შორის, შუაზე, ე. ი. ეკვატორზე, გადახრა ნუ-ლის ტოლი იქნება.

მოვიგონოთ ფუკოს საქანზე ჩატა-რებული ცდა. საქანი, რომელიც პო-ლუსზე ირხევა, უცვლელად ინარჩუნებს თავისი რხევების სიბრტყეს. დედამიწა ბრუნვისას საქანის ქვეშ გადაინაცვ-ლებს. ასე ხსნის ფუკოს ცდას ვარსკვლავიერი დამკვირვებე-ლი. ხოლო დამკვირვებელი, რომელიც დედამიწასთან ერთად ბრუნავს, ამ ცდას კორიოლისის ძალით ახსნის. მართლაც, კო-რიოლისის ძალა მართობულადაა მიმართული დედამიწის ღერ-ძისა და საქანის მოძრაობის მიმართულებისადმი; სხვანაირად რომ ვთქვათ, ძალა მართობია ქანქარას რხევის სიბრტყისა და განუწყვეტლივ აბრუნებს ამ სიბრტყეს. შეიძლება ისე მოე-წყოს, რომ საქანის ბოლომ მოძრაობის ტრაექტორია გამოხა-ზოს, ტრაექტორია წარმოადგენს 27-ე ნახაზზე ნაჩვენებ „ვარ-დულას". ამ ნახატზე ქანქარას რხევის ერთნახევარი პერიო-

დის განმავლობაში „დედამიწა“ ერთი სრული ბრუნვის მეოთხედით მობრუნდება, ფუკოს საქანი კი—ბევრად უფრო ნელა. პოლუსზე საქანის რხევის სიბრტყე ერთ წუთში გრადუსის 1/4 მობრუნდება. ჩრდილოეთ პოლუსზე საქანი თავისი მოძრაობის მიმართულებიდან მარჯვნივ მობრუნდება, სამხრეთისაზე—მარცხნივ.

ცენტრალური ევროპის განედებზე კორიოლისის ეფექტი რამდენადმე ნაკლები იქნება, ვიდრე ეკვატორზე. ზემოთ მოყვანილ მაგალითში ტყვია 3,5 სმ კი არა, 2,5 სმ გადაიხრება. ფუკოს საქანი ერთ წუთში დაახლოებით გრადუსის 1/6 ნაწილით მობრუნდება.

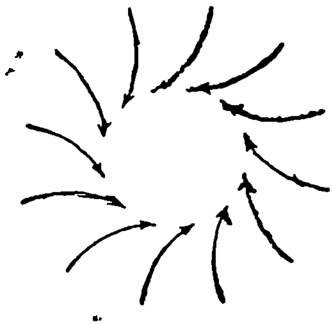
უნდა გაითვალისწინონ თუ არა კორიოლისის ძალა არტილერისტებმა? ქვემეხი ბერტა, რომლითაც გერმანელები პირველი მსოფლიო ომის დროს პარიზს ყუმბარებს უშენდნენ, მიზნიდან 110 კმ მანძილზე იმყოფებოდა. კორიოლისის გადახრა ამ შემთხვევაში 1600 მ აღწევს. ეს უკვე მცირე სიდიდე აღარ არის.

თუ მფრინავი ყუმბარა კორიოლისის ძალის გაუთვალისწინებლად გაიგზავნება დიდ მანძილზე, იგი მნიშვნელოვნად გადაიხრება კურსიდან. ეს ეფექტი დიდია არა იმიტომ, რომ ძალაა დიდი (ყუმბარისათვის, რომლის წონაა 10 ტ, ხოლო სიჩქარე 1000 კმ/სთ, კორიოლისის ძალა დაახლოებით 25 კგ-ძ ტოლი იქნება), არამედ იმიტომ, რომ ძალა განუწყვეტლივ მოქმედებს ხანგრძლივი დროის განმავლობაში.

რასაკვირველია, არანაკლებ მნიშვნელოვანია ქარის გავლენა არამართულ ყუმბარაზე. თვითმფრინავის კურსის შესწორება, რომელსაც პილოტი ასრულებს, გაპირობებულია ქარის მოქმედებით, კორიოლისის ეფექტითა და თვითმფრინავის ან თვითმფრინავი ყუმბარის არასრულყოფილობით.

ავიატორებსა და არტილერისტებს გარდა, კიდევ რომელმა სპეციალისტებმა უნდა მიიღონ მხედველობაში კორიოლისის ეფექტი? მათ რიცხვს, თუმცა ეს საკვირველი ჩანს, რკინიგზელებიც მიეკუთვნებიან. რკინიგზაზე კორიოლისის ძალის გავლენით ერთი რელსი შიგნიდან მეორეზე უფრო ძლიერ ცვდება. ჩვენთვის ცხადია, სახელდობრ, რომელი: ჩრდი-

ლოეთ ნახევარსფეროში ეს იქნება მარჯვენა რელსი (მოძრაობის მიმართულების მიხედვით), ხოლო სამხრეთ ნახევარსფეროში — მარცხენა. საზრუნავი არა აქვთ ამ მხრივ მხოლოდ ეკვატორიალური ქვეყნების რკინიგზელებს.



ნახ. 28.

ნახ. 29.

ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში მარჯვენა ნაპირების ჩამორეცხვასაც ისეთივე ახსნა აქვს, როგორც რელსების გაცვეთას. კალაპოტის გადახრაც ბევრად არის დაკავშირებული კორიოლისის ძალის მოქმედებასთან. თურმე ჩრდილოეთ ნახევარსფეროს მდინარეები დაბრკოლებებს მარჯვენა მხრიდან უვლიან.

ცნობილია, რომ ჰაერის ნაკადები დაკლებული წნევის რაიონისაკენ მიემართება. მაგრამ რატომ ეწოდება ასეთ ქარს ციკლონი? ამ სიტყვების ძირი ხომ წრიულ (ციკლურ) მოძრაობაზე მიგვითითებს.

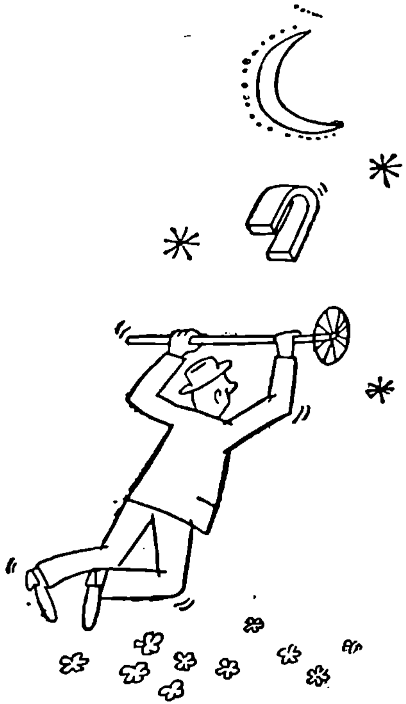
ეს ასეც არის — დაკლებული წნევის რაიონში წარმოიშვება ჰაერის მასების წრიული მოძრაობა (ნახ. 28). ამის მიზეზს კორიოლისის ძალა წარმოადგენს. ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში ჰაერის ყველა ნაკადი, რომელიც დაკლებული წნევის ადგილისაკენ მიემართება, თავისი მოძრაობის მიმართულებიდან მარჯვნივ იხრება. დახედეთ ნახ. 29-ს და დაინახავთ, რომ ეს იწვევს ორივე ნახევარსფეროში ტროპიკებიდან ეკვა-

ტორისაკენ მქროლავი ქარების (პასატების) დასავლეთისაკენ გადახრას.

რატომ თამაშობს ასეთი მცირე ძალა ესოდენ დიდ როლს ჰაერის მასების მოძრაობაში?

იმიტომ, რომ ხახუნის ძალებია უმნიშვნელო. ჰაერი ადვილად მოძრავია, და მცირე, მაგრამ მუდმივად მოქმედი ძალა მნიშვნელოვან შედეგს იძლევა.

IV. მუდმივობის (შენახვის) კანონები

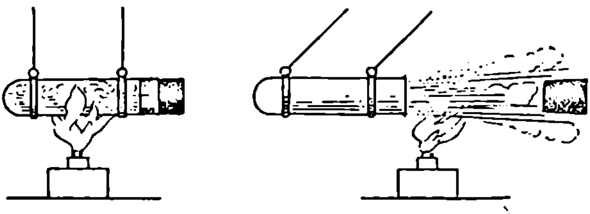


უკუცემა

ვინც ომში არ ყოფილა, იმანაც კი იცის, რომ გასროლისას ქვემეხი მკვეთრად გორდება უკან. თოფიდან სროლისას მხარში ვგრძნობთ უკუცემას. მაგრამ უკუცემის მოვლენის შესწავლა სასროლი იარაღების გარეშეც შეიძლება. ჩაასხით სინჯარაში წყალი, საცობი დაუცეთ და ჩამოჰკიდეთ ორი ძაფით ჰორიზონტალურ მდგომარეობაში (ნახ. 30). ახლა მიიტანეთ მინასთან სანთურა — წყალი დუღილს დაიწყებს და ორიოდე წუთის შემდეგ საცობი ხმაურით გამოვარდება ერთ მხარეს, სინჯარა კი საწინააღმდეგო მხარეს გადაიხრება.

სინჯარიდან საცობის ამომგდები ძალა ორთქლის წნევაა. ორთქლის წნევაა ის ძალაც, რომელმაც სინჯარა გადახარა. ორივე მოძრაობა ერთი და იმავე ძალის გავლენით წარმოიშვა. იგივეა გასროლის დროსაც, მხოლოდ იქ ორთქლის ნაცვლად დენთის გაზები მოქმედებს.

უკუცემის მოვლენა უეჭველია ქმედებისა და უკუქმედების კანონიდან გამომდინარეობს. თუ ორთქლი საცობზე მოქ-



ნახ. 30.

მედებს, საცობიც მოქმედებს ორთქლზე საწინააღმდეგო მიმართულებით და ორთქლი ამ უკუქმედებას სინჯარას გადასცემს.

მაგრამ იქნებ თქვენ ეჭვი დაგებადოთ: განა შეუძლია ერთსა და იმავე ძალას ესოდენ განსხვავებული შედეგის მოცემა? თოფი მხოლოდ ოდნავ მიდის უკან, ტყვია კი შორსა სცემს. ჩვენ ვიმედოვნებთ, რომ ასეთი ეჭვი არ დაებადება მკითხველს. რასაკვირველია, ერთნაირ ძალებს შეუძლია სხვადასხვა შედეგის გამოწვევა: სხეულისთვის მინიჭებული აჩქარება (ძალის მოქმედების შედეგიც სწორედ ეს არის) ხომ ამ სხეულის მასის უკუპროპორციულია. ერთ-ერთი სხეულის აჩქარება (ჭურვის, ტყვიის, საცობის) ჩვენ ასეთი სახით უნდა დავწეროთ $a_1 = \frac{F}{m_1}$, ხოლო აჩქარება სხეულისა (ქვემეხის, შაშხანის, სინჯარის), რომელმაც უკუცემა განიცადა, იქნება $a_2=\frac{F}{m_2}$.

რადგანაც ძალა ერთი და იგივეა, ჩვენ მნიშვნელოვან დასკვნამდე მივდივართ: „გასროლაში" მონაწილე ორი სხეულის

ურთიერთქმედების შედეგად მიღებული აჩქარებები მათი მასების უკუპროპორციულია.

$$\frac{a_1}{a_2}=\frac{m_2}{m_1}.$$

ეს იმას ნიშნავს, რომ აჩქარება, რომელსაც ქვემეხი მიიღებს უკან დაგორებისას, იმდენჯერ ნაკლები იქნება ჭურვის აჩქარებაზე, რამდენჯერაც ქვემეხის წონა მეტია ჭურვის წონაზე.

ტყვიის აჩქარება და თოფის აჩქარებაც უკუცემისას მანამდე გრძელდება, ვიდრე ტყვია თოფის ლულაში მოძრაობს. ეს დრო t ასოთი აღვნიშნოთ. დროის ამ შუალედის შემდეგ აჩქარებული მოძრაობა თანაბარით შეიცვლება. სიმარტივისათვის აჩქარება მუდმივად ჩავთვალოთ. მაშინ სიჩქარე, რომლითაც ტყვია თოფის ლულიდან გამოვარდება, იქნება $v_1=a_1t$. ხოლო უკუცემის სიჩქარე — $v_2=a_2t$. რადგანაც აჩქარების მოქმედების დრო ერთი და იგივეა, ამიტომ $\frac{v_1}{v_2}=\frac{a_1}{a_2}$ და, მაშასადამე,

$$\frac{v_1}{v_2}=\frac{m_2}{m_1}.$$

ურთიერთქმედების შემდეგ სხეულები ერთმანეთს შორდებიან ამ სხეულების მასების უკუპროპორციული სიჩქარეებით.

თუ მოვიგონებთ სიჩქარის ვექტორულ ხასიათს, მაშინ უკანასკნელი თანაფარდობა ასე შეიძლება გადავწეროთ: $m_1\vec{v_1}=-m_2\vec{v_2}$; ნიშანი მინუსი აღნიშნავს, რომ $\vec{v_1}$ და $\vec{v_2}$ სიჩქარეები ურთიერთსაწინააღმდეგოდ არის მიმართული.

ბოლოს, ერთხელ კიდევ გადავწეროთ ტოლობა — მასების სიჩქარეებზე ნამრავლები ტოლობის ერთ მხარეს გადავიტანოთ:

$$m_1\vec{v_1}+m_2\vec{v_2}=0.$$

იმპულსის მუდმივობის კანონი

სხეულის მასის ნამრავლს მის სიჩქარეზე სხეულის იმპულსი ეწოდება (სხვა სახელწოდებაა — მოძრაობის რაოდენობა). რადგანაც სიჩქარე ვექტორია, ამიტომ იმპულსიც ვექტორულ სიდიდეს წარმოადგენს. რასაკვირველია, იმპულსის მიმართულება სხეულის სიჩქარის მიმართულებას თანხვდება.

ახალი ცნების დახმარებით ნიუტონის კანონი $F=ma$ შეიძლება სხვანაირად გამოისახოს, რადგანაც $a=\frac{v_2-v_1}{t}$, ამიტომ $F=\frac{mv_2-mv_1}{t}$ ან $Ft=mv_2-mv_1$. ძალის ნამრავლი მისი მოქმედების დროზე სხეულის იმპულსის ცვლილების ტოლია.

დავუბრუნდეთ უკუცემის მოვლენას.

ქვემეხის უკუცემის განხილვის შედეგი ახლა უფრო მოკლედ შეიძლება ჩამოვაყალიბოთ: ქვემეხისა და ჭურვის იმპულსების ჯამი ნულის ტოლი რჩება. ცხადია, ასეთივე მნიშვნელობა ჰქონდა მას გასროლამდეც, როდესაც ქვემეხი და ჭურვი უძრაობის მდგომარეობაში იყვნენ.

$m_1\vec{v}_1+m_2\vec{v}_2=0$ განტოლებაში შემავალი სიჩქარეები — ეს არის სიჩქარეები უშუალოდ გასროლის შემდეგ. ჭურვისა და ქვემეხის შემდგომი მოძრაობის პროცესში მათზე იმოქმედებს სიმძიმის ძალები, ჰაერის წინააღმდეგობა, ხოლო ქვემეხზე — დამატებით კიდევ დედამიწაზე ხახუნის ძალაც. ჩვენ რომ უჰაერო სივრცეში გავისროლოთ სიცარიელეში დაკიდული ქვემეხიდან, მაშინ მოძრაობა $\vec{v}_1$ და $\vec{v}_2$ სიჩქარეებით ნებისმიერად დიდხანს გაგრძელდება. ქვემეხი ერთ მხარეს იმოძრავებს, ჭურვი კი — საწინააღმდეგო მხარეს.

საარტილერიო პრაქტიკაში ამჟამად ფართოდ იყენებენ პლატფორმაზე დაყენებულ ქვემეხებს, რომლებიც სვლის დროს ისვრიან. როგორ შევცვალოთ გამოყვანილი განტოლება, რომ იგი ასეთი ქვემეხიდან გასროლისათვისაც გამოგვადგეს? ჩვენ შეგვიძლია დავწეროთ:

$$m_1\vec{u}_1+m_2\vec{u}_2=0,$$

სადაც $\vec{u}_1$ და $\vec{u}_2$ — ჭურვისა და ქვემეხის სიჩქარეებია მოძრავი პლატფორმის მიმართ. თუ პლატფორმის სიჩქარეა V, მაშინ ქვემეხისა და ჭურვის სიჩქარეები უძრავი დამკვირვებლის მიმართ $\vec{v}_1 = \vec{u}_1 + \vec{V}$ და $\vec{v}_2 = \vec{u}_2 + \vec{V}$ იქნება.

თუ $\vec{u}_1$ და $\vec{u}_2$ სიჩქარეების მნიშვნელობებს უკანასკნელ განტოლებაში ჩავსვამთ, მივიღებთ:

$$(m_1 + m_2)\vec{V} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2.$$

ტოლობის მარჯვენა მხარეზე დგას ჭურვისა და ქვემეხის იმპულსების ჯამი გასროლის შემდეგ. ხოლო მარცხენაზე? გასროლამდე ქვემეხი და ჭურვი $m_1 + m_2$ საერთო მასით ერთად $\vec{V}$ სიჩქარით მოძრაობენ. მაშასადამე, ტოლობის მარცხენა მხარეზე დგას ჭურვისა და ქვემეხის საერთო იმპულსი, მხოლოდ გასროლამდე.

ჩვენ დავამტკიცეთ ბუნების მეტად მნიშვნელოვანი კანონი, რომელსაც იმპულსის მუდმივობის (შენახვის) კანონი ეწოდება. თანაც იგი ორი სხეულისათვის დავამტკიცეთ, მაგრამ ადვილია იმის ჩვენებაც, რომ ასეთივე შედეგს მივიღებთ სხეულების ნებისმიერი რიცხვისათვის. მაშ, როგორია კანონის შინაარსი? იმპულსის მუდმივობის კანონში ნათქვამია, რომ რამდენიმე ურთიერთმოქმედი სხეულის იმპულსების ჯამი ამ ურთიერთქმედების შედეგად არ იცვლება.

ცხადია, იმპულსის მუდმივობის კანონი სამართლიანი იქნება მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როდესაც განსახილველი სხეულების ჯგუფზე გარეგანი ძალები არ მოქმედებს. სხეულთა ასეთ ჯგუფს ფიზიკაში ჩაკეტილი (ანუ იზოლირებული) ეწოდება.

მიუხედავად იმისა, რომ დედამიწის მიზიდულობის ძალის გავლენას განიცდიან, თოფი და ტყვია გასროლის დროს ისე მოქმედებენ, როგორც ორი სხეულისაგან შემდგარი ჩაკეტილი სისტემა. ტყვიის წონა დენთის გაზების ძალასთან შედარებით ნაკლებია და უკუცემის მოვლენა ერთნაირი კანონებით განხორციელდება, დამოუკიდებლად იმისგან, სად გავისვრით — დედამიწაზე თუ პლანეტათშორის სივრცეში მიმქროლავ რაკეტაში.

იმპულსის მუდმივობის კანონი საშუალებას გვაძლევს ადვილად ამოვხსნათ სხვადასხვაგვარი ამოცანები, რომლებიც სხეულთა დაჯახებას ეხება. შევეცადოთ ერთი თიხის ბურთულა მეორეს მოვახვედროთ — ისინი შეეწებებიან ერთმანეთს და ერთად განაგრძობენ მოძრაობას. თუ ხის ბურთულას ვესვრით თოფს, ბურთულა შიგ ჩარჩენილ ტყვიასთან ერთად გაგორდება; გაჩერებული ვაგონეტი ადგილიდან დაიძრება, თუ მას სირბილით მომავალი ადამიანი შეახტება. ყველა მოყვანილი მაგალითი ფიზიკის თვალსაზრისით ძალიან ჰგავს ერთმანეთს. კანონი, რომელიც ასეთი ტიპის დაჯახებისას სხეულთა სიჩქარეებს აკავშირებს, უცებ მიიღება იმპულსის მუდმივობის კანონიდან.

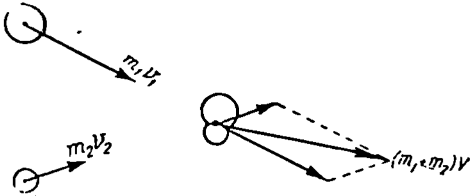
სხეულთა იმპულსები შეხვედრამდე იყო $m_1\vec{v_1}$ და $m_2\vec{v_2}$, დაჯახების შემდეგ სხეულები გაერთიანდნენ, მათი საერთო მასა არის m_1+m_2. თუ გაერთიანებული სხეულების სიჩქარეს $\vec{V}$-თი აღვნიშნავთ, მივიღებთ:

$$m_1\vec{v_1}+m_2\vec{v_2}=(m_1+m_2)\vec{V},$$

ან

$$\vec{V}=\frac{m_1\vec{v_1}+m_2\vec{v_2}}{m_1+m_2}.$$

მოგაგონებთ იმპულსის მუდმივობის კანონის ვექტორულ ხასიათს. ფორმულის მრიცხველში მოთავსებული $m\vec{v}$ იმპულსები ვექტორულად უნდა შეიკრიბოს.



ნახ. 31.

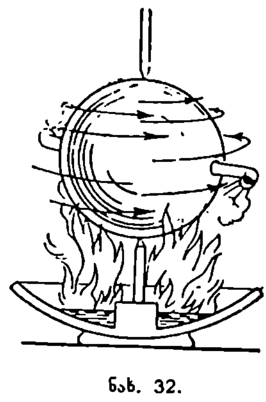
„გამაერთიანებელი“ დაჯახება ერთმანეთისადმი კუთხით მოძრავი სხეულების შეხვედრისას ნაჩვენებია ნახ. 31-ზე. იმისათვის, რომ ვიპოვოთ სიჩქარის სიდიდე, შემხვედრი სხეულების იმპულსების ვექტორზე აგებული პარალელოგრამის დიაგონალის სიგრძე უნდა გავყოთ მათი მასების ჯამზე.

რეაქტიული მოძრაობა

ადამიანი დედამიწისაგან უკუბიძგებით მოძრაობს; ნავი იმიტომ მიცურავს, რომ მენიჩბეები ნიჩბებით წყალს უბიძგებენ; ასევეა თბომავალიც, მაგრამ მას ნიჩბების ნაცვლად, ხრახნები აქვს. დედამიწისგან უკუბიძგებით მოძრაობს რელსებზე მიმავალი მატარებელი და ავტომანქანა, — გაიხსენეთ როგორ უჭირს ავტომანქანას ადგილიდან დაძვრა მოყინულ გზაზე.

ამრიგად, საყრდენიდან უკუბიძგება თითქოს მოძრაობის აუცილებელი პირობაა; თვითმფრინავიც კი მოძრაობისას ხრახნით ჰაერს უკუუბიძგებს.

მაგრამ ასეა სინამდვილეში? ხომ არ არსებობს რაიმე ეშმაკური ხერხი ყოველგვარი უკუბიძგების გარეშე ვიმოძრაოთ?



ნახ. 32.

თუ ციგურებით დადიხართ, მაშინ საკუთარი გამოცდილებით ადვილად დარწმუნდებით, რომ ასეთი მოძრაობა სავსებით შესაძლებელია. აიღეთ ხელში მძიმე ჯოხი და ყინულზე დადექით. გაისროლეთ ჯოხი წინ—რა მოხდება? თქვენ უკან გასრიალდებით, თუმცა ყინულისათვის ფეხის კვრა არც კი გიფიქრიათ.

უკუცემის მოვლენა, რომელიც ზემოთ შევისწავლეთ, საშუალებას გვაძლევს საყრდენის გარეშე, უკუბიძგების გარეშე ვიმოძრაოთ. უკუცემით შეგვიძლია ავაჩქაროთ მოძრაობა უჰაერო სივრცეშიც, სადაც უკვე ნამდვილად არაფრისაგან არ შეიძლება უკუბიძგება.

ქურქლიდან გამოტყორცნილი ორთქლის ჭავლით გამოწვეულ უკუცემას (ჭავლის რეაქცია) ჯერ კიდევ ძველად იყენებდნენ საინტერესო სათამაშოების დასამზადებლად. ნახ. 32-ზე გამოსახულია ჩვენს წელთაღრიცხვამდე მეორე საუკუნეში გამოგონებული ძველებური ორთქლის ტურბინა. სფეროსებური ქვაბი ვერტიკალურ ღერძს ეყრდნობოდა, ორთქლი

მოხრილი მილებით მოედინებოდა ქვაბიდან, უბიძგებდა მათ საწინააღმდეგო მიმართულებით და სფეროც ბრუნავდა.

ჩვენს დროში რეაქტიული მოძრაობის გამოყენება უკვე დიდად გასცდა სათამაშოების შექმნასა და საინტერესო დაკვირვებების შეგროვებას. მეოცე საუკუნეს ხანდახან ატომის ენერგიის საუკუნეს უწოდებენ, მაგრამ არანაკლები საფუძველი გვაქვს, მას რეაქტიული მოძრაობის საუკუნე ვუწოდოთ, რადგანაც ძნელია იმ შედეგების გადაფასება, რაც მძლავრი რეაქტიული ძრავების გამოყენებამ მოგვცა. ეს არა მარტო რევოლუციაა თვითმფრინავთმშენებლობაში, ეს სამყაროსთან ადამიანის ურთიერთობის დასაწყისია. რეაქტიული მოძრაობის პრინციპმა შესაძლებელი გახადა შეექმნათ თვითმფრინავები, რომლებიც საათში რამდენიმე ათასი კილომეტრის სიჩქარით მოძრაობენ, მფრინავი ჭურვები, რომლებიც დედამიწის ზედაპირს ასეული კილომეტრებით შორდებიან, დედამიწის ხელოვნური თანამგზავრები და კოსმოსური რაკეტები, რომლებიც პლანეტათშორის მოგზაურობებს ახორციელებენ.

რეაქტიული ძრავა ის მანქანაა, რომლიდანაც დიდი ძალით გამოიტყორცნება საწვავის წვის დროს წარმოშობილი გაზები. რაკეტა მოძრაობს გაზის ნაკადის საწინააღმდეგო მიმართულებით.

რას უდრის წევის ძალა, რომელსაც რაკეტა მიჰყავს სივრცეში? ჩვენ ვიცით, რომ ძალა უდრის იმპულსის ცვლილებას დროის ერთეულში. მუდმივობის კანონის თანახმად, რაკეტის იმპულსი იცვლება გამოტყორცნილი გაზის იმპულსის mv სიდიდით.

ბუნების ეს კანონი საშუალებას გვაძლევს გამოვთვალოთ, მაგალითად, კავშირი რეაქტიულ წევის ძალასა და ამისათვის საჭირო სათბობის ხარჯვას შორის. ამასთან წვის პროდუქტების გამოდინების სიჩქარის სიდიდე უნდა დაშვებით მივიღოთ. ავიღოთ, მაგალითად, ასეთი მნიშვნელობები: გაზები გამოიტყორცნება 2000 მ/წმ სიჩქარით წამში 10 ტონის რაოდენობით, მაშინ წევის ძალა დაახლოებით $2 \cdot 10^{12}$ დინის, ე. ი. თუ დავამრგვალებთ 2000 ტონა ძალის ტოლი იქნება.

განვსაზღვროთ პლანეტათშორის სივრცეში მოძრავი რაკეტის სიჩქარის ცვლილება.

u სიჩქარით გამოტყორცნილი გაზის ΔM მასის იმპულსი ტოლია $u\Delta M$. ამასთან, M მასის მქონე რაკეტის იმპულსი $M\Delta v$ სიდიდით გაიზრდება. მუდმივობის კანონის თანახმად, ეს ორი სიდიდე ერთმანეთის ტოლია:

$$u\Delta M = M\Delta v, \text{ ე. ი. } \Delta v = u\,\frac{\Delta M}{M}.$$

მაგრამ თუ ჩვენ მოვისურვებთ გამოვთვალოთ რაკეტის სიჩქარე ისეთი მასების გამოტყორცნისას, რომლებიც რაკეტის მასის შესადარია, მაშინ გამოყვანილი ფორმულა გამოუსადეგარი აღმოჩნდება. იგი ხომ რაკეტის მასის უცვლელობას გულისხმობს. მაგრამ ძალაში რჩება შემდეგი მნიშვნელოვანი შედეგი: მასის ერთნაირი ფარდობითი ცვლილებებისას სიჩქარე ერთი და იმავე სიდიდით იცვლება. ზუსტი ფორმულის მიხედვით შესრულებული გამოთვლა გვიჩვენებს, რომ რაკეტის მასის განახევრებისას მისი სიჩქარე $0{,}7u$ აღწევს.

იმისათვის, რომ რაკეტის სიჩქარე $3u$-მდე მივიყვანოთ, უნდა დავწვათ ნივთიერების მასა $m = \frac{19}{20}M$. ეს იმას ნიშნავს, რომ რაკეტის მასის მხოლოდ 1/20 ნაწილის შენარჩუნება შეიძლება იმ შემთხვევაში, თუ გვსურს სიჩქარის მნიშვნელობა $3u$-დე, ე. ი. 6—8 კმ/წმ-მდე გავზარდოთ.

იმისათვის, რომ $7u$-ს ტოლ სიჩქარეს მივაღწიოთ, რაკეტის მასა გაქანების დროის განმავლობაში 1000-ჯერ უნდა შემცირდეს.

ეს გამოთვლები გვაფრთხილებენ, არ გაგვიტაცოს რაკეტის საწვავი მასის გაზრდამ. რაც უფრო მეტ საწვავს წავიღებთ თან, მით უფრო მეტს დავწვავთ. გაზების გამოდინების მოცემული სიჩქარისათვის ძალიან ძნელია მივაღწიოთ რაკეტის სიჩქარის გაზრდას.

რაკეტების დიდი სიჩქარეების მისაღებად მთავარია გაზების გამოდინების სიჩქარის გაზრდა. ამ მხრივ არსებითი როლი უნდა შეასრულოს რაკეტებში ისეთი ძრავების გამოყენებამ, რომლებიც ახალ, ბირთვულ საწვავზე მუშაობენ. გაზების გამოდინების უცვლელი სიჩქარისა და საწვავის იმავე მასის პირობებში სისწრაფეში მოგებას მრავალსაფეხურიანი რაკე-

ტების გამოყენების შედეგად აღწევენ. ერთსაფეხურიან რაკეტაში სათბობის მასა მცირდება, ცარიელი ავზები კი განაგრძობენ რაკეტასთან ერთად მოძრაობას. სათბობის უსარგებლო ავზების მასის ასაჩქარებლად საჭიროა დამატებითი ენერგია. მიზანშეწონილია სათბობის ხარჯვასთან ერთად გადაიყარონ სათბობის ავზებიც. თანამედროვე მრავალსაფეხურიან რაკეტებში არა მარტო ავზებსა და მილსადენებს, ნამუშევარი საფეხურების ძრავებსაც ყრიან.

რასაკვირველია, ყველაზე უკეთესი იქნებოდა რაკეტის უსარგებლო მასა განუწყვეტლად გადაეყარათ. ასეთი კონსტრუქცია ჯერჯერობით არ არსებობს. ერთსაფეხურიანი რაკეტის ტოლი „პერის“ მქონე სამსაფეხურიანი რაკეტის სასტარტო წონა შეიძლება ექვსჯერ ნაკლები იყოს. ამ თვალსაზრისით „განუწყვეტელი“ რაკეტა სამსაფეხურიანზე 15 პროცენტით კიდევ უფრო ხელსაყრელია.

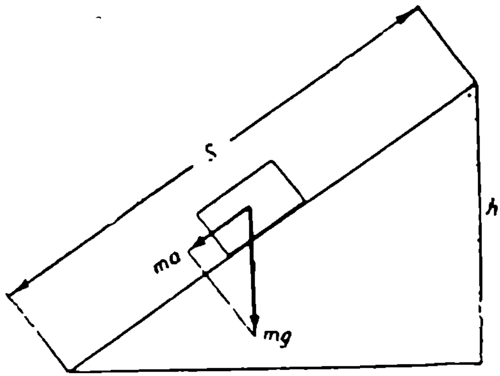
მოძრაობა სიმძიმის ძალის გავლენით

დავაგოროთ პატარა ურიკა ორ ძალიან გლუვ დახრილ სიბრტყეზე. ერთი ფიცარი მეორეზე ბევრად მოკლე ავიღოთ და ორივე ერთ საყრდენზე დავაყუდოთ. მაშინ ერთი დახრილი სიბრტყე ციცაბო იქნება, მეორე კი დამრეცი. ორივე ფიცრის ზედა ბოლო — ურიკის სტარტის ადგილები — ერთნაირ სიმაღლეზე იქნება. როგორ ფიქრობთ, რომელი ურიკა შეიძენს მეტ სიჩქარეს დახრილ ფიცარზე დაგორების შედეგად? ბევრნი იფიქრებენ, ის, რომელიც უფრო ციცაბო სიბრტყეზე დაგორდაო.

ცდა გვიჩვენებს, რომ ეს მცდარი აზრია, ურიკები ერთნაირ სიჩქარეს შეიძენენ. ვიდრე სხეული დახრილ სიბრტყეზე მოძრაობს, იგი განიცდის მოძრაობის გასწვრივ მიმართული მუდმივი ძალის, სახელდობრ, (ნახ. 33) სიმძიმის ძალის მდგენელის გავლენას. სიჩქარე v, რომელსაც იძენს a აჩქარებით მოძრავი სხეული S გზაზე, როგორც ვიცით, ტოლია, $v=\sqrt{2aS}$.

საიდანღა ჩანს, რომ ეს სიდიდე არ არის დამოკიდებული სიბრტყის დახრის კუთხისაგან? ნახ. 33-ზე ჩვენ ვხედავთ ორ

სამკუთხედს. ერთი მათგანი გამოხატავს დახრილ სიბრტყეს. ამ სამკუთხედის მცირე კათეტი, რომელიც h-ით არის აღნიშნული, წარმოადგენს სიმაღლეს, რომლიდანაც მოძრაობა იწყება; S ჰიპოტენუზა კი გზაა, რომელსაც სხეული აჩქარებული მოძრაობით გადის. ძალთა მცირე სამკუთხედი ma კათეტითა და mg ჰიპოტენუზით დიდის მსგავსია, რადგანაც



ნახ. 33.

ორივე მართკუთხა სამკუთხედია და მათი კუთხეები ტოლია, როგორც ურთიერთმართობგვერდებიანი კუთხეები. მაშასადამე, კათეტების ფარდობა ჰიპოტენუზების ფარდობის ტოლი უნდა იყოს, ე. ი.

$$\frac{h}{ma}=\frac{S}{mg}, \text{ ანუ } aS=gh.$$

ჩვენ დავამტკიცეთ, რომ aS ნამრავლი, და, მაშასადამე, დახრილ სიბრტყეზე დაგორებული სხეულის საბოლოო სიჩქარეც, არ არის დამოკიდებული დახრის კუთხისგან. იგი დამოკიდებულია მხოლოდ იმ სიმაღლისაგან, რომლიდანაც დაიწყო მოძრაობა ქვევითკენ. სიჩქარე $v=\sqrt{2gh}$ ყველა დახრილი სიბრტყისათვის იმ ერთადერთი პირობით, რომ მოძრაობა ერთი და იმავე h სიმაღლიდან დაიწყო. ეს სიჩქარე h სიმაღლიდან თავისუფალი ვარდნის სიჩქარის ტოლი აღმოჩნდა.

გავზომოთ სხეულის სიჩქარე დახრილი სიბრტყის ორ ადგილას — h_1 და h_2 სიმაღლეებზე. პირველ წერტილზე გავლის მომენტში სხეულის სიჩქარე v_1-ით აღვნიშნოთ, ხოლო მეორე წერტილზე გავლის მომენტში — v_2-თი.

თუ საწყისი სიმაღლე, საიდანაც მოძრაობა დაიწყო, არის h, მაშინ სხეულის სიჩქარის კვადრატი პირველ წერტილში იქნება $v_1^2=2g(h-h_1)$, ხოლო მეორე წერტილში $v_2^2=2g(h-h_2)$. თუ მეორეს პირველს გამოვაკლებთ, ვიპოვით, როგორ არიან დაკავშირებული სხეულის სიჩქარეები დახრილი სიბრტყის ნებისმიერი მონაკვეთის დასაწყისსა და ბოლოში ამ წერტილების სიმაღლეებთან:

$$v_2^2-v_1^2=2g(h_1-h_2).$$

სიჩქარეების კვადრატების სხვაობა დამოკიდებულია მხოლოდ სიმაღლეების სხვობისაგან. შევნიშნავთ, რომ მიღებული განტოლება ერთნაირად გამოდგება როგორც ზევით, ისე ქვევით მოძრაობისათვის. თუ პირველი სიმაღლე მეორეზე ნაკლებია (აღმართი), მაშინ მეორე სიჩქარე პირველზე ნაკლებია.

ეს ფორმულა შემდეგი სახით შეიძლება გადაიწეროს:

$$\frac{v_1^2}{2}+gh_1=\frac{v_2^2}{2}+gh_2.$$

ასეთი ჩაწერით ჩვენ გვინდა ხაზი გავუსვათ იმ გარემოებას, რომ სიჩქარის კვადრატის ნახევრისა და g-ზე გამრავლებული სიმაღლის ჯამი, დახრილი სიბრტყის ნებისმიერი წერტილისათვის ერთნაირია. შეიძლება ითქვას, რომ სიდიდე $\frac{v^2}{2}+gh$ მუდმივია მოძრაობის დროს.

ამ კანონში ყველაზე უფრო შესანიშნავი ის არის, რომ იგი სამართლიანია უხახუნო მოძრაობისათვის ნებისმიერ გორაკზე და საერთოდ ნებისმიერ გზაზე, რომელიც ერთმანეთის მონაცვლე სხვადასხვა დახრილობის აღმართებისა და დაღმართებისაგან შედგება. ეს იქიდან გამომდინარეობს, რომ ნებისმიერი გზა შეიძლება დავყოთ სწორხაზოვან უბნებად. რაც უფრო მცირე იქნება მონაკვეთები, მით მეტად მიუახლოვდება ტეხილი ხაზი მრუდს. მრუდხაზოვანი გზის ყოველი სწორი

მონაკვეთი შეიძლება დახრილი სიბრტყის ნაწილად მივიღოთ და მისთვის ეს კანონი გამოვიყენოთ.

მაშასადამე, ტრაექტორიის ნებისმიერ წერტილში $\frac{v^2}{2} + gh$ ჯამი ერთნაირია. ამიტომ სიჩქარის კვადრატის ცვლილება არ არის დამოკიდებული სხეულის გზის ფორმისა და სიგრძისაგან, იგი მხოლოდ მოძრაობის დასაწყისისა და ბოლო წერტილების სიმაღლეთა სხვაობით განისაზღვრება.

მკითხველს შეიძლება ეჩვენოს, რომ ჩვენი დასკვნა ყოველდღიურ გამოცდილებას არ ემთხვევა: გრძელ დამრეც გზაზე სხეული სულაც არ იკრებს სიჩქარეს და ბოლოს და ბოლოს ჩერდება. ეს მართლაც ასეა, მაგრამ ჩვენ ხომ მსჯელობაში ხახუნის ძალებს არ ვითვალისწინებდით. ზემოთ მოყვანილი ფორმულა სამართლიანია დედამიწის სიმძიმის ველში მოძრაობისათვის მხოლოდ და მხოლოდ სიმძიმის ძალის გავლენით. თუ ხახუნის ძალები მცირეა, მაშინ გამოყვანილი კანონი საკმაოდ კარგად შესრულდება. გლუვ ყინულოვან მთებზე ლითონის თავკავებიანი ციგები ძალიან მცირე ხახუნით სრიალებენ. შეიძლება მოეწყოს გრძელი ყინულოვანი გზები, რომლებიც ციცაბო დაღმართით დაიწყება. ამ დაღმართზე მოხდება დიდი სიჩქარის მოკრება, შემდეგ კი გზა უცნაურად დაიკლაკნება ხან ზევით და ხან ქვევით. თუ ხახუნი სრულიად არ არის, ასეთ გორაკებზე მოგზაურობა ისეთ ადგილზე დამთავრდება (როდესაც ციგა თავისთავად გაჩერდება), რომლის სიმაღლე საწყისი სიმაღლის ტოლი იქნება. მაგრამ რადგანაც ხახუნს გვერდს ვერ ავუვლით, ამიტომ წერტილი, საიდანაც ციგის მოძრაობა დაიწყო, მისი გაჩერების ადგილზე უფრო მაღლა იქნება.

კანონი, რომლის მიხედვითაც სიმძიმის ძალის გავლენით მოძრაობისას საბოლოო სიჩქარე არ არის დამოკიდებული გზის ფორმისგან, შეიძლება სხვადასხვა საინტერესო ამოცანების ამოსახსნელად გამოვიყენოთ.

ცირკში ბევრჯერ უჩვენებიათ წარმტაცი ატრაქციონი — ვერტიკალური „მკვდარი მარყუჟი". აკრობატი ველოსიპედით ან ურიკით მაღალ ფიცარნაგზე თავსდება. იწყება აჩქარებუ-

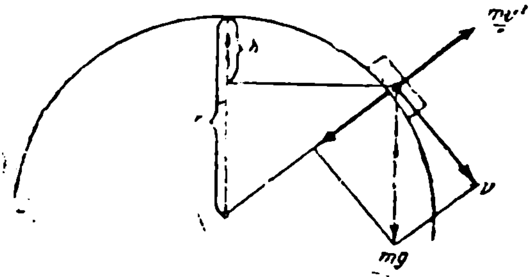
ლი დაშვება, შემდეგ ზეასვლა. აი აკრობატი უკვე თავდაყირა დგას, კიდევ დაშვება — და მკვდარი მარყუჟი შემოწერილია. განვიხილოთ ცირკის ინჟინრის წინაშე წამოჭრილი ამოცანა. რა სიმაღლეზე უნდა გაკეთდეს ფიცარნაგი, საიდანაც დაშვება იწყება, იმისათვის რომ აკრობატი არ ჩამოვარდეს მკვდარი მარყუჟის უმაღლესი წერტილიდან? პირობა ჩვენთვის ცნობილია: ცენტრიდანულმა ძალამ, რომელიც აკრობატს ფიცარნაგზე აჭერს, უნდა გააწონასწოროს საწინააღმდეგოდ მიმართული სიმძიმის ძალა. მაშასადამე, $mg \leqslant \frac{mv^2}{r}$. სადაც r არის მკვდარი მარყუჟის რადიუსი, ხოლო v — მარყუჟის ზემო წერტილში მოძრაობის სიჩქარე. იმისათვის რომ ამ სიჩქარეს მივაღწიოთ, მოძრაობა უნდა დაიწყოს ისეთი ადგილიდან, რომელიც მარყუჟის ზემო წერტილზე რაღაც h სიდიდით უფრო მაღლაა. აკრობატის საწყისი სიჩქარე ნულის ტოლია, ამიტომ მარყუჟის ზემო წერტილში $v^2 = 2gh$. მაგრამ მეორე მხრივ, $v^2 \geqslant gr$, მაშინ, h სიმაღლესა და მარყუჟის რადიუსს შორის არსებობს თანაფარდობა $h \geqslant \frac{r}{2}$. ფიცარნაგი მარყუჟის ზემო წერტილზე მაღლა უნდა იყოს რადიუსის ნახევარზე არანაკლები სიდიდით. თუ აუცილებელ ხახუნის ძალასაც გავითვალისწინებთ, ცხადია, საჭიროა სიმაღლის გარკვეული მარაგის აღება.

აი, კიდევ ერთი ამოცანა. ავიღოთ მრგვალი გუმბათი, ძალიან გლუვი, რომ ხახუნი მინიმალური იყოს. წვეროზე დავდოთ მომცრო საგანი და ოდნავი ბიძგით საშუალება მივცეთ ჩამოსრიალდეს გუმბათზე. ადრე თუ გვიან დაცურებული სხეული მოსცილდება გუმბათს და ვარდნას დაიწყებს. ჩვენ ადვილად შეგვიძლია გადავწყვიტოთ საკითხი, სახელდობრ როდის მოსწყდება სხეული გუმბათის ზედაპირს: მოწყვეტის მომენტში ცენტრიდანული ძალა უნდა გაუტოლდეს სიმძიმის ძალის მდგენელს რადიუსის მიმართულებით (ამ დროს სხეული შეწყვეტს გუმბათზე დაწოლას და მოწყვეტის მომენტიც სწორედ ეს იქნება). ნახ. 34-ზე ჩანს ორი მსგავსი სამკუთხედი; გამოსახულია მოწყვეტის მომენტი. შევადგინოთ ძალა სამკუთხედის კათეტის ფარდობა ჰიპოტენუზასთან და გავუ-

ტოლოთ მეორე სამკუთხედის სათანადო გვერდების ფარდობას:

$$\frac{\frac{mv^2}{r}}{mg}=\frac{r-h}{r}.$$

აქ r სფერული გუმბათის რადიუსია, ხოლო h სიმაღლეთა სხვაობა სრიალის დასაწყისსა და ბოლოს შორის. ახლა გამოვიყენოთ გზის ფორმისაგან საბოლოო სიჩქარის დამოუკიდებლობის კანონი. რაკი იგულისხმება, რომ სხეულის საწყისი



ნახ. 34.

სიჩქარე ნულის ტოლია, ამიტომ $v^2=2gh$. თუ ამ მნიშვნელობას ზემოთ დაწერილ პროპორციაში ჩავსვამთ და არითმეტიკულ გარდაქმნებს შევასრულებთ, ვიპოვით: $h=\frac{r}{3}$. მაშასადამე, სხეული გუმბათს მოსწყდება იმ სიმაღლეზე, რომელიც გუმბათის წვეროზე რადიუსის 1/3-ით დაბლაა.

მექანიკური ენერგიის მუდმივობის კანონი

ზემოთ განხილული მაგალითებით დავრწმუნდით, რამდენად სასარგებლოა ისეთი სიდიდის ცოდნა, რომელიც მოძრაობისას არ იცვლის თავის რიცხვით მნიშვნელობას (ინახება).

ასეთი სიდიდე ჩვენ ჯერჯერობით მხოლოდ ერთი სხეულისათვის ვიცით. მაგრამ თუ სიმძიმის ველში რამდენიმე ერთმანეთთან დაკავშირებული სხეული მოძრაობს? აზრი, რომ თვითეული სხეულისათვის სამართლიანი რჩება $\frac{v^2}{2}+gh$ გამოსახულება, აშკარად უმართებულოა, რადგანაც თვითეული სხეული განიცდის არა მარტო სიმძიმის ძალების, არამედ მეზობელი სხეულების მოქმედებასაც. იქნებ უცვლელია ასეთ გამოსახულებათა ჯამი განსახილველ სხეულთა ჯგუფისათვის?

ჩვენ ახლა გიჩვენებთ, რომ ეს დაშვება არ არის სწორი. მრავალი სხეულის მოძრაობისას არსებობს მუდმივი სიდიდე. მაგრამ იგი

$$\left(\frac{v^2}{2}+gh\right)_{\text{სხეული } 1}+\left(\frac{v^2}{2}+gh\right)_{\text{სხეული } 2}+\ldots$$

ჯამის ტოლი კი არა, მსგავსი გამოსახულებების შესაბამისი სხეულების მასებზე ნამრავლთა ჯამის ტოლია; სხვაგვარად, მუდმივია ჯამი

$$m_1\left(\frac{v^2}{2}+gh\right)_1+m_2\left(\frac{v^2}{2}+gh\right)_2+\ldots$$

მექანიკის ამ უმნიშვნელოვანესი კანონის დასამტკიცებლად შემდეგ მაგალითს მივმართოთ.

ბლოკზე ორი ტვირთია გადაკიდული, დიდი, რომლის მასაა M და მცირე, რომლის მასაა m. დიდი ტვირთი გადასძლევს მცირეს და ეს ორი სხეულისგან შემდგარი ჯგუფი მზარდი სიჩქარით იმოძრავებს.

მამოძრავებელ ძალას ამ სხეულთა წონების $Mg-mg$ სხვაობა წარმოადგენს. რადგანაც აჩქარებულ მოძრაობაში ორივე სხეულის მასა მონაწილეობს, ამიტომ ნიუტონის კანონი ამ შემთხვევაში ასე ჩაიწერება:

$$(M-m)g=(M+m)a.$$

განვიხილოთ მოძრაობის ორი მომენტი და ვაჩვენოთ, რომ შესაბამის მასებზე გამრავლებული $\frac{v^2}{2}+gh$ გამოსახულებების ჯამი მართლაც უცვლელია. საჭიროა დამტკიცდეს ტოლობა

$$m\left(\frac{v_2^2}{2}+gh_2\right)+M\left(\frac{V_2^2}{2}+gH_2\right)=$$
$$=m\left(\frac{v_1^2}{2}+gh_1\right)+M\left(\frac{V_1^2}{2}+gH_1\right).$$

მთავრული ასოებით აღნიშნულია დიდი ტვირთის დამახასიათებელი სიდიდეები. ინდექსები 1 და 2 აქ სიდიდეებს მოძრაობის ორ განსახილავ მომენტს მიაკუთვნებენ.

რადგანაც ტვირთები თოკით არის გადაბმული, ამიტომ $v_1=V_1$ და $v_2=V_2$. თუ ამ გამარტივებებით ვისარგებლებთ და სიმაღლეების შემცველ ყველა წევრს გადავიტანთ მარჯვნივ, ხოლო სიჩქარეებიან წევრებს — მარცხნივ, მივიღებთ:

$$\frac{m+M}{2}(v_2^2-v_1^2)=mgh_1+MgH_1-mgh_2-MgH_2=$$
$$=mg(h_1-h_2)+Mg(H_1-H_2).$$

ტვირთების სიმაღლეთა სხვაობები, ცხადია, ტოლია (მაგრამ შებრუნებული ნიშნით, იმიტომ, რომ თუ ერთი ტვირთი ზევით ადის, მეორე ქვევით ეშვება). ამრიგად,

$$\frac{m+M}{2}(v_2^2-v_1^2)=g(M-m)\,S,$$

სადაც S განვლილი მანძილია.

53-ე გვერდზე ჩვენ გავიგეთ, რომ გზის იმ S მონაკვეთის დასაწყისსა და ბოლოში, რომელსაც სხეული a აჩქარებით გადის, სიჩქარეების კვადრატების $v_1{}^2-v_2{}^2$ სხვაობა ტოლია

$$v_1{}^2-v_2^2=2aS.$$

თუ ამ გამოსახულებას უკანასკნელ ფორმულაში ჩავსვამთ, მივიღებთ:

$$(m+M)a=(M-m)g.$$

მაგრამ ეს ხომ ჩვენი მაგალითისათვის ზემოთ ჩაწერილი ნიუტონის კანონია. ამით მტკიცდება ის, რაც მოითხოვებოდა: ორი სხეულისათვის შესაბამის მასებზე[1] $\frac{v^2}{2}+gh$ გამოსახულებების ნამრავლთა ჯამი მოძრაობის დროს არ იცვლება ან, როგორც ამბობენ, ინახება, ე. ი.

$$\left(\frac{mv^2}{2}+mgh\right)+\left(\frac{MV^2}{2}+MgH\right)=\text{const}.$$

როცა საქმე ერთ სხეულთან გვაქვს, ეს ფორმულა გადავა ადრე დამტკიცებულ ფორმულაში:

$$\frac{v^2}{2}+gh=\text{const}.$$

მასისა და სიჩქარის კვადრატის ნამრავლის ნახევარს კინეტიკური ენერგია K ეწოდება:

$$K=\frac{mv^2}{2}.$$

სხეულის წონის ნამრავლს სიმაღლეზე სხეულის მიწისადმი მიზიდულობის პოტენციალური ენერგია U ეწოდება:

$$U=mgh.$$

ჩვენ დავამტკიცეთ, რომ ორი სხეულისაგან შემდგარი სისტემის მოძრაობის დროს (იგივე შეიძლება დამტკიცდეს მრავალი სხეულისგან შედგენილი სისტემისათვის) სხეულთა კინეტიკურ და პოტენციალურ ენერგიათა ჯამი უცვლელი რჩება.

სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, სხეულთა ჯგუფის კინეტიკური ენერგიის გაზრდა შეიძლება მხოლოდ ამ სისტემის პო-

---

[1] რასაკვირველია, გამოსახულება $\frac{v^2}{2}+gh$ შეიძლება ასეთივე წარმატებით გამრავლდეს $2m$-ზე ან $m/2$-ზე, ან, საერთოდ, დამატებით ნებისმიერ კოეფიციენტზე. პირობით მიღებულია უმარტივესი სახით მოვიქცეთ, ე. ი. გავამრავლოთ უბრალოდ m-ზე.

ტენციალური ენერგიის შემცირების ხარჯზე (და, რასაკვირველია, პირიქითაც).

დამტკიცებულ კანონს მექანიკური ენერგიის მუდმივობის კანონი ეწოდება.

მექანიკური ენერგიის მუდმივობის კანონი ბუნების მეტად მნიშვნელოვან კანონს წარმოადგენს. მისი მნიშვნელობა ჩვენ ჯერ არ გვიჩვენებია სრული სახით. მოგვიანებით, როდესაც მოლეკულების მოძრაობას გავეცნობით, თვალსაჩინოდ გამოჩნდება მისი უნივერსალობა, ბუნების ყველა მოვლენისათვის მისი გამოყენების შესაძლებლობა.

მ უ შ ა ო ბ ა

თუ სხეულს ყოველგვარი დაბრკოლების გარეშე ვუბიძგებთ ან გავწევთ, სხეულის აჩქარებას მივიღებთ. ამ დროს წარმოქმნილი კინეტიკური ენერგიის ნაზარდს A მუშაობას უწოდებენ:

$$A=\frac{mv_2^2}{2}-\frac{mv_1^2}{2}.$$

ნიუტონის კანონის თანახმად სხეულის აჩქარება და, მაშასადამე, კინეტიკური ენერგიის ნაზარდიც განისაზღვრება სხეულზე მოდებული ყველა ძალის ვექტორული ჯამით. ე. ი. მრავალი ძალის შემთხვევაში ფორმულა $A=\frac{mv_2^2}{2}-\frac{mv_1^2}{2}$ არის მარეზულტირებელი ძალის მუშაობა. გამოვსახოთ A მუშაობა ძალის სიდიდის საშუალებით.

სიმარტივისათვის შემოვისაზღვროთ შემთხვევით, როდესაც მოძრაობა მხოლოდ ერთი მიმართულებით არის შესაძლებელი — ვუბიძგოთ რელსებზე მდგომ m მასის ვაგონეტს (ან გავწიოთ ის) (ნახ. 35).

თანაბრად აჩქარებული მოძრაობის საერთო ფორმულის თანახმად $v_2^2-v_1^2=2aS$, ამიტომ S გზაზე ყველა ძალის მუშაობა

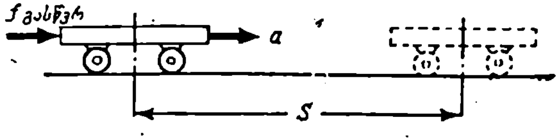
$$A=\frac{mv_2^2}{2}-\frac{mv_1^2}{1}=ma\,S.$$

ნამრავლი ma ტოლია ჯამური ძალის მდგენელისა მოძრაობის მიმართულების გასწვრივ. ამგვარად, $A = f_{\text{გასწვრ}} \cdot S$.

ძალის მუშაობა იზომება მანძილის ნამრავლით ძალის მდგენელზე გზის მიმართულებით.

მუშაობის ფორმულა სამართლიანია ნებისმიერი წარმოშობის ძალებისათვის და ნებისმიერი ტრაექტორიით მოძრაობისათვის.

შევნიშნავთ, რომ მუშაობა შეიძლება იყოს ნულის ტოლი მაშინაც, როდესაც მოძრავ სხეულზე ძალები მოქმედებენ.



ნახ. 35.

მაგალითად, კორიოლისის ძალის მუშაობა ნულის ტოლია. ეს ძალა ხომ მოძრაობის მიმართულების პერპენდიკულარულია. გასწვრივი მდგენელი მას არა აქვს, ამიტომ მუშაობაც ნულის ტოლია.

ტრაექტორიის ნებისმიერი გამრუდება, რომელიც არ არის დაკავშირებული სიჩქარის სიდიდის ცვლილებასთან, მუშაობას არ მოითხოვს — ამ დროს ხომ კინეტიკური ენერგია არ იცვლება.

ხომ არ შეიძლება, მუშაობა უარყოფითი იყოს? რასაკვირველია, თუ ძალა მოძრაობისადმი ბლაგვი კუთხით არის მიმართული, იგი კი არ ეხმარება, ხელს უშლის მოძრაობას. ძალის სიგრძივი მდგენელი გადაადგილების მიმართულებაზე უარყოფითი იქნება. სწორედ ასეთ შემთხვევაში ვამბობთ, რომ ძალა უარყოფით მუშაობას ასრულებს. ხახუნის ძალა ყოველთვის ანელებს მოძრაობას, ე. ი. უარყოფით მუშაობას ასრულებს.

კინეტიკური ენერგიის ნაზრდის მიხედვით შეიძლება ვიმსჯელოთ მხოლოდ მარეზულტირებელი ძალის მუშაობაზე.

ხოლო რაც შეეხება ცალკეული ძალების მუშაობას, ისინი ჩვენ უნდა გამოვითვალოთ როგორც ნამრავლი $f_{\text{გასწვრ}} \cdot S$.

ავტომობილი თანაბრად მოძრაობს შარაგზაზე. კინეტიკური ენერგიის ნამატი არ არის, მაშასადამე, მარეზულტირებელი ძალის მუშაობა ნულის ტოლია. მაგრამ, ცხადია, ნულის ტოლი არ არის მოტორის მუშაობა — იგი ტოლია წევის ძალის ნამრავლისა განვლილ მანძილზე და მთლიანად კომპენსირდება წინააღმდეგობისა და ხახუნის ძალების უარყოფითი მუშაობით.

თუ „მუშაობის" ცნებით ვისარგებლებთ, შეგვიძლია უფრო მოკლედ და ნათლად აღვწეროთ სიმძიმის ძალის ის თავისებურებები, რომლებსაც ეს-ეს არის გავეცანით. თუ სიმძიმის ძალის გავლენით სხეული ერთი ადგილიდან მეორეზე გადავა, მაშინ მისი კინეტიკური ენერგია შეიცვლება. კინეტიკური ენერგიის ეს ცვლილება A მუშაობის ტოლია. მაგრამ ენერგიის მუდმივობის კანონიდან ვიცით, რომ კინეტიკური ენერგიის ზრდა პოტენციალურის კლების ხარჯზე მიმდინარეობს.

ამრიგად, სიმძიმის ძალის მუშაობა პოტენციალური ენერგიის კლების ტოლია:

$$A=U_1-U_2.$$

ცხადია, პოტენციალური ენერგიის კლება (ან მატება) და, მაშასადამე, კინეტიკური ენერგიის მატებაც (ან კლება) ერთნაირი იქნება, იმისგან დამოუკიდებლად, თუ რა გზით მოძრაობდა სხეული. ეს იმას ნიშნავს, რომ სიმძიმის ძალის მუშაობა გზის ფორმისგან არ არის დამოკიდებული. თუ სხეული პირველი წერტილიდან მეორეში კინეტიკური ენერგიის მატებით გადავიდა, მაშინ მეორე წერტილიდან პირველში ის გადავა კინეტიკური ენერგიის ზუსტად იმავე სიდიდის კლებით. ამასთან, სულ ერთია, ემთხვევა თუ არა გზის ფორმა „იქით" გზის ფორმას „აქეთ". მაშასადამე, მუშაობაც „იქით" და „აქეთ" ტოლი იქნება. ხოლო თუ სხეული შორ მანძილზე მოგზაურობს, მაგრამ გზის ბოლო დასაწყისს ემთხვევა, მაშინ მუშაობა ნულს გაუტოლდება.

წარმოიდგინეთ ნებისმიერი უცნაური ფორმის არხი, რომელშიც სხეული ხახუნის გარეშე სრიალებს. გავამგზავროთ სხეული უმაღლესი წერტილიდან. ის სიჩქარის მატებით გა-

ექანება ქვევით, მიღებული კინეტიკური ენერგიის ხარჯზე გადალახავს აღმართს და ბოლოს სადგურში დაბრუნდება, საიდანაც გაემგზავრა. რა სიჩქარით? რასაკვირველია, იმავე სიჩქარით, რომლითაც მან სადგური დატოვა. პოტენციალური ენერგია საწყის მნიშვნელობას დაუბრუნდება. თუ მართლაც ასეა, მაშინ კინეტიკურ ენერგიას არ შეეძლო არც შემცირება, არც გაზრდა და მუშაობაც ნულის ტოლია.

მუშაობა რგოლისებურ (ფიზიკოსები ამბობენ — ჩაკეტილ) გზაზე ყველა ძალისთვის როდია ნულის ტოლი. საჭირო არ არის იმის მტკიცება, მაგალითად, რომ ხახუნის ძალების მუშაობა მით მეტი იქნება, რაც უფრო გრძელია გზა.

რა ერთეულებით იზომება მუშაობა და ენერგია

რადგანაც მუშაობა ენერგიის ცვლილების ტოლია, ამიტომ მუშაობა და ენერგია — ცხადია, როგორც პოტენციალური, ისევე კინეტიკური — ერთი და იმავე ერთეულებით იზომება. მუშაობა ძალისა და მანძილის ნამრავლის ტოლია. ერთი დინი ძალის მუშაობას ერთ სანტიმეტრ გზაზე ერგი ეწოდება:

$$1 \text{ ერგი} = 1 \text{ დინი}. 1 \text{ სმ}.$$

ეს ძალზე მცირე მუშაობაა. ასეთ მუშაობას სიმძიმის ძალის წინააღმდეგ ასრულებს კოღო, იმისათვის, რომ ხელის ცერი თითიდან საჩვენებელზე გადაფრინდეს. მუშაობისა და ენერგიის უფრო დიდი ერთეული, რომელიც ფიზიკაში იხმარება, არის ჯოული. იგი ერგზე 10 მილიონჯერ მეტია:

$$1 \text{ ჯოული} = 10 \text{ მლნ. ერგს}.$$

საკმაოდ ხშირად იხმარება მუშაობის ერთეული 1 კილოგრამმეტრი (1 კგმ) — ეს არის მუშაობა, რომელსაც 1 კგძალა ასრულებს 1 მეტრ გზაზე. დაახლოებით ასეთ მუშაობას ასრულებს კილოგრამიანი საწონი მაგიდიდან იატაკზე ჩამოვარდნისას.

როგორც ვიცით, 1კგ-ძალა ტოლია 981.000 დინის, 1 მ უდრის 100 სმ. მაშასადამე, 1 კგმ მუშაობა ტოლია 98.100.000 ერგის ან 9, 81 ჯოულისა. პირუკუ, 1 ჯოული 0, 102 კგმ ტოლია.

ერთეულთა ახალი სისტემა (SI), რომელიც ჩვენ უკვე მოვიხსენიეთ და კიდევ ვახსენებთ ხოლმე, მუშაობისა და ენერგიის ერთეულად ღებულობს ჯოულს და განსაზღვრავს მას როგორც ერთი ნიუტონის (იხ. გვ. 51) ტოლი ძალის მუშაობას 1 მეტრ გზაზე. ახლა რაკი ვიცით, თუ რა იოლად განისაზღვრება ამ შემთხვევაში ძალა, ერთეულთა ახალი სისტემის უპირატესობაც ადვილი გასაგებია.

ენერგიის შემცირება

მკითხველმა, ალბათ, შენიშნა, რომ მექანიკური ენერგიის მუდმივობის კანონის ილუსტრირების დროს ჩვენ დაჟინებით ვიმეორებთ: „ხახუნის არარსებობისას, ხახუნი რომ არ ყოფილიყო...“ მაგრამ ხახუნი ხომ აუცილებლად ახლავს ნებისმიერ მოძრაობას. მაშ რაღა მნიშვნელობა აქვს კანონს, რომელიც არ ითვალისწინებს ესოდენ მნიშვნელოვან პრაქტიკულ გარემოებას? ამ კითხვაზე პასუხის გაცემა მომავლისთვის გადავდოთ, ახლა კი ვნახოთ, რას იწვევს ხახუნი.

ხახუნის ძალები მიმართულია მოძრაობის წინააღმდეგ და, მაშასადამე, უარყოფით მუშაობას ასრულებენ. ეს იწვევს მექანიკური ენერგიის გარდუვალ კარგვას.

გამოიწვევს თუ არა მექანიკური ენერგიის ეს აუცილებელი კარგვა მოძრაობის შეწყვეტას? ძნელი არ არის დავრწმუნდეთ, რომ ხახუნს არ ძალუძს ყოველგვარი მოძრაობის შეჩერება.

წარმოვიდგინოთ რამდენიმე ურთიერთმოქმედი სხეულისაგან შემდგარი ჩაკეტილი სისტემა. ასეთი ჩაკეტილი სისტემის მიმართ, როგორც ვიცით, სამართლიანია იმპულსის მუდმივობის კანონი. ჩაკეტილ სისტემას არ შეუძლია თავისი იმპულსის შეცვლა, ამიტომ იგი სწორხაზოვნად და თანაბრად მოძრაობს. ხახუნს ასეთი სისტემის შიგნით შეუძლია მოსპოს

სისტემის ნაწილების ფარდობითი მოძრაობა, მაგრამ იგი გავლენას არ მოახდენს მთლიანი სისტემის მოძრაობის სიჩქარესა და მიმართულებაზე.

არსებობს ბუნების კიდევ ერთი კანონი, რომელსაც ბრუნვის მომენტის მუდმივობის კანონი ეწოდება (მას ჩვენ მოგვიანებით გავეცნობით). ეს კანონი საშუალებას არ აძლევს ხახუნს მოსპოს მთელი ჩაკეტილი სისტემის თანაბარი ბრუნვა.

ამრიგად, ხახუნის არსებობა იწვევს ყველა მოძრაობის შეწყვეტას სხეულთა ჩაკეტილ სისტემაში და არ უშლის ხელს მხოლოდ ამ სისტემის, როგორც მთლიანის, თანაბარ სწორხაზოვან და თანაბარ ბრუნვით მოძრაობას.

თუ დედამიწა მაინც იცვლის უმნიშვნელოდ თავისი ბრუნვის სიჩქარეს, ამის მიზეზი არის არა დედამიწაზე მყოფი სხეულების ურთიერთ ხახუნი, არამედ ის, რომ დედამიწა იზოლირებულ სისტემას არ წარმოადგენს.

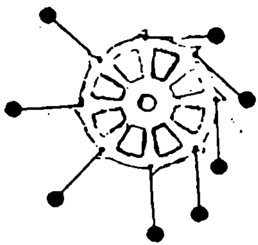
ხოლო რაც შეეხება სხეულების მოძრაობას დედამიწაზე, ყოველ მათგანს ახლავს ხახუნი და ეს სხეულები თავიანთ მექანიკურ ენერგიას ჰკარგავენ. ამიტომაც მოძრაობა ყოველთვის წყდება, თუ იგი გარედან არ იღებს დახმარებას.

ასეთია ბუნების კანონი. მაგრამ ბუნების მოტყუება რომ მოხერხდეს? მაშინ... მაშინ შესაძლებელი იქნებოდა პერპეტუუმ მობილეს განხორციელება, რაც ლათინურად „მარადიულ მოძრაობას“ ნიშნავს.

პერპეტუუმ მობილე

პერპეტუუმ მობილეს განხორციელებაზე ოცნებობს ბერტოლდი — პუშკინის „რაინდული დროის სცენების“ გმირი. „რა არის პერპეტუუმ მობილე?“ — ეკითხება მას თანამოსაუბრე. „ეს მარადიული მოძრაობაა, — პასუხობს ბერტოლდი. — მარადიული მოძრაობა რომ მაპოვნინა, საზღვარი არ ექნებოდა ადამიანის შემოქმედებას. ოქროს კეთება წარმტაცი ამოცანაა, შესაძლოა საინტერესო, სარფიანი აღმოჩენაა, მაგრამ პერპეტუუმ მობილეს გადაწყვეტის პოვნა...“

პერპეტუუმ მობილე, ანუ მარადიული ძრავა, არის მანქანა, რომელიც მუშაობს არა მარტო მექანიკური ენერგიის შემცირების კანონის საწინააღმდეგოდ, არამედ არღვევს მექანიკური ენერგიის მუდმივობის კანონსაც. ეს კანონი, როგორც ახლა უკვე ვიცით, მხოლოდ იდეალურ, მიუღწეველ პირობებში სრულდება — როდესაც ხახუნი არ არსებობს. მარადიულმა ძრავამ, როგორც კი მისი კონსტრუირება დამთავრდება, „თავისთავად" უნდა დაიწყოს მუშაობა — მაგალითად, აბრუნოს ბორბალი ან აიტანოს ტვირთი ქვევიდან ზევით. ეს მუშაობა მარადიული და უწყვეტი უნდა იყოს, ძრავა კი არ უნდა საჭიროებდეს არც სათბობს, არც ადამიანის ხელს, და არც ვარდნილი წყლის ენერგიას — ერთი სიტყვით არაფერს გარედან აღებულს.

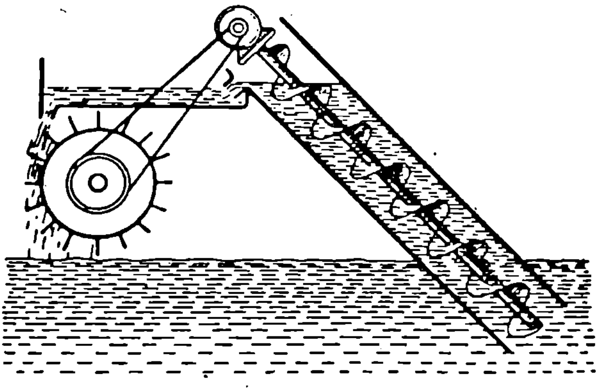


ნახ. 36.

პირველი დღემდე ცნობილი სარწმუნო დოკუმენტი მარადიული ძრავის იდეის „განხორციელების" შესახებ XIII საუკუნეს განეკუთვნება. საინტერესოა, რომ ექვსი საუკუნის შემდეგ, 1920 წელს, მოსკოვის ერთ-ერთ სამეცნიერო დაწესებულებაში „განსახილველად" წარმოადგინეს სიტყვასიტყვით ისეთივე „პროექტი".

ამ მარადიული ძრავის პროექტი გამოსახულია ნახ. 36-ზე. ბორბალი ბრუნვისას ტვირთს გადაისვრის და, გამომგონებლის აზრით, ეს იწვევს მოძრაობას, რადგანაც გადასროლილი ტვირთი გაცილებით მეტ დაწოლას ახორციელებს იმიტომ, რომ ღერძიდან უფრო შორ მანძილზე მოქმედებს. ამ მარტივი „მანქანის" აგების შემდეგ, გამომგონებელი რწმუნდება, რომ ინერციით ერთი ან ორი ბრუნის გაკეთების შემდეგ ბორბალი ჩერდება. მაგრამ ეს არ აკარგვინებს მას იმედს. დაშვებულია შეცდომა: ბერკეტები უფრო გრძელი უნდა გაკეთდეს, შეიცვალოს შვერილების ფორმა. და უნაყოფო მუშაობა, რომელსაც მრავალმა თვითნასწავლმა გამომგონებელმა შესწირა თავისი ცხოვრება, რასაკვირველია, ისეთივე წარმატებით გრძელდება.

მარადიული ძრავას ვარიანტები საერთო ჯამში დიდი რაოდენობით არ იყო წარმოდგენილი: სხვადასხვაგვარი თვითმოძრავი ბორბლები, რომლებიც პრინციპში არ განსხვავდებიან აღწერილისაგან; 1634 წელს გამოგონებული, ნახ. 37-ზე



ნახ. 37.

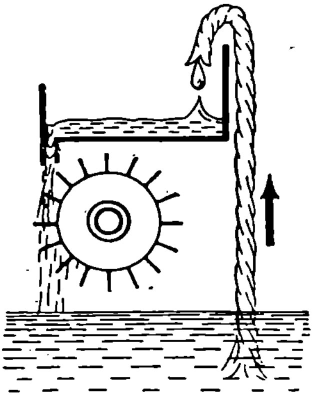
ნაჩვენები ჰიდრავლიკური ძრავა; ძრავები, რომლებიც იყენებენ სიფონებს ან კაპილარულ მილებს (ნახ. 38), წყალში წონის დაკარგვას, რკინის სხეულების მაგნიტის მიერ მიზიდვას. ხანდახან შეუძლებელია მიხვედრა, რის ხარჯზე აპირებდა გამომგონებელი მარადიული მოძრაობის მიღებას.

პერპეტუუმ მობილეს განუხორციელებლობის მტკიცებას ჯერ კიდევ ენერგიის მუდმივობის კანონის დადგენამდე ვპოულობთ საფრანგეთის აკადემიის 1775 წლის განცხადებაში, როდესაც გადაწყდა აღარ მიეღოთ განსახილველად და გამოსაცდელად მარადიული ძრავის არავითარი პროექტი.

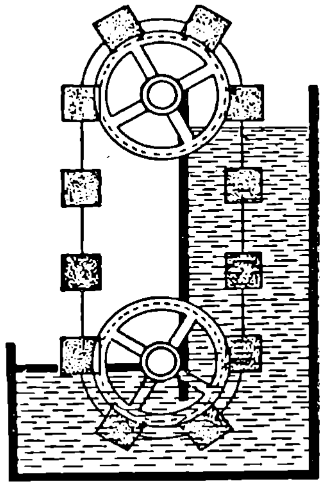
XVII—XVIII საუკუნეების ბევრი მექანიკოსი თავის მტკიცებებს საფუძვლად უდებდა აქსიომას პერპეტუუმ მობილეს შეუძლებლობის შესახებ, მიუხედავად იმისა, რომ ენერგიის ცნება და ენერგიის მუდმივობის კანონი მეცნიერებაში ბევრად უფრო გვიან შემოვიდა.

ამჟამად აშკარაა, რომ მარადიული ძრავის შექმნის მოსურნე გამომგონებლები არა მარტო ექსპერიმენტს ეწინააღმდეგე-

ბიან, არამედ ელემენტარული ლოგიკის წინაშეც სცოდავენ. პერპეტუუმ მობილეს შეუძლებლობა ხომ პირდაპირი შედეგია მექანიკის იმ კანონებისა, რომლებსაც ისინი თავიანთი „გამოგონების“ დასაბუთებისას ეყრდნობიან.



ნახ. 38.



ნახ. 39.

სრული უნაყოფობის მიუხედავად, მარადიული ძრავის ძიებამ, ალბათ, მაინც ითამაშა რაღაც დადებითი როლი, რადგანაც საბოლოო ჯამში მან მეცნიერება ენერგიის მუდმივობის კანონის აღმოჩენასთან მიიყვანა.

დაჯახება

ორი სხეულის დაჯახებისას ყოველთვის ინახება იმპულსი. რაც შეეხება ენერგიას, იგი, როგორც გამოვარკვიეთ, უსათუოდ მცირდება სხვადასხვაგვარი ხახუნის გამო.

მაგრამ თუ დამჯახებელი სხეულები დამზადებულია დრეკადი მასალისგან, მაგალითად, ძვლის ან ფოლადისგან, ენერგიის კარგვა უმნიშვნელო იქნება.

ისეთ დაჯახებებს, როცა კინეტიკური ენერგიის ჯამი დაჯახებამდე და მას შემდეგ ერთნაირია, იდეალურად დრეკადი ეწოდება.

კინეტიკური ენერგია მცირე რაოდენობით ყველაზე უფრო დრეკადი მასალისგან დამზადებული სხეულების დაჯახების დროსაც იკარგება — ბილიარდის ძვლის ბურთულებისთვის, მაგალითად, ეს დანაკარგი 3—4% აღწევს.

კინეტიკური ენერგიის მუდმივობა დრეკადი დაჯახებისას რიგი ამოცანების ამოხსნის საშუალებას იძლევა.

განვიხილოთ, მაგალითად, სხვადასხვა მასის მქონე ბურთულების პირდაპირი დაჯახება. იმპულსის განტოლებას შემდეგი სახე აქვს (ჩვენ ვთვლით, რომ დაჯახებამდე ბურთულა № 2 უძრავი იყო)

$$m_1 v_1 = m_1 u_1 + m_2 u_2,$$

ხოლო ენერგიის განტოლებას —

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2},$$

სადაც v_1 პირველი ბურთულის სიჩქარეა დაჯახებამდე, ხოლო u_1 და u_2 — ბურთულების სიჩქარეები დაჯახების შემდეგ.

რადგანაც მოძრაობა სწორი ხაზის გასწვრივაა მიმართული, (რომელიც ბურთულების ცენტრებზე გადის — სწორედ ეს არის პირდაპირი დაჯახება), ამიტომ ასოებს ზემოდან ვექტორის ისრებს არ ვუკეთებთ.

პირველი განტოლებიდან გვაქვს:

$$u_2 = \frac{m_1}{m_2}(v_1 - u_1).$$

თუ u_2-თვის მიღებულ ამ გამოსახულებას ენერგიის განტოლებაში ჩავსვამთ, მივიღებთ:

$$\frac{m_1}{2}(v_1^2 - u_1^2) = \frac{m_2}{2}\left[\frac{m_1}{m_2}(v_1 - u_1)\right]^2$$

ამ განტოლების ერთ-ერთი ამოხსნაა $u_1 = v_1$ და $u_2 = 0$. მაგრამ ეს პასუხი ჩვენ არ გვაინტერესებს, რადგანაც ტოლო-

ბები $u_1 = v_1$ და $u_2 = 0$ აღნიშნავენ, რომ ბურთულები სულ არ დაჯახებულან. ამიტომ განტოლების სხვა ამოხსნას ვეძებთ. $m_1(v_1 - u_2)$-ზე შეკვეცის შემდეგ მივიღებთ:

$$\frac{1}{2}(v_1 + u_1) = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_1}{m_2}(v_1 - u_1)$$

ე. ი.

$$m_2 v_1 + m_2 u_1 = m_1 v_1 - m_1 u_1$$

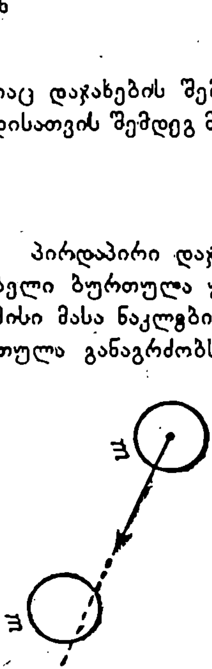
ან

$$(m_1 - m_2) v_1 = (m_1 + m_2) u_1,$$

რაც დაჯახების შემდეგ პირველი ბურთულის სიჩქარის სიდიდისათვის შემდეგ მნიშვნელობას გვაძლევს:

$$u_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1.$$

პირდაპირი დაჯახებისას უძრავ ბურთულასთან დამჯახებელი ბურთულა უკანვე ასხლტება (u_1 უარყოფითია), თუ მისი მასა ნაკლებია. თუ m_1 მეტია m_2-ზე, მაშინ ორივე ბურთულა განაგრძობს მოძრაობას დაჯახების მიმართულებით.



ნახ. 40.

თუ ბილიარდის თამაშის ორი ბურთულა ზუსტად პირდაპირ დაეჯახა ერთმანეთს, ასეთი სურათი გვექნება: ბურთულა-ჭურვი მკვეთრად გაჩერდება, ბურთულა-სამიზნე ბუდისკენ (ლუზისკენ) წავა. ეს აიხსნება ზემოთ მოყვანილი განტოლებით. ბურთულების მასები ტოლია და განტოლება გვაძლევს $u_1 = 0$, მაშასადამე, $u_2 = v_1$. დამჯახებელი ბურთულა ჩერდება, ხოლო მეორე ბურთულა იწყებს მოძრაობას დამჯახებლის სიჩქარით. ბურთულები თითქოს ერთმანეთს უცვლიან სიჩქარეებს.

განვიხილოთ დრეკადი დაჯახების კანონის მიხედვით სხეულების დაჯახების კიდევ ერთი მაგალითი, სახელდობრ, ტოლი მასის მქონე სხეულების ირიბი დაჯახება (ნახ. 40). მეორე

სხეული დაჯახებამდე უძრავი იყო, ამიტომაც იმპულსისა და ენერგიის მუდმივობის კანონებს ასეთი სახე აქვს:

$$m\vec{v}_1 = m\vec{u}_1 + m\vec{u}_2$$

$$\frac{mv_1^2}{2} = \frac{mu_1^2}{2} + \frac{mu_2^2}{2}.$$

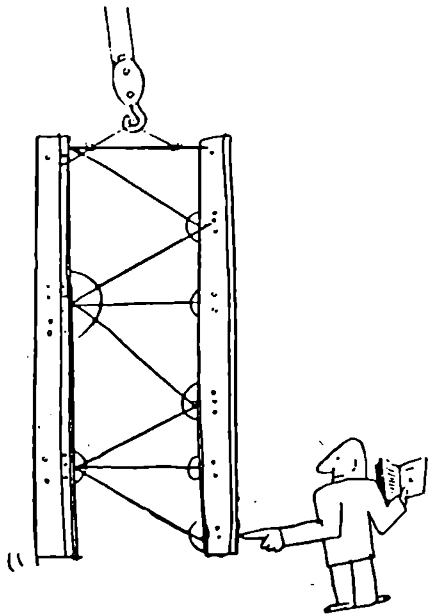
მასაზე შეკვეცის შემდეგ მივიღებთ:

$$\vec{v}_1 = \vec{u}_1 + \vec{u}_2,$$
$$v_1{}^2 = u_1{}^2 + u_2{}^2,.$$

$\vec{v}_1$ ვექტორი $\vec{u}_1$ და $\vec{u}_2$ ვექტორულ ჯამს წარმოადგეხს. მაგრამ ეს ხომ იმას ნიშნავს, რომ სიჩქარის ვექტორების სიგრძეები სამკუთხედს ქმნიან.

რა სამკუთხედია ეს? მოვიგონოთ პითაგორას თეორემა. მას ჩვენი მეორე განტოლება გამოსახავს. ეს იმას ნიშნავს, რომ სიჩქარეთა სამკუთხედი უნდა მართკუთხა იყოს v_1 ჰიპოტენუზით და $\vec{u}_1$ $\vec{u}_2$ კათეტებით. მაშასადამე, $\vec{u}_1$ და u_2 ერთმანეთთან მართ კუთხეს ქმნიან. ეს საინტერესო შედეგი გვიჩვენებს, რომ ნებისმიერი ირიბი დაჯახებისას ტოლი მასის სხეულები ერთმანეთს სწორი კუთხით სცილდებიან.

V. რხევები



წონასწორობა

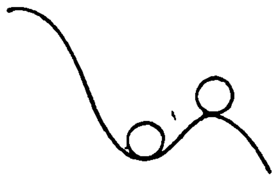
ზოგიერთ შემთხვევაში წონასწორობის დაცვა ძალიან ძნელია — აბა სცადეთ გაჭიმულ თოკზე გავლა. ამავე დროს არავინ არ აჯილდოებს აპლოდისმენტებით სარწეველა სავარძელში მჯდომ კაცს, თუმცა ისიც იცავს თავის წონასწორობას.

რა განსხვავებაა ამ ორ მაგალითს შორის? რა შემთხვევაში მყარდება წონასწორობა „თავისთავად"?

წონასწორობის პირობა თითქოს სრულიად აშკარაა. სხეული რომ თავისი მდგომარეობიდან არ გამოვიდეს, მასზე მოქმედი ძალები ერთმანეთს უნდა აწონასწორებდნენ; სხვანაირად რომ ვთქვათ, ამ ძალების ჯამი ნულის ტოლი უნდა

იყოს. ეს პირობა სხეულების წონასწორობისათვის მართლაც აუცილებელია, მაგრამ საკმარისია თუ არა იგი?

ნახ. 41-ზე გამოხატულია გორაკის პროფილი, რომელიც ადვილად შეიძლება გაკეთდეს მუყაოსაგან. ბურთულა სხვადასხვანაირად მოიქცევა იმის მიხედვით, თუ გორაკის რომელ ადგილზე დავდებთ მას. მთის ფერდობის ნებისმიერ წერტილში ბურთულაზე იმოქმედებს ძალა, რომელიც მას აიძულებს ძირს დაგორდეს. ამ მოქმედ ძალას სიმძიმის ძალა წარმოადგენს, უფრო სწორად მისი პროექცია გორაკის პროფილისადმი იმ წერტილზე გავლებულ მხებზე, რომელიც ჩვენ გვაინტერესებს. ამიტომ გასაგებია, რომ რაც უფრო ნაკლებადაა დაქანებული ფერდობი, მით ნაკლები იქნება ბურთულაზე მოქმედი ძალა.



ნახ. 41.

ჩვენ პირველ რიგში ის წერტილები გვაინტერესებს, რომლებშიც სიმძიმის ძალა მთლიანად წონასწორდება საყრდენის რეაქციით და, მაშასადამე, ბურთულაზე მოქმედი ჯამური ძალა ნულის ტოლია. ეს პირობა შესრულდება გორაკის წვეროზე და ქვედა წერტილებში — ღარებში. ამ წერტილებისადმი მხები ჰორიზონტალურია და ბურთულაზე მოქმედი ჯამური ძალები ნულის ტოლია.

მაგრამ წვეროებზე, მიუხედავად იმისა, რომ ჯამური ძალა ნულის ტოლია, ბურთულის მოთავსება არ მოხერხდება და კიდეც რომ მოხერხდეს, მაშინვე აღმოვაჩენთ ამ წარმატების გარეგან მიზეზს — ხახუნს. მცირე ბიძგი ან მსუბუქი ნიავი გადალახავს ხახუნის ძალებს, ბურთულა ადგილიდან დაიძრება და ქვევით დაგორდება.

გლუვი ბურთულის გლუვ გორაკზე წონასწორობის მდებარეობები იქნება მხოლოდ ღარების ქვედა წერტილები. თუ ბურთულას ბიძგით ან ჰაერის ნაკადით გამოვიყვანთ ამ მდგომარეობიდან, იგი თავისთავად დაუბრუნდება მას.

ღარში, ორმოში, ღრმულში სხეული უთუოდ წონასწორობაშია. ამ მდებარეობიდან გადახრისას სხეული ისეთი ძალის მოქმედების ქვეშ ექცევა, რომელიც მას უკან აბრუნებს. გო-

რაკის წვეროებზე სხვა სურათია: თუ სხეული ამ მდებარეობას დასცილდა, მასზე იმოქმედებს არა უკან დამბრუნებელი, არამედ „განმშორებელი“ ძალა. ამრიგად, ნულის ტოლი ჯამური ძალა აუცილებელი, მაგრამ არა საკმარისი პირობაა მდგრადი წონასწორობისათვის.

ბურთულის წონასწორობა გორაკზე შეიძლება სხვა თვალსაზრისითაც განვიხილოთ. ღარების ადგილები შეესაბამება პოტენციალური ენერგიის მინიმუმებს, ხოლო წვეროების ადგილები — მაქსიმუმებს. მდებარეობის ცვლილებას, რომელშიაც პოტენციალური ენერგია მინიმალურია, ენერგიის მუდმივობის კანონი ეწინააღმდეგება. ასეთი ცვლილების შედეგად კინეტიკური ენერგია უარყოფითი უნდა გახდეს, ეს კი შეუძლებელია. სულ სხვა მდგომარეობაა წვეროების წერტილებში. ამ წერტილებიდან გამოსვლა დაკავშირებულია პოტენციალური ენერგიის შემცირებასთან და, მაშასადამე, კინეტიკური ენერგიის არა შემცირებასთან, არამედ გადიდებასთან.

ამრიგად, წონასწორობის მდებარეობაში პოტენციალურ ენერგიას უნდა ჰქონდეს მინიმალური მნიშვნელობა მეზობელ წერტილებში მის მნიშვნელობებთან შედარებით.

რაც უფრო ღრმაა ორმო, მით მეტია მდგრადობა. ენერგიის მუდმივობის კანონი ჩვენთვის ცნობილია, ამიტომ უცბადვე შეიძლება ითქვას, რა პირობებში ამოგორდება სხეული ღრმულიდან. ამისათვის სხეულს უნდა მივანიჭოთ კინეტიკური ენერგია, რომელიც საკმარისი იქნება მის ამოსაყვანად ორმოს პირამდე. რაც უფრო ღრმაა ორმო, მით მეტი კინეტიკური ენერგიაა საჭირო მდგრადი წონასწორობის დასარღვევად.

მარტივი რხევები

თუ ჩაღრმავებაში მოთავსებულ ბურთულას ვუბიძგებთ, იგი ზევით ასვლას დაიწყებს და ამასთან კინეტიკურ ენერგიას თანდათანობით დაკარგავს. როდესაც ეს ენერგია მთლიანად დაიკარგება, ბურთულა მყისიერად გაჩერდება და ქვემოთ დაეშვება. ახლა უკვე პოტენციალური ენერგია გადავა კინე-

ტიკურში. ბურთულა მოიკრებს სიჩქარეს, ინერციით გაირბენს წონასწორობის მდებარეობას და კვლავ დაიწყებს ზევით ასვლას, მხოლოდ მოპირდაპირე მხარეს. თუ ხახუნი უმნიშვნელოა, „ზევით-ქვევით“ ასეთი მოძრაობა შეიძლება ძალიან დიდხანს გაგრძელდეს, ხოლო იდეალურ შემთხვევაში — როდესაც ხახუნი არ არის — იგი არასოდეს არ შეწყდება.

ამრიგად, მდგრადი წონასწორობის მდებარეობის მახლობლად მოძრაობას ყოველთვის რხევის ხასიათი აქვს.

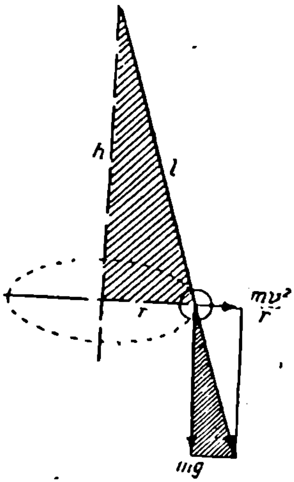
რხევის შესწავლისთვის ქანქარა უფრო გამოგვადგება, ვიდრე ბურთულა, რომელიც ორმოში გორავს. თუგინდ იმიტომაც, რომ ქანქარასათვის უფრო ადვილია ხახუნის მინიმუმამდე დაყვანა.

როდესაც ქანქარას ტვირთი განაპირა მდებარეობაშია გადახრილი, მისი სიჩქარე და კინეტიკური ენერგია ნულის ტოლია. პოტენციალური ენერგია ამ მომენტში მაქსიმალურია. ტვირთი მიდის ქვევით — პოტენციალური ენერგია მცირდება და კინეტიკურში გადადის. მაშასადამე, მოძრაობის სიჩქარეც იზრდება. როდესაც ტვირთი უმდაბლეს მდებარეობაზე გაივლის, მისი პოტენციალური ენერგია უმცირესი იქნება და შესაბამისად კინეტიკური ენერგია და სიჩქარე — მაქსიმალური. შემდგომი მოძრაობის პროცესში ტვირთი კვლავ ზევით ავა. ახლა სიჩქარე მცირდება, პოტენციალური ენერგია მატულობს.

თუ ხახუნთან დაკავშირებულ დანაკარგს არ გავითვალისწინებთ, მაშინ ტვირთი იმავე მანძილზე გადაიხრება მარჯვნივ, რა მანძილზედაც იყო იგი თავდაპირველად მარცხნივ გადახრილი. პოტენციალური ენერგია კინეტიკურში გადავიდა და შემდგომ წარმოიშვა იგივე რაოდენობის „ახალი“ პოტენციალური ენერგია. ჩვენ აღვწერეთ ერთი რხევის პირველი ნახევარი. მეორე ნახევარიც ასევე მიმდინარეობს, მხოლოდ ტვირთი საწინააღმდეგო მხარეს მოძრაობს.

რხევითი მოძრაობა განმეორებად ან, როგორც ამბობენ. პერიოდულ მოძრაობას წარმოადგენს. საწყის წერტილში დაბრუნების შემდეგ ტვირთი ყოველთვის იმეორებს თავის მოძრაობას (თუ მხედველობაში არ მივიღებთ ხახუნით გამოწვეულ ცვლილებებს) როგორც გზის, ისე სიჩქარისა და აჩქა-

რების მხრივაც. დრო, რომელიც ერთ რხევაზე, ე. ი. საწყის წერტილში დაბრუნებაზე იხარჯება, ერთნაირია პირველი, მეორე და ყველა შემდგომი რხევისთვის. ეს დრო რხევის ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი მახასიათებელია, მას პერიოდი ეწოდება და T ასოთი აღინიშნება. T დროის შემდეგ მოძრაობა მეორდება, ე. ი. T დროის შემდეგ მერხევი სხეული ყოველთვის სივრცის იმავე ადგილზეა და იმავე მიმართულებით მოძრაობს. ნახევარი პერიოდის შემდეგ სხეულის გადანაცვლება და აგრეთვე მოძრაობის მიმართულება ნიშანს შეიცვლის. რადგანაც T არის ერთი რხევისათვის საჭირო დრო, ამიტომ დროის ერთეულში რხევათა რიცხვი n ტოლი იქნება $\frac{1}{T}$. რაზეა დამოკიდებული მდგრადი წონასწორობის მდებარეობის მახლობლად მოძრავი სხეულის რხევის პერიოდი, კერძოდ, ქანქარას რხევის პერიოდი? ეს საკითხი პირველად გალილეიმ დასვა და გადაჭრა და ჩვენც ახლა გალილეის ფორმულას გამოვიყვანთ.



ნახ. 42.

მაგრამ ძნელია მექანიკის კანონების ელემენტარული გზით გამოყენება არათანაბრად აჩქარებული მოძრაობისათვის. ამიტომ, ამ სიძნელეს რომ გვერდი ავუაროთ, ვაიძულოთ ქანქარას ტვირთი ვერტიკალურ სიბრტყეში რხევის ნაცვლად წრეხაზი შემოწეროს, ისე რომ ყოველთვის ერთ სიმაღლეზე დარჩეს. ასეთი მოძრაობის განხორციელება არ არის ძნელი, საჭიროა მხოლოდ წონასწორობის მდგომარეობიდან გამოყვანილ ქანქარას ზუსტად გადახრის რადიუსის მართობი მიმართულებით მივცეთ საწყისი ბიძგი და ამ ბიძგის ძალა შევარჩიოთ.

ნახ. 42-ზე გამოხატულია ასეთი „წრიული ქანქარა“.

m მასის ტვირთი წრეხაზზე მოძრაობს, ე. ი. სიმძიმის mg ძალის გარდა მასზე მოქმედებს ცენტრიდანული ძალა $m\frac{v^2}{r}$, რომელიც შეგვიძლია ასეთი სახითაც წარმოვიდგინოთ — $4\pi^2n^2rm$. აქ n — წამში შესრულებული ბრუნვების რიცხვია. ამიტომ ცენტრიდანული ძალის გამოსახულება ასეც შეიძლება ჩაიწეროს: $m\frac{4\pi^2r}{T^2}$. ამ ორი ძალის ტოლქმედი ჭიმავს ქანქარის ძაფს.

ნახატზე დაშტრიხულია ორი მსგავსი სამკუთხედი — ძალების სამკუთხედი და მანძილების სამკუთხედი. შესაბამისი კათეტების ფარდობები ტოლია, მაშასადამე,

$$\frac{mgT^2}{m\,4\pi^2r}=\frac{h}{r} \quad \text{ანუ} \quad T=2\pi\sqrt{\frac{h}{g}}.$$

მაშ რაზე ყოფილა დამოკიდებული ქანქარის რხევის პერიოდი? თუ ჩვენ ცდებს დედამიწის ერთსა და იმავე ადგილზე ვატარებთ (g არ იცვლება), მაშინ რხევის პერიოდი დამოკიდებულია მხოლოდ ჩამოკიდების წერტილსა და ტვირთის მოთავსების წერტილს შორის სიმაღლეთა სხვაობაზე. ტვირთის მასა, როგორც ყოველთვის, სიმძიმის ველში, რხევის პერიოდზე გავლენას არ ახდენს.

საინტერესოა შემდეგი გარემოება. ჩვენ ვსწავლობთ მოძრაობას მდგრადი წონასწორობის მახლობლად. მცირე გადახრის შემთხვევაში კი სიმაღლეთა სხვაობა h შეიძლება ქანქარას l სიგრძით შევცვალოთ. ამის შემოწმება ადვილია. თუ ქანქარის სიგრძე 1 მ, ხოლო გადახრის რადიუსი — 1 სმ, მაშინ

$$h=\sqrt{10\,000-1}=99{,}995 \text{ სმ}.$$

1% ტოლი განსხვავება h და l შორის მიიღება მხოლოდ 14 სმ ტოლი გადახრის შემთხვევაში. ამრიგად, თუ წონასწორობის მდგომარეობიდან გადახრა მეტისმეტად დიდი არ არის, ქანქარას თავისუფალი რხევების პერიოდი ტოლია

$$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}};$$

ე. ი. დამოკიდებულია მხოლოდ ქანქარას სიგრძეზე და სიმძიმის ძალის აჩქარების მნიშვნელობაზე იმ ადგილას, სადაც ცდა ტარდება, მაგრამ არ არის დამოკიდებული ქანქარას წონასწორობის მდგომარეობიდან გადახრის სიდიდეზე.

ფორმულა $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ დამტკიცებულია წრიული ქანქარასთვის; როგორიღა იქნება იგი ჩვეულებრივი „ბრტყელი" ქანქარასათვის? თურმე ფორმულა ინარჩუნებს თავის სახეს. ამას ჩვენ მკაცრად არ დავამტკიცებთ, მაგრამ მივაქციოთ ყურადღება იმას, რომ ტვირთის ჩრდილი, რომელსაც წრიული ქანქარა კედელზე ფენს, თითქმის ისევე ირხევა, როგორც ბრტყელი ქანქარა: ჩრდილი სწორედ იმ დროის განმავლობაში ასრულებს ერთ რხევას, რომელიც ბურთულას სჭირდება წრეხაზის შემოსაწერად.

წონასწორობის მახლობლად მცირე რხევების გამოყენება საშუალებას გვაძლევს ძალიან დიდი სიზუსტით გავზომოთ დრო.

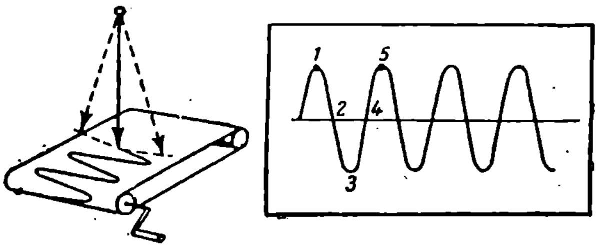
გადმოცემის თანახმად, ქანქარას რხევის პერიოდის დამოუკიდებლობა ამპლიტუდისა და მასისაგან გალილეიმ დაადგინა ტაძარში წირვის დროს, როცა ორი უზარმაზარი ჭაღის რხევას აკვირდებოდა.

ამრიგად, ქანქარას რხევის პერიოდი მისი სიგრძიდან კვადრატული ფესვის პროპორციულია. მაგალითად, მეტრიანი ქანქარას რხევის პერიოდი ორჯერ მეტია 25 სმ სიგრძის ქანქარას რხევის პერიოდზე. ამას გარდა, ქანქარას რხევის პერიოდის ფორმულიდან გამომდინარეობს, რომ ერთი და იგივე ქანქარა დედამიწის სხვადასხვა განედზე ერთნაირად სწრაფად არ იქანავებს. ეკვატორთან მიახლოებისას სიმძიმის ძალის აჩქარება მცირდება და რხევის პერიოდიც მატულობს.

რხევის პერიოდი შეიძლება ძალიან დიდი სიზუსტით გაიზომოს. ამიტომ ქანქარას საშუალებით ჩატარებული ცდები საშუალებას იძლევა სიმძიმის ძალის აჩქარებაც ძალიან ზუსტად გაიზომოს.

რხევების გაშლა

ქანქარას ტვირთის ქვედა ნაწილზე მივამაგროთ რბილი გრიფელი და ქანქარა ისე ჩამოვკიდოთ ქაღალდის ფურცლის თავზე, რომ გრიფელი ქაღალდს შეეხოს (ნახ.43). ახლა ოდნავ გადავხაროთ ქანქარა. მერხევი გრიფელი ქაღალდზე გახაზავს სწორი ხაზის პატარა მონაკვეთს. რხევის შუა ადგილზე, როდესაც ქანქარა წონასწორობის მდებარეობაზე გაივლის, ფანქრის მიერ გავლებული ხაზი უფრო მსხვილი იქნება, რადგანაც ამ მდებარეობაში გრიფელი უფრო ძლიერ დააჭერს ქა-



ნახ. 43.

ღალდს. თუ ქაღალდის ფურცელს გავაცურებთ რხევის სიბრტყის პერპენდიკულარული მიმართულებით, მოიხაზება ნახ. 43-ზე გამოსახული მრუდი. ადვილი მისახვედრია, რომ მიღებული ტალღები ახლო-ახლოს იქნება განლაგებული, თუ ქაღალდს ნელა და შორი-შორს გავაცურებთ, თუ ქაღალდის ფურცელი მნიშვნელოვანი სიჩქარით იმოძრავებს. იმისათვის, რომ მიღებულ მრუდს აკურატული სახე ჰქონდეს, ისეთი, როგორიც ნახატზეა, საჭიროა, ქაღალდის ფურცელი ზუსტად თანაბრად ვამოძრაოთ.

ამ ხერხით ჩვენ თითქოს „გავშლით" რხევებს.

გაშლა იმისთვის არის საჭირო, რომ ვთქვათ, სად იმყოფებოდა და საით მოძრაობდა ქანქარას ტვირთი დროის ამა თუ იმ მომენტში. წარმოიდგინეთ, რომ ქაღალდი მოძრაობს 1 სმ/წმ სიჩქარით იმ მომენტიდან, როდესაც ქანქარა განაპირა მდებარეობაში იმყოფება, მაგალითად, შუა წერტილიდან მარ-

ცხხივ. ჩვენს გრაფიკზე ეს საწყისი მდებარეობა შეესაბამება 1-თ აღნიშნულ წერტილს. $1/4$ პერიოდის შემდეგ ქანქარა გაივლის შუა წერტილს. ამ დროის განმავლობაში ქაღალდი გადაინაცვლებს სანტიმეტრების რიცხვზე, რომელიც $\frac{1}{4}T$ ტოლია (წერტილი 2 ნახატზე). ახლა ქანქარა მარჯვნივ მოძრაობს, ერთდროულად მისრიალებს ქაღალდიც. როდესაც ქანქარა მარჯვენა განაპირა მდებარეობაში მივა, ქაღალდი გადაინაცვლებს სანტიმეტრების რიცხვზე, რომელიც $\frac{1}{2}T$ ტოლია (წერტილი 3 ნახატზე). ქანქარა კვლავ შუა წერტილისკენ მიდის და $\frac{3}{4}T$ შემდეგ წონასწორობის მდებარეობაში ხვდება (წერტილი 4 ნახატზე). წერტილი 5 აბოლოებს სრულ რხევას და შემდეგ მოვლენა მეორდება ყოველი T წამის, ან გრაფიკზე ყოველი T სანტიმეტრის მერე.

ამრიგად, ვერტიკალური ხაზი გრაფიკზე წერტილის წონასწორობის მდებარეობიდან გადანაცვლებათა სკალაა, ჰორიზონტალური შუა ხაზი — დროის სკალა.

ასეთი გრაფიკიდან ადვილად შეიძლება ორი სიდიდის პოვნა, რომლებიც ამომწურავად ახასიათებენ რხევას. პერიოდი განისაზღვრება როგორც მანძილი ორ ტოლფას წერტილს შორის, მაგალითად, ორ უახლოეს მწვერვალს შორის. ასევე უცებ იზომება წერტილის უდიდესი გადანაცვლება წონასწორობის წერტილიდან. ამ გადანაცვლებას რხევის ამპლიტუდა ეწოდება.

რხევის გაშლა, გარდა ამისა, საშუალებას გვაძლევს პასუხი გავცეთ ზემოთ დასმულ კითხვაზე: სად იმყოფება მერხევი წერტილი დროის ამა თუ იმ მომენტში. მაგალითად, სად იქნება იგი 11 წამის შემდეგ, თუ რხევის პერიოდი 3 წამია, ხოლო მოძრაობა დაიწყო მარცხენა განაპირა მდებარეობიდან? ყოველი 3 წამის შემდეგ რხევა იმავე წერტილიდან იწყება. მაშინ, 9 წამის შემდეგ სხეული ისევ მარცხენა განაპირა მდებარეობაში იქნება.

ამიტომ არ არის საჭირო გრაფიკი, რომელზეც მრუდი რამდენიმე პერიოდზეა გაგრძელებული. სავსებით საკმარისია

ნახაზი, სადაც გამოსახულია ერთი რხევის შესაბამისი მრუდი. მერხევი წერტილის მდგომარეობა 11 წამის შემდეგ, თუ პერიოდი 3 წამია, ისეთივე იქნება, როგორც 2 წამის შემდეგ. თუ ნახაზზე 2 სმ გადავზომავთ (ჩვენ ხომ შევთანხმდით, რომ ქაღალდის გაცურების სიჩქარე 1 სმ/წმ ტოლია, სხვანაირად რომ ვთქვათ, ნახაზის მასშტაბი ასეთია — 1 სმ ტოლია 1 წმ), ვნახავთ, რომ 11 წამის შემდეგ წერტილი იმყოფება გზაში მარჯვენა განაპირა მდებარეობიდან წონასწორობის მდებარეობისაკენ. გადანაცვლების სიდიდეს ამ მომენტისათვის ნახატიდან ვპოულობთ.

როცა წერტილი წონასწორობის მდებარეობის მახლობლად მცირე რხევებს ასრულებს მისი გადანაცვლების საპოვნელად, აუცილებელი არ არის გრაფიკის მიშველიება. თეორია გვიჩვენებს, რომ ამ შემთხვევაში გადანაცვლების დროისაგან დამოკიდებულების მრუდი სინუსოიდს წარმოადგენს. თუ წერტილის გადანაცვლებას y აღვნიშნავთ, ამპლიტუდას — a, რხევის პერიოდს — T, მაშინ გადანაცვლების მნიშვნელობა რხევის დაწყებიდან t დროის შემდეგ გამოითვლება ფორმულით:

$$y = a \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T}.$$

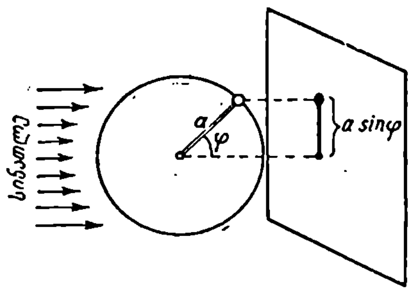
ასეთი კანონით შესრულებულ რხევას ჰარმონიული ეწოდება. სინუსის არგუმენტი ტოლია 2π ნამრავლისა $\frac{t}{T}$-ზე.

$2\pi \frac{t}{T}$ სიდიდეს ფაზა ეწოდება.

თუ ხელთა გვაქვს ტრიგონომეტრიული ტაბულები და ვიცით პერიოდი და ამპლიტუდა, ადვილია წერტილთა გადანაცვლების სიდიდის გამოანგარიშება და ფაზის მნიშვნელობის მიხედვით წერტილის მოძრაობის მიმართულების გაგება.

ძნელი არ არის რხევითი მოძრაობის ფორმულის გამოყვანა, თუ განვიხილავთ ჩრდილს, რომელსაც წრეხაზზე მოძრავი ტვირთი იძლევა კედელზე.

ჩრდილის გადანაცვლება შუა მდებარეობიდან უნდა გავზომოთ. განაპირა მდებარეობებში გადანაცვლება y წრეხაზის a რადიუსის ტოლია. ეს ჩრდილის რხევის ამპლიტუდაა.



ნახ. 44.

თუ შუა მდებარეობიდან ტვირთმა წრეხაზზე φ კუთხე გაიარა, მაშინ მისი ჩრდილი (ნახ. 44) შუა წერტილს დასცილდება $a \cdot \sin\varphi$ სიდიდით.

ვთქვათ, ტვირთის მოძრაობის პერიოდი რომელიც, რასაკვირველია, ჩრდილის რხევის პერიოდიცაა) არის T, ეს ნიშნავს იმას, რომ 2π რადიანს ტვირთი T დროში გადის. შეიძლება შევადგინოთ პროპორცია $\frac{\varphi}{t}=\frac{2\pi}{T}$ სადაც t არის φ კუთხით მობრუნების დრო.

ამრიგად, $\varphi=\frac{2\pi t}{T}$ და $y=a\sin\frac{2\pi t}{T}$. ჩვენც სწორედ ამის დამტკიცება გვინდოდა.

მერხევი წერტილის სიჩქარეც აგრეთვე სინუსის კანონით იცვლება. ასეთ დასკვნამდე მიგვიყვანს იგივე მსჯელობა იმ ტვირთის ჩრდილის მოძრაობის შესახებ, რომელიც წრეხაზს აღწერს. ასეთი ტვირთის სიჩქარეა უცვლელი v_0 სიგრძის ვექტორი. სიჩქარის ვექტორი ტვირთთან ერთად ბრუნავს. წარმოვიდგინოთ სიჩქარის ვექტორი მატერიალური ისრის სახით, რომელსაც ჩრდილის მოცემა შეუძლია. ტვირთის განაპირა მდებარეობაში ვექტორი სინათლის სხივის გასწვრივ განლაგდება და ჩრდილს არ მოგვცემს. როდესაც ტვირთი წრეხაზზე Θ კუთხეს გაივლის, სიჩქარის ვექტორი იმავე კუთხით მობრუნდება და მისი პროექცია $v_0\sin\Theta$ ტოლი იქნება. მაგრამ იმავე საფუძველზე, რა საფუძველსაც ადრე ვეყრდნობოდით,

$\frac{s}{t}=\frac{2\pi}{T}$ და, მაშასადამე, მერხევი სხეულის სიჩქარის მყისი მნიშვნელობა

$$v=v_0 \sin \frac{2\pi}{T} t.$$

ყურადღება მივაქციოთ იმას, რომ გადანაცვლების სიდიდის განსასაზღვრავ ფორმულაში დროის ათვლა იწყება შუა მდებარეობიდან, ხოლო სიჩქარის ფორმულაში — განაპირა მდებარეობიდან. ქანქარას გადანაცვლება ნულის ტოლია ტვირთის შუა მდებარეობის დროს, ხოლო რხევის სიჩქარე — განაპირა მდებარეობაში.

რხევის სიჩქარის v_0 ამპლიტუდასა (ხანდახან ამბობენ — სიჩქარის ამპლიტუდურ მნიშვნელობასა) და გადანაცვლების ამპლიტუდას შორის უბრალო კავშირი არსებობს: $2\pi a$ სიგრძის წრეხაზს ტვირთი რხევის T პერიოდის ტოლ დროში აღწერს. ამრიგად, $v_0=\frac{2\pi a}{T}$ და $v=\frac{2\pi a}{T} \sin \frac{2\pi}{T} t.$

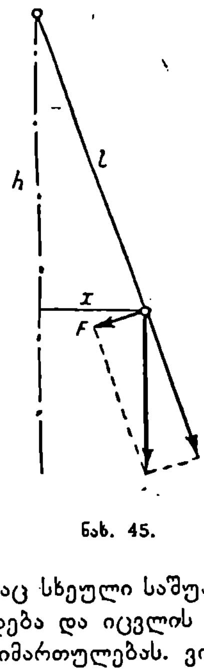
ძალა და პოტენციალური ენერგია რხევის დროს

ყოველგვარი რხევის დროს წონასწორობის მდებარეობის მახლობლად სხეულზე მოქმედებს ძალა, რომელსაც „სურს" სხეულის დაბრუნება წონასწორობის მდებარეობაში. როდესაც წერტილი ამ ადგილს შორდება, ძალა აყოვნებს მოძრაობას, როდესაც წერტილი უახლოვდება მას, ძალა აჩქარებს მოძრაობას.

დავუკვირდეთ ამ ძალას ქანქარას მაგალითზე. ქანქარას ტვირთი იმყოფება სიმძიმის ძალისა და ძაფის დაჭიმულობის ძალის გავლენის ქვეშ. სიმძიმის ძალა ორ მდგენელად დავშალოთ: ერთი მიმართული იყოს ძაფის გასწვრივ, მეორე — მისდამი პერპენდიკულარულად და ტრაექტორიისადმი მხების გასწვრივ. მოძრაობისთვის არსებითია სიმძიმის ძალის მხოლოდ მხები მდგენელი. სწორედ ის წარმოადგენს ამ შემთხვე-

ვაში უკუდამბრუნ ძალას. რაც შეეხება ძაფის გასწვრივ მიმართულ ძალას, იგი წონასწორდება უკუქმედებით ლურსმნის მხრივ, რომელზედაც ქანქარა ჰკიდია, და მისი მხედველობაში მიღება მხოლოდ მაშინ არის საჭირო, როდესაც გვაინტერესებს საკითხი, გაუძლებს თუ არა ძაფი მერხევი სხეულის სიმძიმეს.

აღვნიშნოთ x ტვირთის გადანაცვლების სიდიდე. გადანაცვლება რკალის გასწვრივ ხდება, მაგრამ ჩვენ ხომ შევთანხმდით რხევები წონასწორობის მდებარეობის მახლობლად განვიხილოთ. ამიტომ არ ვასხვავებთ რკალის გასწვრივ გადანაცვლებას და ტვირთის გადახრას ვერტიკალიდან. განვიხილოთ ორი მსგავსი სამკუთხედი (ნახ. 45). შესაბამისი კათეტების ფარდობა ჰიპოტენუზების ფარდობის ტოლია, ე. ი.



ნახ. 45.

$$\frac{F}{x}=\frac{mg}{l} \text{ ანუ } F=\frac{mg}{l}\cdot x.$$

$\frac{mg}{l}$ სიდიდე რხევის დროს არ იცვლება. ეს მუდმივი სიდიდე x ასოთი აღვნიშნოთ, მაშინ უკუდამბრუნი ძალა ტოლი იქნება $F=kx$. ჩვენ მივდივართ შემდეგ მნიშვნელოვან დასკვნამდე: უკუდამბრუნი ძალის სიდიდე მერხევი წერტილის წონასწორობის მდებარეობიდან გადანაცვლების სიდიდის პირდაპირ პროპორციულია. უკუდამბრუნი ძალა მაქსიმალურია მერხევი სხეულის განაპირა მდებარეობაში. როდესაც სხეული საშუალო წერტილზე გადის, ძალა ნულს უტოლდება და იცვლის ნიშანს, ან, სხვანაირად რომ ვთქვათ, თავის მიმართულებას. ვიდრე სხეული მარჯვნივ არის გადახრილი, ძალა მიმართულია მარცხნივ, და პირუკუ.

ქანქარა მერხევი სხეულის უმარტივეს მაგალითს წარმოადგენს. მაგრამ ჩვენ გვინდა მიღებული ფორმულები და კანონები ნებისმიერ რხევებზე გავავრცელოთ.

ქანქარას რხევის პერიოდი გამოსახული იყო მისი სიგრძის საშუალებით. ასეთი ფორმულა მხოლოდ ქანქარასათვის არის გამოსაყენებელი. მაგრამ ჩვენ შეგვიძლია თავისუფალი რხევების პერიოდი უკუდამბრუნი ძალის k მუდმივის საშუალებით გამოვსახოთ. რადგანაც $k=\frac{mg}{l}$, ამიტომ $\frac{l}{g}=\frac{m}{k}$, და, მაშასადამე,

$$T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

ეს ფორმულა რხევის ყველა შემთხვევაზე ვრცელდება, რადგანაც ნებისმიერი თავისუფალი რხევა უკუდამბრუნი ძალის გავლენით სრულდება.

ახლა ქანქარას პოტენციალური ენერგია წონასწორობის მდგომარეობიდან x გადახრის საშუალებით გამოვსახოთ. ტვირთის პოტენციალური ენერგია, როდესაც ის უმდაბლეს წერტილზე გადის, შეიძლება ნულის ტოლად მივიღოთ და ზეასვლის სიმაღლის ათვლა ამ წერტილიდან დავიწყოთ. თუ h-ით აღვნიშნავთ სიმაღლეთა სხვაობას ქანქარას დამაგრების წერტილსა და გადახრილი ტვირთის მდებარეობას შორის, მაშინ პოტენციალური ენერგია ასე ჩაიწერება: $U=mg(l-h)$, ან, კვადრატების სხვაობის ფორმულის გამოყენებით,

$$U=mg\cdot\frac{l^2-h^2}{l+h}.$$

მაგრამ, როგორც ნახატიდან ჩანს, $l^2-h^2=x^2$, l და h მცირედ განსხვავდებიან და ამიტომ $l+h$ ნაცვლად შეიძლება $2l$ ჩავსვათ. მაშინ $U=\frac{mg}{2l}x^2$, ანუ

$$U=\frac{kx^2}{2}.$$

მერხევი სხეულის პოტენციალური ენერგია სხეულის წონასწორობის მდებარეობიდან გადანაცვლების კვადრატის პროპორციულია.

შევამოწმოთ მიღებული ფორმულის სისწორე. პოტენციალური ენერგიის დანაკლისი უკუდამბრუნი ძალის მუშაობის

ტოლი უნდა იყოს. განვიხილოთ სხეულის ორი მდებარეობა — x_2 და x_1. პოტენციურ ენერგიათა სხვაობა

$$U_2 - U_1 = \frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2} = \frac{k}{2}(x_2^2 - x_1^2)$$

კვადრატების სხვაობა შეიძლება ჩაიწეროს როგორც ჯამის ნამრავლი სხვაობაზე. ამიტომ

$$U_2 - U_1 = \frac{k}{2}(x_2 + x_1)(x_2 - x_1) = \frac{kx_2 + kx_1}{2}(x_2 - x_1).$$

მაგრამ $x_2 - x_1$ სხეულის მიერ გავლილი გზა არის, kx_1 და kx_2 — უკუდამბრუნი ძალის მნიშვნელობა მოძრაობის დასაწყისში და ბოლოში, ხოლო $\frac{kx_1 + kx_2}{2}$ საშუალო ძალის ტოლია.

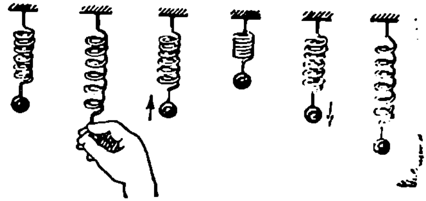
ჩვენმა ფორმულამ სწორ შედეგთან მიგვიყვანა: პოტენციალური ენერგიის დანაკარგი შესრულებული მუშაობის ტოლია.

ზამბარის რხევა

ბურთულა ადვილად დაიწყებს რხევას, თუკი მას ზამბარაზე ჩამოვკიდებთ. დავამაგროთ ზამბარის ერთი ბოლო და ბურთულა ქვევით დავწიოთ (ნახ. 46). ზამბარა გაჭიმული იქნება მანამდე, ვიდრე ჩვენ ზამბარას ქვევით ვეწევით. როგორც კი ხელს გავუშვებთ, ზამბარა დაიწყებს დამოკლებას, ხოლო ბურთულა — მოძრაობას წონასწორობის მდებარეობისაკენ. ქანქარას მსგავსად, არც ზამბარა გადადის უცბად უძრაობის მდგომარეობაში. ინერციით გავლილი წონასწორობის მდებარეობის შემდეგ ზამბარა შეიკუმშება, ბურთულის მოძრაობა შენელდება და რომელიღაც მომენტში ბურთულა მთლად გაჩერდება, რომ მაშინვე შებრუნებული მიმართულებით დაიწყოს მოძრაობა. წარმოიშობა იმავე ტიპიური ნიშნებიანი რხევა, რომლებსაც ჩვენ ქანქარას შესწავლისას გავეცანით.

ხახუნი რომ არ იყოს, რხევა უსასრულოდ გაგრძელდებოდა. ხახუნის გამო რხევები მიილევა და, ამასთან, მით უფრო სწრაფად, რაც მეტი იქნება ხახუნი.

ხშირად ზამბარისა და ქანქარას როლები ანალოგიურია. ერთიც და მეორეც საათში პერიოდის მუდმივობის დაცვას ემსახურება. თანამედროვე ზამბარიანი საათის ზუსტი სვლა უზრუნველყოფილია პატარა მქნევარა ბორბალ-ბალანსის რხევითი მოძრაობით. მის რხევას იწვევს ზამბარა, რომელიც დღე-ღამის განმავლობაში ათეულ ათასჯერ იკუმშება და იშლება. ძაფზე ჩამოკიდებული ბურთულისათვის უკუდამბრუნი ძალის როლს სიმძიმის ძალის მხები მდგენელი ასრულებდა. ზამბარაზე დამაგრებული ბურთულისათვის უკუდამბრუნ ძალას წარმოადგენს შეკუმშული ან გაჭიმული ზამბარის დრეკადობის ძალა. ამრიგად, დრეკადი ძალის სიდიდე გადანაცვლების პირდაპირპროპორციულია: $F = kx$.



ნახ. 46.

k კოეფიციენტს ამ შემთხვევაში სხვა აზრი აქვს. ახლა ის ზამბარის სიხისტეა. ხისტი ზამბარა ისეთი ზამბარაა, რომლის გაშლა ან შეკუმშვა ძნელია. სწორედ ასეთი აზრი აქვს k კოეფიციენტს. ფორმულიდან ცხადია: k ტოლია ძალისა, რომელიც საჭიროა ზამბარის გასაშლელად ან შესაკუმშად სიგრძის ერთეულზე.

როცა ვიცით ზამბარის სიხისტე და მასზე ჩამოკიდებული ტვირთის მასა, $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ ფორმულის დახმარებით ვიპოვით თავისუფალი რხევის პერიოდს. მაგალითად, ტვირთი, რომლის მასაა 10 გ, 10^5 დინ/სმ სიხისტის მქონე ზამბარაზე (ეს საკმაოდ ხისტი ზამბარაა — ასგრამიანი საწონი მას 1 სმ გაჭიმავს) $T = 6{,}28 \cdot 10^{-2}$ წმ პერიოდით იწყებს რხევას, ე. ი. ერთ წამში 16 რხევა შესრულდება.

რაც უფრო რბილია ზამბარა, მით უფრო ნელია რხევა. იგივე შედეგს გვაძლევს ტვირთის მასის გადიდებაც.

ზამბარაზე დაკიდებული ბურთულისათვის გამოვიყენოთ ენერგიის მუდმივობის კანონი.

ჩვენ ვიცით, რომ ქანქარასათვის კინეტიკური და პოტენციური ენერგიების ჯამი $K+U$ არ იცვლება.

$$K+U \quad \text{ინახება.}$$

ჩვენ ვიცით K და U მნიშვნელობები ქანქარასათვის. ენერგიის მუდმივობის კანონი ამბობს, რომ

$$\frac{mv^2}{2}+\frac{kx^2}{2} \quad \text{ინახება.}$$

მაგრამ ეს სამართლიანია ზამბარაზე დაკიდებული ბურთულისათვის.

დასკვნა, რომელიც ჩვენ უცილობლად უნდა გავაკეთოთ, საკმაოდ საინტერესოა.

გარდა იმ პოტენციური ენერგიისა, რომელსაც ადრე გავეცანით, არსებობს სხვაგვარი პოტენციური ენერგიაც. პირველს მიზიდულობის პოტენციური ენერგია ეწოდება. ზამბარას რომ ჰორიზონტალური მდგომარეობა ჰქონოდა, მაშინ რხევის დროს მიზიდულობის პოტენციური ენერგია, ცხადია, არ შეიცვლებოდა. ჩვენს მიერ აღმოჩენილ ახალ პოტენციურ ენერგიას დრეკადობის პოტენციური ენერგია ეწოდება. ამ შემთხვევაში იგი უდრის $\frac{Kx^2}{2}$ ე. ი. დამოკიდებულია ზამბარის სიხისტისაგან და პირდაპირ პროპორციული შეკუმშვის ან დაგრძელების სიდიდის კვადრატისა.

რხევის სრული ენერგია, რომელიც უცვლელი რჩება, ასეთი სახით შეიძლება ჩაიწეროს:

$$E=\frac{ka^2}{2}, \text{ ან } E=\frac{mv_0^2}{2}.$$

უკანასკნელ ფორმულაში შემავალი a და v_0 სიდიდეები წარმოადგენენ მაქსიმალურ სიდიდეებს, რომლებსაც გადანაცვლება და სიჩქარე იძენენ რხევის დროს, ისინი გადანაცვლებისა და სიჩქარის ამპლიტუდური მნიშვნელობებია. ამ ფორმულების წარმომავლობა სავსებით გასაგებია. კიდურა მდე-

ბარეობაში, როდესაც $x=a$ რხევის კინეტიკური ენერგია ნულის ტოლია და სრული ენერგია პოტენციური ენერგიის მნიშვნელობას უდრის. შუა მდებარეობაში წონასწორობის მდებარეობიდან წერტილის გადანაცვლება და, მაშასადამე, პოტენციური ენერგიაც ნულის ტოლია, სიჩქარე ამ მომენტში მაქსიმალურია, $v=v_0$ და სრული ენერგია კინეტიკურის ტოლია.

რხევების შემსწავლელი მოძღვრება — ფიზიკის ვრცელი დარგია. ქანქარებსა და ზამბარებთან ძალიან ხშირად გვაქვს საქმე. მაგრამ, რასაკვირველია, ამით არ ამოიწურება იმ სხეულთა სია, რომელთა რხევებიც უნდა შევისწავლოთ. ირხევა საძირკვლები, რომლებზედაც მანქანებია დადგმული, შეიძლება რხევა დაიწყონ ხიდებმა, შენობის ნაწილებმა, კოჭებმა, მაღალი ძაბვის გამტარებმა. ბგერაც ხომ ჰაერის რხევებია.

ჩვენ აქ მექანიკური რხევის რამდენიმე მაგალითი ჩამოვთვალეთ. მაგრამ რხევის ცნება შეიძლება გავავრცელოთ არა მარტო სხეულების ან ნაწილაკების წონასწორობის მდებარეობიდან მექანიკურ გადანაცვლებებზე. რხევებს ადგილი აქვს ბევრ ელექტრულ მოვლენაშიც, ამასთან, ეს რხევები ისეთ კანონებს ემორჩილება, რომლებიც ძალიან ჰგავს ჩვენს მიერ ზემოთ განხილულ კანონებს. მოძღვრება რხევების შესახებ ფიზიკის ყველა დარგში იჭრება.

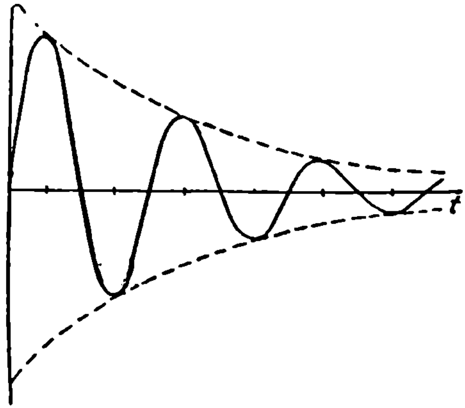
უფრო რთული რხევები

ის, რაც აქამდე იყო ნათქვამი, ეხება რხევებს წონასწორობის მდებარეობის მახლობლად. ასეთი რხევები სრულდება იმ უკუდამბრუნი ძალის გავლენით, რომლის სიდიდეც წონასწორობის მდებარეობიდან წერტილის დაშორების პირდაპირპროპორციულია. მსგავსი რხევები სინუსის კანონით ხორციელდება და მათ ჰარმონიული ეწოდება. ჰარმონიული რხევების პერიოდი არ არის დამოკიდებული ამპლიტუდაზე.

გაცილებით უფრო რთულია დიდი გასაქანიანი რხევები. ასეთი რხევები სინუსის კანონით არ სრულდება, მათი გაშლა იძლევა უფრო რთულ მრუდებს, რომლებიც სხვადასხვა მერხევი სისტემებისათვის სხვადასხვაა. პერიოდი უკვე აღარ არის

რხევის დამახასიათებელი თვისება და იგი ამპლიტუდაზეა დამოკიდებული.

ხახუნი არსებითად ნებისმიერ რხევას ცვლის. ხახუნის არსებობისას რხევები თანდათან მიილევა. რაც მეტია ხახუნი,



ნახ. 47.

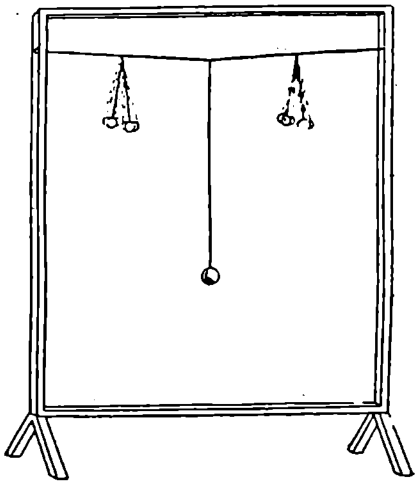
მით უფრო სწრაფია მილევაც. სცადეთ შეასრულებინოთ რხევა წყალში ჩაშვებულ ქანქარას: ერთი ორი რხევის მეტს ასეთი ქანქარა უთუოდ ვერ შეასრულებს. თუ ქანქარას ძალიან ბლანტ სითხეში ჩავუშვებთ, მაშინ შეიძლება მან სულაც არ დაიწყოს რხევა. გადახრილი ქანქარა უბრალოდ დაუბრუნდება წონასწორობის მდებარეობას. ნახ. 47-ზე ნაჩვენებია მილევადი რხევის ტიპიური გრაფიკი. ვერტიკალზე გადაზომილია წონასწორობის მდებარეობიდან გადახრა, ხოლო ჰორიზონტალზე — დრო. მილევადი რხევის ამპლიტუდა (მაქსიმალური გასაქანი) ყოველ რხევასთან ერთად მცირდება.

რეზონანსი

ბავშვი საქანელაზე დასვეს. იგი ფეხებით მიწას ვერ სწვდება. ბავშვი რომ გავაქანოთ, რასაკვირველია, შეიძლება მაღლა ავწიოთ საქანელა და შემდეგ ხელი გავუშვათ. მაგრამ ეს საკ-

მაოდ ძნელია და არც არის აუცილებელი: საკმარისია ნელა ვუბიძგოთ საქანელას რხევების ტაქტში, მალე იგი ძლიერად დაიწყებს ქანაობას. იმისათვის, რომ სხეულს ქანაობა დავაწყებინოთ, უნდა რხევის ტაქტში ვიმოქმედოთ, ე. ი. ისე უნდა მოვიქცეთ, რომ ბიძგებისა და საკუთარი რხევების პერიოდი ერთმანეთს დაემთხვეს. ამგვარ შემთხვევებში ლაპარაკობენ რეზონანსის შესახებ.

ბუნებასა და ტექნიკაში ფართოდ გავრცელებული რეზონანსის მოვლენა ყურადღებით განხილვას იმსახურებს.



ნახ. 48.

თქვენ შეგიძლიათ დაუკვირდეთ რეზონანსის ძალიან სახალისო და თავისებურ მოვლენას, თუ შემდეგ მოწყობილობას გააკეთებთ. დაჭიმეთ ძაფი ჰორიზონტალურად და ზედ სამი ქანქარა ჩამოკიდეთ (ნახ. 48)—ორი მოკლე, ერთნაირი სიგრძისა და ერთი გრძელი. ახლა გადახარეთ მოკლე ქანქარებიდან ერთ-ერთი და გაუშვით ხელი. რამდენიმე წამის შემდეგ დაინახავთ, რომ იმავე სიგრძის მეორე ქანქარაც თანდათანობით დაიწყებს რხევას. რამდენიმე წამიც და მეორე მოკლე ქანქარაც ისე იქანავებს, რომ ვეღარც კი შეატყობთ, რომელი ამოძრავდა პირველად.

რა ხდება? ტოლი სიგრძის ქანქარებს საკუთარი რხევის ტოლი პერიოდი აქვთ. პირველი ქანქარა იწვევს მეორის რხევას. რხევები ერთიდან მეორეს გადაეცემა მათი დამაკავშირებელი ძაფის საშუალებით. ჰო, მაგრამ ძაფზე ხომ კიდევ ერთი განსხვავებული სიგრძის ქანქარა ჰკიდია, იმას რაღა დაემართება? არაფერი. ამ ქანქარას პერიოდი სხვაა და მოკლე

ქანქარას არ შეუძლია მისი რხევის გამოწვევა. მესამე ქანქარა ისე დაესწრება ერთი ქანქარიდან მეორეში ენერგიის „გადასხმის“ საინტერესო მოვლენას, რომ მასში არავითარ მონაწილეობას არ მიიღებს.

მექანიკური რეზონანსის მოვლენას ყოველი თქვენგანი ხშირად შეხვედრია. მხოლოდ, შესაძლებელია, ყურადღება არ მიგიქცევიათ მისთვის. თუმცა ხანდახან რეზონანსი ძალზე მომაბეზრებელია ხოლმე. თქვენი ფანჯრების წინ ტრამვაიმ გაიარა, კარადაში კი ჭურჭელი აზრიალდა. რატომ? ნიადაგის რხევა გადაეცა შენობას და მასთან ერთად თქვენი ოთახის იატაკსაც, რხევა დაიწყო კარადამ და შიგ შელაგებულმა ჭურჭელმა. ასე შორს და ამდენი საგნის გავლით გავრცელდა რხევა რეზონანსის წყალობით. გარეგანი რხევები რეზონანსში მოხვდნენ სხეულების საკუთარ სიხშირეებთან. თითქმის ნებისმიერი ყღარუნი, რომელიც გვესმის ოთახში, ქარხანასა თუ ავტომანქანაში, რეზონანსის შედეგია.

რეზონანსის მოვლენა, ისევე როგორც მრავალი სხვა მოვლენა, შეიძლება სასარგებლოც იყოს და საზიანოც.

მანქანა დგას საძირკველზე. თანაბრად, გარკვეული პერიოდით მოძრაობს მისი ნაწილები. წარმოიდგინეთ, რომ ეს პერიოდი საძირკვლის საკუთარი სიხშირის პერიოდს ემთხვევა. რა მოხდება? საძირკველი საკმაოდ მალე მოირყევა და საქმე შეიძლება ცუდად დამთავრდეს.

ცნობილია ასეთი ფაქტი. პეტერბურგში ხიდზე ფეხშეწყობით მიდიოდა ჯარისკაცთა ასეული. ხიდი ჩაინგრა. დაიწყო გამოძიება. ხიდისა და ადამიანების ბედზე წუხილისათვის თითქოს საფუძველი არ არსებობდა: რამდენჯერ შეგროვილა ამ ხიდზე უფრო მეტი ხალხი, ნელა გაუვლიათ მძიმე ოთხთვალებს, რომელთა წონაც ბევრად აღემატებოდა ჯარისკაცთა ასეულის წონას.

მაგრამ სიმძიმის გავლენით ხიდი უმნიშვნელოდ იზნიქება. განუზომლად ძლიერ ჩაიზნიქება ხიდი, თუ მას გავაქანებთ. რხევის რეზონანსული ამპლიტუდა შეიძლება რამდენიმე ათასჯერ მეტი იყოს, ვიდრე ისეთივე უძრავი დატვირთვის მოქმედებით მიღებული გადანაცვლების სიდიდე.

გამოძიებამაც სწორედ ეს აჩვენა — ხიდის საკუთარი რხევის სიხშირე ჩვეულებრივი სამწყობრო ნაბიჯის პერიოდს ემთხვეოდა.

ამიტომ, როდესაც სამხედრო ნაწილი ხიდზე გადის, თავისუფლად სვლის განკარგულებას გასცემენ ხოლმე. ჯარისკაცები მწყობრად, შეთანხმებულად არ იმოძრავებენ, რეზონანსის მოვლენა არ დამყარდება და ხიდიც არ გაქანდება. ეს უბედური შემთხვევა ინჟინრებმა კარგად დაიხსომეს და ხიდების დაპროექტებისას ყოველთვის ცდილობენ, ხიდის თავისუფალი რხევების პერიოდი შორს იყოს სამწყობრო ნაბიჯის პერიოდისაგან.

სწორედ ასევე იქცევიან მანქანების საძირკვლების კონსტრუქტორებიც. ისინი ცდილობენ ისეთი საძირკველი გააკეთონ, რომ მისი რხევის პერიოდი რაც შეიძლება შორს იყოს მანქანის მოძრავი ნაწილების რხევის პერიოდისაგან.

VI. მყარი სხეულების მოძრაობა

ძალის მომენტი

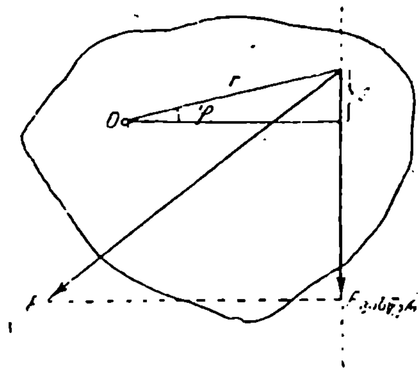
სცადეთ ხელით დააბრუნოთ მძიმე მქნევარა ბორბალი. ამისათვის თვლის მანა გადასწიეთ. თქვენ ეს გაგიჭირდებათ, თუ ხელს ღერძთან ძალიან ახლოს მიიტანთ. ხელი ფერსოსკენ გადაანაცვლეთ და საქმე გაადვილდება.

რა შეიცვალა? ძალა ხომ ორივე შემთხვევაში ერთი და იგივეა. შეიცვალა ძალის მოდების წერტილი.

ზემოთ მოყვანილი მასალის გადმოცემისას საკითხი ძალის მოდების ადგილის შესახებ არ წამოჭრილა, რადგანაც განხილულ ამოცანებში სხეულის ფორმასა და ზომას მნიშვნელო-

ბა არ ჰქონია. არსებითად ჩვენ წარმოსახვაში სხეულს წერტილით ვცვლიდით.

მბრუნავი ბორბლის მაგალითი გვიჩვენებს, რომ ძალის მოდების წერტილის საკითხს დიდი მნიშვნელობა აქვს, როცა საქმე ბრუნვას ან სხეულის მობრუნებას ეხება. იმისთვის, რომ გავიგოთ ძალის მოდების წერტილის როლი, გამოვითვალოთ რაიმე კუთხით სხეულის მოსაბრუნებლად საჭირო მუშაობა. ამ გამოთვლის დროს, რასაკვირველია, იგულისხმება, რომ მყარი სხეულის ყველა ნაწილაკი ხისტად არის ერთმანეთთან დაკავშირებული (ჯერჯერობით ჩვენ მხედველობაში არ ვიღებთ სხეულთა გაღუნვის ან შეკუმშვის, საერთოდ, ფორმის ცვლის უნარს). ამიტომ სხეულის ერთ წერტილზე მოდებული ძალა კინეტიკურ ენერგიას მიანიჭებს ყველა მის ნაწილს.



ნახ. 49.

ამ მუშაობის გამოთვლისას ძალის მოდების წერტილის როლი მკაფიოდ ჩანს.

ნახ. 49-ე ნაჩვენებია ღერძზე დამაგრებული სხეული. φ მცირე კუთხეზე სხეულის მობრუნების შედეგად ძალის მოდების წერტილმა რკალზე გადაინაცვლა — გაიარა s გზა.

თუ ძალას მოძრაობის მიმართულებაზე, ე. ი. იმ წრეხაზის მხებზე დავაგეგმილებთ, რომელზეც მოდების წერტილი მოძრაობს, მივიღებთ A მუშაობის ნაცნობ გამოსახულებას:

$$A = F_{\text{გა. წერ}} \cdot s.$$

მაგრამ რკალი შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც

$$s = r\varphi,$$

სადაც r არის მანძილი ბრუნვის ღერძიდან ძალის მოდების წერტილამდე. ამრიგად,

$$A=F_{\text{გაწვ.}}\ r\varphi.$$

სხეულის ერთი და იმავე კუთხით სხვადასხვა წესით მობრუნებისას ჩვენ შეიძლება სხვადასხვა მუშაობის დახარჯვა მოგვიხდეს იმის მიხედვით, თუ სად არის მოდების ძალა.

თუ კუთხე მოცემულია, მაშინ მუშაობა $F_{\text{გაწვრ}}\cdot r$ ნამრავლით განისაზღვრება. ასეთ ნამრავლს ძალის მომენტს უწოდებენ:

$$M=F_{\text{გაწვრ}}\cdot r.$$

ძალის მომენტის ფორმულას შეიძლება სხვა სახე მივცეთ. ვთქვათ, O არის ბრუნვის ღერძი და B — ძალის მოდების წერტილი (ნახ. 50). d ასოთი აღნიშნულია ძალის მიმართულებაზე O წერტილიდან დაშვებული პერპენდიკულარის სიგრძე. ნახატზე აგებული ორი სამკუთხედი მსგავსია. ამიტომ

$$\frac{F}{F_{\text{გაწვრ}}}=\frac{r}{d},\quad \text{ანუ}\quad F_{\text{გაწვრ}}\cdot r=F\cdot d.$$

d სიდიდეს ძალის მხარი ეწოდება.

ახალი ფორმულა $M=Fd$ ასე იკითხება: ძალის მომენტი ტოლია ძალის ნამრავლისა მის მხარზე.

თუ ძალის მოდების წერტილს ძალის მიმართულების გაწვრივ გადავაადგილებთ, მხარი d და მასთან ერთად ძალის მომენტიც არ შეიცვლება. მაშასადამე, სულ ერთია, ძალის ხაზზე, სახელდობრ, სად დევს მოდების წერტილი.

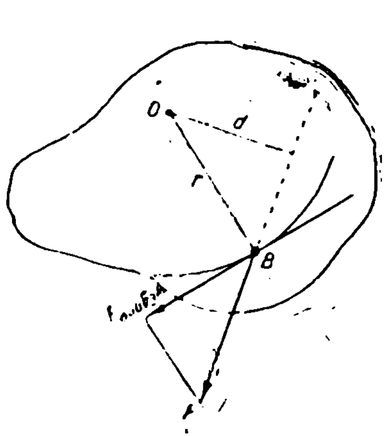
თუკი ახალ ცნებას გამოვიყენებთ, მუშაობის ფორმულა უფრო მოკლედ დაიწერება:

$$A=M\varphi,$$

ე. ი. მუშაობა ძალის მომენტისა და მობრუნების კუთხის ნამრავლის ტოლია.

ვთქვათ, სხეულზე მოქმედებს ორი ძალა, რომელთა მომენტებია M_1 და M_2. სხეულის φ კუთხით მობრუნებისას შესრულდება $M_1\varphi+M_2\varphi=(M_1+M_2)\varphi$ მუშაობა. ეს მოკლე

ჩანაწერი გვიჩვენებს, რომ ორი ძალა, რომელთა მომენტებია M_1 და M_2 სხეულს ისე აბრუნებს, როგორც ერთი ძალა, რომლის M მომენტი M_1+M_2 ჯამის ტოლია. ძალის მომენტები ხან ეხმარებიან, ხან კიდევ ხელს უშლიან ერთმანეთს. თუ M_1 და M_2 მომენტები ისწრაფვიან სხეული ერთი და იმავე მიმართულებით მოაბრუნონ, მაშინ ისინი ერთნაირი ალგებრული ნიშნის მქონე სიდიდეებად უნდა ჩავთვალოთ და პირიქით, ძალების მომენტებს, რომლებიც სხეულს სხვადასხვა მიმართულებით აბრუნებენ, განსხვავებული ნიშნები აქვთ.



ნახ. 50·

როგორც ვიცით, სხეულზე მოქმედი ყველა ძალის მუშაობა კინეტიკური ენერგიის შეცვლას ხმარდება.

სხეულის ბრუნვა შენელდა ან აჩქარდა, ე. ი. შეიცვალა მისი კინეტიკური ენერგია. ეს შეიძლება მხოლოდ იმ შემთხვევაში მოხდეს, როცა ძალთა ჯამური მომენტი ნულის ტოლი არ არის.

მაგრამ, ვთქვათ, ჯამური მომენტი ნულის ტოლია, მაშინ? პასუხი ცხადია — კინეტიკური ენერგია არ შეიცვლება, მაშასადამე, სხეული ან თანაბრად ბრუნავს ინერციით, ან უძრავია.

ამრიგად, მბრუნავი სხეულის წონასწორობისათვის საჭიროა მასზე მოქმედ ძალთა მომენტების გაწონასწორება. თუ ორი ძალა მოქმედებს, წონასწორობა მოითხოვს ტოლობას

$$M_1+M_2=0.$$

ვიდრე ჩვენ ისეთი ამოცანები გვაინტერესებდა, რომლებშიც სხეული შეიძლებოდა განხილულიყო როგორც წერტილი,

წონასწორობის პირობები უფრო მარტივი იყო: იმისათვის, რომ სხეული უძრავად იყოს ან თანაბრად მოძრაობდეს, ამბობდა ნიუტონის კანონი ასეთი ამოცანებისათვის, საჭიროა, ჯამური ძალა ნულს უდრიდეს. ზევით მიმართული ძალები ქვევით მიმართული ძალებით უნდა წონასწორდებოდნენ; მარცხნივ მიმართული ძალა კი მარჯვნივ მიმართული ძალით უნდა კომპენსირდებოდეს.

ეს კანონი სამართლიანია ჩვენი შემთხვევისათვისაც. თუ მქნევარა ბორბალი უძრავია, მასზე მოქმედი ძალები წონასწორდება იმავე ღერძის რეაქციით, რომელზედაც ბორბალია ჩამოცმული.

მაგრამ ეს აუცილებელი პირობები უკვე საკმარისი აღარ არის. ძალების გაწონასწორების გარდა, საჭიროა კიდევ ძალთა მომენტების გაწონასწორებაც. მომენტების გაწონასწორება მეორე აუცილებელ პირობას წარმოადგენს მყარი სხეულის უძრავობის ან თანაბარი ბრუნვისათვის.

თუ ძალთა მომენტი ბევრია, ისინი ადვილად იყოფა ორ ჯგუფად: ერთნი ისწრაფვიან სხეული მარჯვნივ მიაბრუნონ, მეორენი — მარცხნივ. სწორედ ამ მომენტებმა უნდა მოახდინონ ერთმანეთის კომპენსაცია.

ბერკეტი

შეუძლია თუ არა ადამიანს დააკავოს 100 ტონა ჩამოკიდებული ტვირთი; შეიძლება თუ არა ხელით რკინის გაბრტყელება; შეუძლია თუ არა ბავშვს მეტოქეობა გაუწიოს ძალოსანს? დიახ, ყველაფერი ეს შესაძლებელია.

წინადადება მივცით ღონიერ კაცს მანას ღერძთან ახლოს ჩაავლოს ხელი და ისე მოაბრუნოს მქნევარა ბორბალი მარცხნივ. ძალის მომენტი ამ შემთხვევაში მცირე იქნება: ძალა დიდია, მაგრამ მხარია მცირე. თუ ბავშვი ფერსოსთან მოჰკიდებს ხელს მანას და საწინააღმდეგო მიმართულებით გადასწევს ბორბალს, ძალის მომენტი შეიძლება უფრო მეტი აღმოჩნდეს: ძალა მცირეა, სამაგიეროდ, მხარია დიდი. წონასწორობის პირობა იქნება:

$$M_1 = M_2, \quad \text{ანუ} \quad F_1 d_1 = F_2 d_2.$$

მომენტების კანონის გამოყენებით ადამიანს შეიძლება ზღაპრული ძალა მივანიჭოთ.
ყველაზე მკაფიო მაგალითი ბერკეტებია.

ვთქვათ, გსურთ ძალაყინით უზარმაზარი ქვა ასწიოთ. ამ ამოცანას თქვენ დასძლევთ, ქვის წონა რამდენიმე ტონაც რომ იყოს. ძალაყინი საყრდენზეა დადებული და ჩვენს ამოცანაში მყარ სხეულს წარმოადგენს. საყრდენი წერტილი ბრუნვის ცენტრია. სხეულზე ძალის ორი მომენტი მოქმედებს: ხელის შემშლელი — ქვის წონისაგან და მაბიძგებელი — ხელისგან. თუ ინდექსს 1 კუნთურ ძალას მივაკუთვნებთ, ხოლო ინდექსს 2 — ქვის სიმძიმეს, ქვის აწევის შესაძლებლობა მოკლედ გამოისახება: M_1 M_2-ზე მეტი უნდა იყოს.

დაკიდებული ქვის დაკავება შეიძლება იმ პირობით,

$$M_1=M_2, \quad \text{ანუ} \quad F_1d_1=F_2d_2.$$

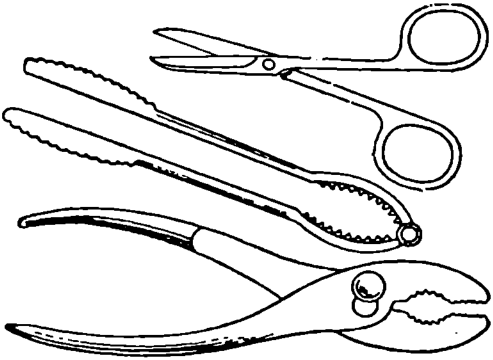
თუ მცირე მხარი — საყრდენიან ქვამდე — 15-ჯერ მოკლეა დიდ მხარზე — საყრდენიდან ხელამდე, — მაშინ ტონიან ქვას ზეაწეულ მდგომარეობაში დააკავებს კაცი, რომელიც მთელი თავისი წონით ბერკეტის გრძელ მხარეზე იმოქმედებს.

საყრდენზე დადებული ძალაყინი ბერკეტის საკმაოდ გავრცელებული და ყველაზე უბრალო მაგალითია. ძალაყინის მეშვეობით, ჩვეულებრივ, 10—20-ჯერ ვიგებთ ძალაში. ძალაყინის სიგრძე დაახლოებით 1,5 მ, ხოლო საყრდენი წერტილის მოწყობა ბოლოდან 10 სმ უფრო ახლო, ჩვეულებრივ, ძნელია. ამიტომ ერთი მხარი 10—20-ჯერ გრძელი იქნება მეორეზე და, მაშასადამე, ამდენივეს მოვიგებთ ძალაშიც.

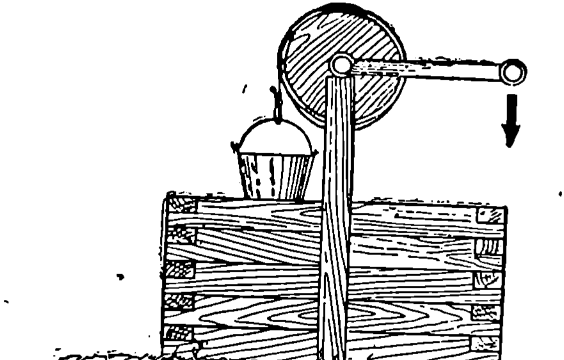
რამდენიმეტონიან ავტომანქანას შოფერი ადვილად სწევს ზევით დომკრატის დახმარებით. დომკრატი არის საყრდენზე დადებული ისეთივე ტიპის ბერკეტი, რაც ძალაყინია. ძალების მოდების წერტილები (ხელი, ავტომობილის წონა) დომკრატის ბერკეტის საყრდენი წერტილის ორივე მხარეზეა განლაგებული. აქ ძალაში დაახლოებით 40—50-ჯერ ვიგებთ, რაც საშუალებას გვაძლევს უზარმაზარი სიმძიმე ავწიოთ.

მაკრატელი, კაკლის დასამტვრევი მაშა, ბრტყელტუჩა, გაზი, მკვნეტარა და მრავალი სხვა ინსტრუმენტი ბერკეტებია. ნახ. 51-ზე თქვენ ადვილად იპოვით მყარი სხეულის ბრუნვის ცენტრს (საყრდენ წერტილს) და ორი ძალის — მოქმედისა და ხელის შემშლელის მოდების წერტილს.

როდესაც მაკრატლით თუნუქსა ჭრიან, ცდილობენ რაც შეიძლება ფართოდ გაშალონ მაკრატელი. რას აღწევენ ამით? ლითონის ნაჭერი უფრო ახლოს მიაქვთ ბრუნვის ცენტრთან. გადასალახავი ძალის მომენტი მცირდება და, მაშასადამე, ძა-



ნახ. 51.



ნახ. 52.

ლაში მოგება მატულობს. მაკრატლის რგოლების ან მკვნეტარას სახელურების დასაახლოებლად მოზრდილი ადამიანი ჩვეულებრივ 40—50 კგ ძალით მოქმედებს. ერთი მხარი შეიძლება ოციოდეჯერ მეტი იყოს მეორეზე. თურმე, ასეთი მარტივი ინსტრუმენტების დახმარებით ჩვენ შეგვიძლია ლითონში 1 ტონა ძალით შევიჭრათ.

ბერკეტის სახესხვაობას ჯალამბარი წარმოადგენს. ჯალამბარის (ნახ. 52) საშუალებით ბევრ სოფელში ჭიდან წყალს იღებენ.

ინსტრუმენტები ადამიანს ღონეს მატებენ, მაგრამ ეს სულაც არ ნიშნავს იმას, რომ ინსტრუმენტები საშუალებას გვაძლევენ ცოტა ვიმუშაოთ და ბევრი მივიღოთ. ენერგიის მუდმივობის კანონი გვარწმუნებს, რომ მუშაობაში მოგება, ანუ მუშაობის „არაფრისგან" შექმნა, შეუძლებელი რამ არის.

მიღებული მუშაობა არ შეიძლება დახარჯულზე მეტი იყოს. პირიქით, ხახუნზე ენერგიის უცილობელი დანაკარგების გამო ინსტრუმენტის დახმარებით მიღებული მუშაობა ყოველთვის დახარჯულზე ნაკლები იქნება. იდეალურ შემთხვევაში ორივე მუშაობა შეიძლება ტოლი იყოს.

თუმცა ჩვენ ტყუილად ვკარგავთ დროს ამ თვალსაჩინო ჭეშმარიტების განმარტებაზე: მომენტების კანონი ხომ მოქმედი და გადასალახავი ძალების მუშაობათა ტოლობის პირობიდან მივიღეთ.

თუ ძალთა მოდების წერტილებმა s_1 და s_2 გზები გაიარეს, მაშინ მუშაობების ტოლობის პირობა ასე ჩაიწერება:

$$F_1^{\text{გასწვრ}} \cdot s_1 = F_2^{\text{გასწვრ}} \cdot s_2.$$

s_2 გზაზე რაიმე F_2 ძალის გადალახვა ჩვენ შეგვიძლია F_2 ძალაზე გაცილებით ნაკლები F_1 ძალით, თუ ბერკეტიან ინსტრუმენტს გამოვიყენებთ. მაგრამ ხელის s_1 გადანაცვლება იმდენჯერ მეტი უნდა იყოს s_2-ზე, რამდენჯერაც კუნთური ძალა F_1 ნაკლებია F_2-ზე.

ამ კანონს ხშირად მოკლედ ასე გამოხატავენ: ძალაში მოგება მანძილში წაგებას უდრის.

ბერკეტის კანონი ძველი დროის უდიდესმა მეცნიერმა არქიმედემ აღმოაჩინა. მტკიცებათა ძალით გატაცებული ძველი დროის ეს შესანიშნავი სწავლული სირაკუზის მეფე გერონს სწერდა: „მეორე დედამიწა რომ არსებულიყო, იმაზე გადავიდოდი და ადგილიდან დავძრავდი ჩვენს დედამიწას". თითქოს ამ ამოცანის გადაწყვეტას შესაძლებელს გახდიდა ძალიან გრძელი ბერკეტი, რომლის საყრდენი წერტილი დედამიწის მახლობლად იქნებოდა.

არქიმედესავით ჩვენ არ ვწუხვართ იმაზე, რომ ასეთი საყრდენი წერტილი არ არსებობს, რაც, მეცნიერის აზრით, ერთადერთი დაბრკოლება იყო იმისათვის, რომ დედამიწა გადაედგილებინა.

მოდით, ცოტა წავიოცნებოთ: ავიღოთ უმაგრესი ბერკეტი, დავდოთ ის საყრდენზე და მოკლე ბოლოზე „დავკიდოთ პატარა ბურთულა“, რომლის წონა... $6\cdot10^{24}$ კგ-ძ ტოლია. ეს „მცირე“ რიცხვი გვიჩვენებს, თუ რას აიწონის „პატარა ბურთულად შეკუმშული“ დედამიწა. ახლა ბერკეტის გრძელ ბოლოს კუნთის ძალა მოვდოთ.

თუ არქიმედეს ხელის ძალას 60 კგ-ძ ტოლად ჩავთვლით, მაშინ „მიწის თხილის“ 1 სანტიმეტრით გადასანაცვლებლად არქიმედეს ხელს $\frac{6\cdot10^{24}}{60}=10^{23}$-ჯერ მეტი გზის გავლა მოუხდება. 10^{23} სმ არის 10^{18} კმ, რაც სამ მილიარდჯერ მეტია დედამიწის ორბიტის დიამეტრზე!

ეს ანეგდოტური მაგალითი აშკარად გვიჩვენებს „გზაში ნაგების“ მასშტაბებს ბერკეტის მუშაობის დროს.

ზემოთ განხილული მაგალითებიდან ნებისმიერი შეიძლება გამოვიყენოთ არა მარტო ძალაში მოგების, არამედ გზაში წაგების საილუსტრაციოდაც. მძღოლის ხელი, როცა იგი დომკრატს ამუშავებს, გაივლის გზას, რომელიც იმდენჯერ მეტი იქნება ავტომანქანის აწევის სიდიდეზე, რამდენჯერაც კუნთის ძალა ნაკლებია ავტომობილის წონაზე. მაკრატლის რგოლების დაახლოებისას თუნუქის ფურცლის გასაჭრელად, ჩვენ შევასრულებთ მუშაობას გზაზე, რომელიც განაჭერის სისქეზე იმდენჯერ მეტი იქნება, რამდენჯერაც კუნთის ძალა ნაკლებია თუნუქის წინააღმდეგობაზე. ქვა, რომელსაც ძალაყინი სწევს ზევით, იმდენჯერ მაღლა ადის ხელის დაშვების სიმაღლესთან შედარებით, რამდენჯერაც კუნთების ძალა ნაკლებია ქვის წონაზე. ეს კანონი გასაგებს ხდის ხრახნის მოქმედების პრინციპს. წარმოვიდგინოთ, რომ 1 მმ კუთხვილის ბიჯის მქონე ჭანჭიკს, 30 სანტიმეტრის სიგრძის ქანჩსაღებით ვხრახნით. ერთ შემობრუნებაზე ხრახნი ღერძის გასწვრივ 1 მმ გადაადგილდება, ხოლო ჩვენი ხელი იმავე დროში 2 მ ტოლ გზას გაივლის. ძა-

არქიმედე (ძვ. წ. აღ. დაახლოებით 287—212 წწ.)—ძველი დროის უდიდესი მათემატიკოსი, ფიზიკოსი და ინჟინერი. არქიმედემ გამოიანგარიშა სფეროს და მისი ნაწილების, ცილინდრის მოცულობა და ზედაპირი. გამოიანგარიშა ელიფსის, ჰიპერბოლისა და პარაბოლის ბრუნვით მიღებული სხეულების მოცულობაცა და ზედაპირიც. მან პირველმა გამოთვალა მნიშვნელოვანი სიზუსტით წრეხაზის სიგრძის შეფარდება მის დიამეტრთან. ამასთან, აჩვენა, რომ იგი მოთავსებულია $3\frac{10}{71} < \pi < 3\frac{1}{7}$ საზღვრებში. მექანიკაში მან დაადგინა ბერკეტის კანონები, სხეულთა ტივტივის პირობები („არქიმედეს კანონი“), პარალელურ ძალთა შეკრების კანონები. არქიმედემ გამოიგონა წყლის ასაწევი მანქანა („არქიმედეს ხრახნი“, რომელსაც ამჟამადაც იყენებენ ფხვიერი და ბლანტი ტვირთის ტრანსპორტირებისათვის), ბერკეტებისა და ბლოკების სისტემა დიდი სიმძიმეების ასაწევად და სამხედრო სასროლი მანქანები. ეს მანქანები წარმატებით მოქმედებდნენ იმ დროს, როცა მის მშობლიურ ქალაქ სირაკუზს რომაელებმა ალყა შემოარტყეს.

ლაში ჩვენ 2 ათასჯერ ვიგებთ და საიმედოდ ვამაგრებთ დეტალებს, ან ხელის მცირე დაძაბვით დიდ სიმძიმეებს გადავაადგილებთ.

სხვა უმარტივესი მანქანები

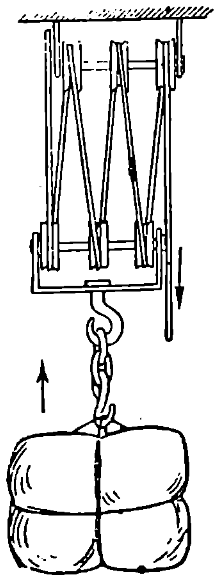
მანძილში წაგება, როგორც ძალაში მოგების საზღაური, საერთო კანონია არა მარტო ბერკეტიანი ინსტრუმენტებისათვის, არამედ ნებისმიერი სხვა მოწყობილობებისა და მექანიზმებისათვისაც, რომლებსაც ადამიანი იყენებს.

ტვირთის ასაწევად ფართოდ არის გავრცელებული საზეველა. ასე ეწოდება ერთ ან რამდენიმე უძრავ ბლოკთან შეერთებული მოძრავი ბლოკების სისტემას. ნახ. 53-ზე ტვირთი ექვს თოკზე ჰკიდია. გასაგებია, რომ წონა განაწილდება და თოკის დაჭიმულობა ექვსჯერ ნაკლები იქნება. ერთი ტონა ტვირთის ასაწევად საჭირო იქნება 1000/6=167 კგ ძალის მოდება. მაგრამ ადვილი მისახვედრია, რომ ტვირთის 1 მეტრზე ასაწევად 6 მ თოკი უნდა ჩამოვწიოთ. ტვირთის 1 მეტრზე ასატანად საჭიროა 1000 კგ მ მუშაობა. ეს მუშაობა „ნებისმიერი სახით" უნდა უზრუნველვყოთ — 1000/6 კგ ძალამ უნდა იმოქმედოს 6 მ გზაზე, 10 კგ ძალამ — 100 მ გზაზე, 1 კგ ძალამ — 1 კმ გზაზე.

26-ე გვერდზე ნახსენები დახრილი სიბრტყეც ისეთი მოწყობილობაა, რომელიც საშუალებას გვაძლევს მანძილში წაგების ხარჯზე მოვიგოთ ძალაში.

ძალის გამრავლების თავისებური ხერხია დარტყმა. ტარანით, ჩაქუჩით, ცულით ან უბრალოდ მუშტით დარტყმას უზარმაზარი ძალის შექმნა შეუძლია. მძლავრი დარტყმის საიდუმლო მარტივია. მაგარ კედელში ლურსმნის ჩასაჭედებლად ჩაქუჩი საკმარისად უნდა მოვიქნიოთ. დიდი მოქნევა, ანუ დიდი გზა, რომელზეც ძალა მოქმედებს, ჩაქუჩის მნიშვნელოვან კინეტიკურ ენერგიას წარმოშობს. ეს ენერგია მცირე გზაზე იხარჯება. თუ მოქნევა $^1/_2$ მეტრია, ხოლო ლურსმანი კედელში $^1/_2$ სმ-ზე შევიდა, მაშინ ძალა 100-ჯერ გადიდებულია. თუ კედელი უფრო მაგარია და ლურსმანი ხელის

იმავე მოქნევისას კედელში $^1/_2$ მმ-ზე შევიდა, მაშინ დარტყმა 10-ჯერ უფრო ძლიერი იქნება, ვიდრე პირველ შემთხვევაში. მაგარ კედელში ლურსმანი ისე ღრმად არ შევა და იგივე მუშაობა უფრო მცირე გზაზე დაიკარგება. გამოდის, რომ ჩაქუჩი ავტომატიკით მუშაობს, უფრო მძლავრად ურტყამს იქ, სადაც უფრო დიდი სიძნელეა.



ნახ. 53.

თუ ჩაქუჩს კილოგრამიანი ძალით „გავაქანებთ", იგი ლურსმანს 100 კგ ძალით დაჰკრავს. ხოლო როცა შეშას მძიმე უროთი ვაპობთ, მაშინ რამდენიმე ტონა ძალით ვმოქმედებთ. მძიმე სამჭედლო ურო პატარა სიმაღლიდან — ერთი მეტრიდან — ვარდება. ნაჭედის 1—2 მილიმეტრით გაპრტყელებისას ერთი ტონა ურო მას უზარმაზარი, რამდენიმე ათასი ტონა ძალით ეცემა.

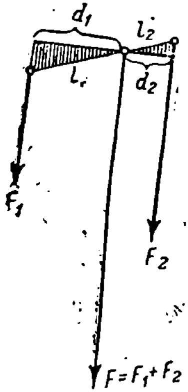
როგორ უნდა შეიკრიბოს მყარ სხეულზე მოქმედი პარალელური ძალები

როდესაც მექანიკის ამოცანებს ვწყვეტდით, რომლებშიც სხეულს წარმოსახვით წერტილით ვცვლიდით, საკითხი ძალების შეკრების შესახებ მარტივად წყდებოდა. ამ კითხვაზე პასუხს პარალელოგრამის წესი იძლეოდა, ხოლო თუ ძალები პარალელური იყო, მათ სიდიდეებს ისე ვკრებდით, როგორც რიცხვებს.

ახლა მდგომარეობა უფრო გართულდა. ცნობილია, რომ ძალის მოქმედება საგანზე არა მარტო მისი სიდიდითა და მიმართულებით ხასიათდება, არამედ მისი მოდების წერტილითაც, ანუ ძალის მოქმედების ხაზით — ზემოთ ჩვენ განვმარტეთ, რომ ეს ერთი და იგივეა.

ძალების შეკრება მათი ერთი ძალით შეცვლას ნიშნავს, ეს სულაც არ არის ყოველთვის შესაძლებელი.

პარალელური ძალების ერთი ტოლქმედი ძალით შეცვლა ისეთი ამოცანაა, რომელიც ყოველთვის შეიძლება განხორციელდეს (ერთი განსაკუთრებული შემთხვევის გარდა, რომლის შესახებაც ამ პარაგრაფის ბოლოში გესაუბრებით). განვიხილოთ პარალელური ძალების შეკრება. რასაკვირველია, ჯამი 3 კგ ძალისა და 5 კგ ძალისა 8 კგ ძალის ტოლია, თუ ძალები ერთ მხარეს არის მიმართული. ამოცანა ტოლქმედის მოდების წერტილის (მოქმედების მიმართულების) პოვნა გახლავთ.



ნახ. 54.

ნახ. 54-ზე გამოსახულია სხეულზე მოქმედი ორი ძალა, ჯამური F ძალა F_1 და F_2 ძალებს სცვლის, მაგრამ ეს მარტო იმას როდი ნიშნავს, რომ $F=F_1+F_2$; F ძალის მოქმედება იმ შემთხვევაში იქნება F_1 და F_2 ძალების მოქმედების ტოლფასი, თუ F ძალის მომენტიც F_1 და F_2 ძალების მომენტების ჯამს გაუტოლდება.

ჩვენ ვეძებთ ჯამური F ძალის მოქმედების ხაზს. რასაკვირველია, იგი F_1 და F_2 ძალების პარალელურია, მაგრამ F_1 და F_2 ძალებიდან რა მანძილზე გადის ეს ხაზი.

F ძალის მოდების წერტილად ნახატზე წარმოდგენილია წერტილი, რომელიც F_1 და F_2 ძალების მოდების წერტილების შემაერთებელ ხაზზე მდებარეობს. არჩეული წერტილის მიმართ F ძალის მომენტი, რასაკვირველია, ნულის ტოლია. მაშინ ამ წერტილის მიმართ F_1 და F_2 ძალების მომენტების ჯამიც ნულის ტოლი უნდა იყოს, ანუ F_1 და F_2 ძალების მომენტები საწინააღმდეგო ნიშნისა და სიდიდით ტოლი იქნება.

თუ F_1 და F_2 ძალების მხრებს d_1 და d_2 აღვნიშნავთ, ეს პირობა შეგვიძლია ასე ჩავწეროთ:

$$F_1d_1=F_2d_2, \text{ ანუ } \frac{F_1}{F_2}=\frac{d_2}{d_1}.$$

დაშტრიხული სამკუთხედების მსგავსებიდან გამომდინარეობს, რომ $\frac{d_2}{d_1}=\frac{l_2}{l_1}$ ე. ი. ჯამური ძალის მოდების წერტილი შემაერთებელ ხაზზე შესაკრებ ძალებს შორის მანძილს ჰყოფს l_1 და l_2 ნაწილებად, რომლებიც ძალების უკუპროპორციულია.

აღვნიშნოთ l ასოთი F_1 და F_2 ძალების მოდების წერტილთა შორის მანძილი. ცხადია, $l=l_1+l_2$.

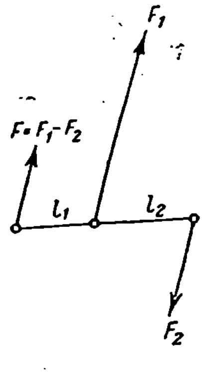
ამოვხსნათ ორი ორუცნობიანი განტოლების სისტემა:

$$F_1l_1-F_2l_2=0,$$
$$l_1+l_2=l.$$

მივიღებთ:

$$l_1=\frac{F_2l}{F_1+F_2},\qquad l_2=\frac{F_1l}{F_1+F_2}.$$

ამ ფორმულებით შეგვიძლია ვიპოვოთ ტოლქმედის მოდების წერტილი არა მარტო მაშინ, როდესაც ძალები ერთ მხარეს არის მიმართული, არამედ საწინააღმდეგოდ მიმართული (როგორც ამბობენ, ანტიპარალელური) ძალების შემთხვევაშიც. თუ ძალები სხვადასხვა მხარეს არის მიმართული, მათ საწინააღმდეგო ნიშნები ექნება, ტოლქმედი კი გაუტოლდება ძალების F_1-F_2 სხვაობას და არა მათ ჯამს. თუ ორი ძალიდან უმცირესს — F_2-ს უარყოფითად ჩავთვლით, ჩვენი ფორმულებიდან დავინახავთ, რომ l_1 უარყოფითი გახდება. ეს იმას ნიშნავს, რომ F_1 ძალის მოდების წერტილი წინანდელივით ტოლქმედის მოდების წერტილის მარცხნივ კი არა, მარჯვნივ მდებარეობს (ნახ. 55), ამასთან, ადრინდელივით

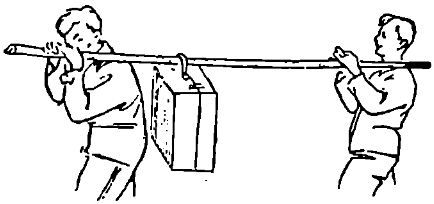


ნახ. 55.

$$\frac{F_1}{F_2}=\frac{l_2}{l_1}.$$

საინტერესო შედეგს ვიღებთ ტოლი ანტიპარალელური ძალების შემთხვევაში. მაშინ $F_1+F_2=0$. ფორმულებიდან ჩანს, რომ l_1 და l_2 ამ დროს უსასრულოდ დიდდება. რა ფიზიკური აზრი აქვს ამ დებულებას? რადგანაც ტოლქმედის უსასრულობაში გადატანა უაზრობაა, მაშასადამე, ტოლი ანტიპარალელური ძალები არ შეიძლება ერთი ძალით შეიცვალოს. ძალების ასეთ კომბინაციას ძალთა წყვილი ეწოდება.

არ შეიძლება ძალთა წყვილის მოქმედება ერთი ძალის მოქმედებაზე დავიყვანოთ. ნებისმიერი ორი პარალელური ან ანტიპარალელური ძალა შეიძლება ერთი ძალით გაწონასწორდეს, ძალთა წყვილი კი — არა.



ნახ. 56.

ცხადია, შეუძლებელია, წყვილის შემდგენი ძალები ერთმანეთს აბათილებდნენ. ძალთა წყვილი ფრიად არსებით მოქმედებას ამჟღავნებს — იწვევს სხეულის ბრუნვას; ძალთა წყვილის მოქმედების თავისებურებაა ის, რომ იგი არ იძლევა გადატანით მოძრაობას.

ზოგ შემთხვევაში შეიძლება წამოიჭრას საკითხი არა პარალელურ ძალთა შეკრების, არამედ მოცემული ძალის ორ პარალელურ ძალად დაშლის შესახებ.

ნახ. 56-ზე გამოხატულია ორი კაცი, რომლებსაც ერთად მოაქვთ ჯოხით მძიმე ჩემოდანი. ჩემოდნის წონა ორივეზე ნაწილდება. თუ ტვირთი ჯოხის შუა ადგილს აწევება, მაშინ ორივენი ტოლ სიმძიმეს გრძნობენ. თუ მანძილი ტვირთის მოდების წერტილიდან ხელებამდე d_1 და d_2, მაშინ F ძალა ორ F_1 და F_2 ძალად დაიშლება თანახმად წესისა

$$\frac{F_1}{F_2}=\frac{d_2}{d_1}.$$

ვინც უფრო ღონიერია, მან ჯოხს ტვირთთან უფრო ახლოს უნდა მოჰკიდოს ხელი.

სიმძიმის ცენტრი

სხეულის ყოველ ნაწილაკს აქვს წონა. ამიტომ მყარ სხეულზე უამრავი ძალა მოქმედებს. ამასთან, ყველა ეს ძალა პარალელურია. თუკი ასეა, მაშინ ეს ძალები შეიძლება ზემოთ განხილული წესების თანახმად შევკრიბოთ და ერთი ძალით შევცვალოთ. ჯამური ძალის მოდების წერტილს სიმძიმის ცენტრი ეწოდება. ამ წერტილში თითქოს თავმოყრილია სხეულის წონა.

ჩამოვკიდოთ სხეული მისი ერთ-ერთი წერტილით. როგორ განლაგდება იგი ამ შემთხვევაში? რამდენადაც შეგვიძლია წარმოდგენაში სხეული სიმძიმის ცენტრში თავმოყრილი ერთი ტვირთით შევცვალოთ, აშკარაა, წონასწორობისას ეს ტვირთი საყრდენ წერტილზე გამავალ ვერტიკალზე განლაგდება. სხვაგვარად რომ ვთქვათ, წონასწორობისას სიმძიმის ცენტრი საყრდენ წერტილზე გამავალ ვერტიკალზე ძევს და უმდაბლესი მდებარეობა უჭირავს.

შეიძლება სიმძიმის ცენტრი საყრდენი წერტილის ზემოთ, ღერძზე გამავალ ვერტიკალზეც მოვათავსოთ. ამის გაკეთება ძალიან ძნელია და მხოლოდ ხახუნის წყალობით თუ მოხერხდება. ასეთი წონასწორობა არ არის მდგრადი.

ჩვენ უკვე ვილაპარაკეთ მდგრად წონასწორობაზე. ამ დროს პოტენციური ენერგია მინიმალური უნდა იყოს. ეს ასეც არის იმ შემთხვევაში, როდესაც სიმძიმის ცენტრი საყრდენი წერტილის ქვევითაა. ნებისმიერი გადახრა ზევით სწევს სიმძიმის ცენტრს და, მაშასადამე, ზრდის პოტენციურ ენერგიას. პირიქით, როდესაც სიმძიმის ცენტრი საყრდენი წერტილის ზევით არის, ნიავის ოდნავ მობერვასაც კი სხეული გამოჰყავს ამ მდებარეობიდან და პოტენციური ენერგიის შემცირებას იწვევს. ასეთი მდებარეობა არ არის მდგრადი.

გამოვჭრათ მუყაოსაგან ფიგურა და მისი სიმძიმის ცენტრის საპოვნელად ორჯერ ჩამოვკიდოთ იგი. ამისათვის ჩამო-

საკიდი ძაფი ერთ და შემდეგ მეორე წერტილში მივაწებოთ. ფიგურა დავამაგროთ სიმძიმის ცენტრზე გამავალ ღერძზე. მოვაბრუნოთ ფიგურა ერთ, მეორე, მესამე და ა. შ. მდგომარეობაში. ჩვენ აღმოვაჩენთ, რომ სხეულისათვის სავსებით განურჩეველია ეს ოპერაციები. ნებისმიერ მდებარეობაში ხორციელდება წონასწორობის სპეციალური შემთხვევა. სახელიც ასეთი შეარქვეს ამ შემთხვევას — განურჩეველი.

ამის მიზეზი გასაგებია — ფიგურის ნებისმიერ მდებარეობაში მისი შემცვლელი მატერიალური წერტილი ერთსა და იმავე ადგილზე იმყოფება.

ზოგ შემთხვევაში სიმძიმის ცენტრის პოვნა შეიძლება ცდისა და გამოთვლის გარეშე. აშკარაა, მაგალითად, რომ სფეროს, წრის, კვადრატისა და სწორკუთხედის სიმძიმის ცენტრები, რადგანაც ისინი სიმეტრიულებია, ამ ფიგურების ცენტრებში იმყოფება. თუ სიმეტრიულ სხეულს წარმოდგენაში ნაწილაკებად დავყოფთ, მაშინ თვითეულ მათგანს სიმეტრიის ცენტრის მეორე მხარეს მეორე ნაწილაკი შეესატყვისება. ასეთი ნაწილაკების ყოველი წყვილისათვის ფიგურის ცენტრი სიმძიმის ცენტრიც იქნება.

სამკუთხედის სიმძიმის ცენტრი მედიანების გადაკვეთაზე დევს. მართლაც, დავყოთ სამკუთხედი წვრილ, ერთ-ერთი გვერდის პარალელურ ზოლებად. მედიანა თვითეულ ზოლს შუაზე ჰყოფს. მაგრამ ზოლის სიმძიმის ცენტრი, ცხადია, ზოლის შუაზე, ანუ მედიანაზე დევს. ყველა ზოლის სიმძიმის ცენტრი მედიანაზე ხვდება და როდესაც ჩვენ მათი წონის ძალების შეკრებას დავიწყებთ, იმ დასკვნამდე მივალთ, რომ სამკუთხედის სიმძიმის ცენტრი სადღაც დევს მედიანაზე. მაგრამ ეს მსჯელობა სამართლიანია ნებისმიერი მედიანისათვის. ამიტომ სიმძიმის ცენტრი მათ გადაკვეთაზე უნდა მდებარეობდეს.

იქნებ თქვენ არ ხართ დარწმუნებული, რომ სამი მედიანა ერთ წერტილში იკვეთება. ეს გეომეტრიაში მტკიცდება; მაგრამ ჩვენი მსჯელობაც ამტკიცებს ამ საინტერესო თეორემას. ხომ არ შეიძლება სხეულს რამდენიმე სიმძიმის ცენტრი ჰქონდეს; და რაკი სიმძიმის ცენტრი ერთია და მედიანაზე დევს, რომელი კუთხიდანაც არ უნდა გავავლოთ იგი, ცხადია, სამივე

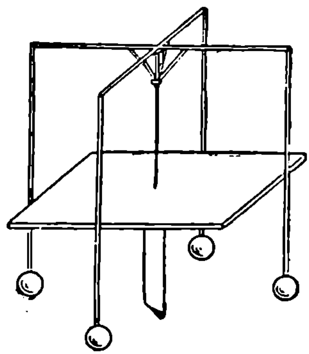
მედიანა ერთ წერტილში უნდა იკვეთებოდეს. ფიზიკური საკითხის დაყენება დაგვეხმარა გეომეტრიული თეორემის დამტკიცებაში.

ერთგვაროვანი კონუსის სიმძიმის ცენტრის პოვნა უფრო ძნელია. სიმეტრიის მოსაზრებიდან ცხადია მხოლოდ, რომ სიმძიმის ცენტრი ღერძის ხაზზე დევს. გამოთვლა გვიჩვენებს, რომ ის ფუძიდან სიმაღლის 1/4 მანძილზე მდებარეობს.

არ არის აუცილებელი სიმძიმის ცენტრი მაინცდამაინც სხეულის შიგნით მდებარეობდეს.

მაგალითად, რგოლის სიმძიმის ცენტრი მის ცენტრში, ე. ი. რგოლს გარეთ მდებარეობს.

შეიძლება თუ არა მინის ფირფიტაზე მდგრადად დავაყენოთ ქინძისთავი ვერტიკალურ მდგომარეობაში? ნახ. 57-ზე ნაჩვენებია, როგორ უნდა გაკეთდეს ეს: მავთულისაგან დამზადებული ორმაგი მხრეულის სახის მცირე მოწყობილობა, ოთხი პატარა ტვირთით ხისტად უნდა დამაგრდეს ქინძისთავთან. რადგანაც ტვირთები საყრდენზე ქვევით არის დაკიდული, ხოლო ქინძისთავის წონა მცირეა, სიმძიმის ცენტრი საყრდენ წერტილზე ქვევით იქნება. მდებარეობა მდგრადია.



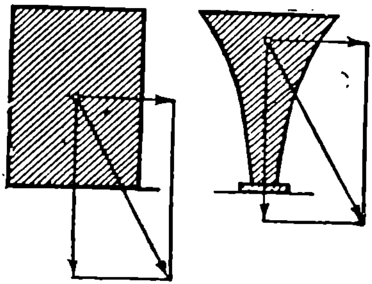
ნახ. 57.

აქამდე ლაპარაკი იყო საყრდენი წერტილის მქონე სხეულებზე. როგორ არის საქმე იმ შემთხვევაში, როდესაც სხეული მთელ ფართს ეყრდნობა?

აშკარაა, რომ ამ შემთხვევაში სიმძიმის ცენტრის საყრდენს ზევით განლაგება სულაც არ ნიშნავს წონასწორობის არამდგრადობას. მაშინ როგორ მოხერხდებოდა ჭიქების მაგიდაზე დადგმა? მდგრადობისათვის საჭიროა, სხეულის საყრდენი ფართი იმ სიბრტყეს აწვებოდეს, რომელზეც იგი ძევს. ამიტომაც ფართს დაყრდნობილი სხეული მდგრადად იდგება, თუ სიმძიმის ცენტრიდან გავლებული სიმძიმის ძალის მოქმედების ხაზი საყრდენ ფართში გაივლის. პირიქით, თუ ძალის მოქ-

მედების ხაზი საყრდენ ფართს გარეთ გადის, სხეული ეცემა.

მდგრადობის ხარისხი შეიძლება მეტად განსხვავებული იყოს იმის მიხედვით, თუ რამდენად მაღლაა განლაგებული სიმძიმის ცენტრი საყრდენიდან. ჩაით სავსე ჭიქას მხოლოდ ძალიან მოუხეშავი კაცი გადააბრუნებს, მაგრამ ყვავილების ლარნაკის გადაბრუნება, თუ მას ვიწრო ძირი აქვს, გაუფრთხილებელი შეხებითაც შეიძლება. რატომ არის ასე?



ნახ. 58.

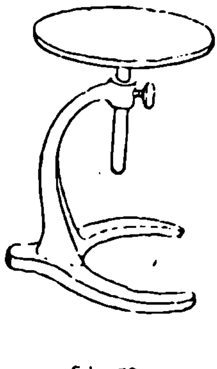
შეხედეთ 58-ე ნახაზს. ერთი და იგივე გადამბრუნებელი ძალა სიმძიმის ძალასთან ერთად იძლევა ჯამურ ძალას, რომელიც სხეულს საყრდენზე აჭერს, თუ სიმძიმის ცენტრი დაბლა არის განლაგებული. მაღლა განლაგებული სიმძიმის ცენტრის შემთხვევაში კი ჯამური ძალა არ გადის საყრდენ ფართზე, იგი განზეა მიმართული.

ჩვენ ვთქვით, რომ სხეულის მდგრადობისათვის მასზე მოდებული ძალა საყრდენ ფართზე უნდა გადიოდეს. მაგრამ წონასწორობისათვის საჭირო საყრდენი ფართი ყოველთვის არ შეესაბამება ფაქტიურ საყრდენ ფართს. 59-ე ნახატზე გამოსახულია სხეული, რომლის საყრდენ ფართს ახალი მთვარის ფორმა აქვს. ადვილი წარმოსადგენია, რომ სხეულის მდგრადობა არ შეიცვლება, თუ ახალი მთვარის ნახევარრკალს სრული ნახევარწრით შევცვლით. ამრიგად, წონასწორობის განმსაზღვრელი ფართი შეიძლება ფაქტიურზე მეტი იყოს.

იმისათვის, რომ ნახ. 60-ზე გამოხატული სამფეხის საყრდენი ფართი ვიპოვოთ, მისი ბოლოები სწორი ხაზის მონაკვეთებით უნდა შევაერთოთ.

რატომ არის თოკზე სიარული ასე ძნელი? იმიტომ, რომ საყრდენი ფართი მკვეთრად მცირდება. თოკზე სიარული ადვილი არ არის, და დახელოვნებულ თოკზე მოსიარულეს ტყუილად როდი აჯილდოებენ აპლოდისმენტებით. მაგრამ ზოგჯერ მაყურებლები სცდებიან და ხელოვნების მწვერვა-

ლად მიიჩნევენ ეშმაკურ ხრიკებს, რომლებიც ამოცანას აადვილებენ. არტისტი იღებს ძლიერ გაღუნულ მხრეულს ორი კასრი წყლით; კასრები თოკის დონეზეა, ორკესტრი სულს ნაბავს



ნახ. 59.

ნახ. 60.

და არტისტიც სერიოზული სახით მიაბიჯებს თოკზე, როგორი რთული ნომერია, ფიქრობს გამოუცდელი მაყურებელი. სინამდვილეში კი არტისტმა სიმძიმის ცენტრი ძირს დასწია და ამით ამოცანა გაიადვილა.

ინერციის ცენტრი

სად არის სხეულთა ჯგუფის სიმძიმის ცენტრი? ასეთი კითხვის დასმა სავსებით კანონიერია. თუ ტივზე ბევრი ხალხია, მაშინ ტივის მდგრადობა ხალხისა და ტივის საერთო სიმძიმის ცენტრის მდებარეობისგან იქნება დამოკიდებული.

ცნების აზრი იგივე რჩება. სიმძიმის ცენტრი არის განსახილველი ჯგუფის ყველა სხეულის სიმძიმის ძალების ჯამის მოდების წერტილი.

ორი სხეულისათვის გამოთვლის შედეგი ჩვენ უკვე ვიცით. თუ ორი სხეული, რომელთა წონებია F_1 და F_2, ერთმანეთისგან x მანძილზე იმყოფება, მაშინ სიმძიმის ცენტრი პირვე-

ლისაგან x_1 მანძილზეა, მეორისაგან კი — x_2 მანძილზე, ამასთან,

$$x_1+x_2=x \text{ და } \frac{F_1}{F_2}=\frac{x_2}{x_1}.$$

რადგანაც წონა შეიძლება mg ნამრავლის სახით წარმოვიდგინოთ, ამიტომ წყვილი სხეულის სიმძიმის ცენტრი აკმაყოფილებს პირობას

$$m_1x_1=m_2x_2,$$

ანუ დევს წერტილში, რომელიც მასებს შორის მანძილს მათი სიდიდეების უკუპროპორციულ ნაწილებად ჰყოფს.

ახლა გავიხსენოთ პლატფორმაზე დადგმული ქვემეხიდან სროლა. ქვემეხისა და ჰურვის იმპულსები ტოლია და სხვადასხვა მხარესაა მიმართული. ადგილი აქვს ტოლობებს:

$$m_1v_1=m_2v_2, \quad \text{ანუ} \quad \frac{v_2}{v_1}=\frac{m_1}{m_2}.$$

ამასთან, სიჩქარეების ფარდობა ამ მნიშვნელობას ურთიერთქმედების მთელი დროის განმავლობაში ინარჩუნებს. უკუცემით წარმოშობილი მოძრაობის დროს ქვემეხი და ჰურვი საწყისი მდებარეობის მიმართ x_1 და x_2 მაძილებზე გადაადგილდებიან სხვადასხვა მხარეს. x_1 და x_2 მანძილები — ორივე სხეულის მიერ გავლილი გზები — იზრდება, მაგრამ სიჩქარეთა უცვლელი ფარდობისას x_1 და x_2 ყოველთვის იმავე შეფარდებაში იქნება ერთმანეთთან:

$$\frac{x_2}{x_1}=\frac{m_1}{m_2}, \text{ ანუ } x_1m_1=x_2m_2.$$

აქ x_1 და x_2 ქვემეხისა და ჰურვის მანძილებია მათი საწყისი მდებარეობის წერტილიდან. ამ ფორმულების შედარებისას სიმძიმის ცენტრის მდებარეობის განმსაზღვრელ ფორმულებთან ჩვენ სრულ იგივეობას ვხედავთ. აქედან უშუალოდ გამომდინარეობს, რომ ჰურვისა და ქვემეხის სიმძიმის ცენტრი გასროლის შემდეგ მუდამ თავდაპირველი მდებარეობის წერტილში რჩება.

სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, ჩვენ ძალიან საინტერესო შედეგი მივიღეთ — ქვემეხისა და ჭურვის სიმძიმის ცენტრი ვასროლის შემდეგ უძრავი რჩება.

ასეთი დასკვნა ყოველთვის სამართლიანია: თუ ორი სხეულის სიმძიმის ცენტრი თავიდან უძრავი იყო, მაშინ მათ ურთიერთქმედებას — როგორი ხასიათისაც არ უნდა იყოს იგი — არ შეუძლია სიმძიმის ცენტრის მდებარეობის შეცვლა. სწორედ ამიტომ არ შეიძლება ადამიანმა თავისი თავი თმებით ასწიოს მაღლა ან მთვარეს დაუახლოვდეს ფრანგი მწერლის სირანო დე ბერჟერაკის მეთოდით. სირანო დე ბერჟერაკმა (რასაკვირველია, ხუმრობით) წინადადება წამოაყენა ხელში რკინის ნაჭერი დავიჭიროთ, მაგნიტი ზემოთ ავისროლოთ ხოლმე, მაგნიტი ამ რკინას მიიზიდავს და მთვარეზე ავალთო.

უძრავი სიმძიმის ცენტრი სხვა ინერციული სისტემის თვალსაზრისით თანაბრად მოძრაობს. მაშასადამე, სიმძიმის ცენტრი ან უძრავია, ან თანაბრად და სწორხაზოვნად მოძრაობს.

ის, რაც ორი სხეულის სიმძიმის ცენტრის შესახებ ითქვა, მრავალი სხეულისგან შემდგარი ჯგუფისთვისაც სამართლიანია, რასაკვირველია, სხეულთა იზოლირებული ჯგუფისათვის, — ამას ჩვენ ყოველთვის აღვნიშნავთ ხოლმე, როდესაც იმპულსის მუდმივობის კანონით ვსარგებლობთ.

ამრიგად, ურთიერთმოქმედ სხეულთა ყოველ ჯგუფს აქვს ისეთი წერტილი, რომელიც უძრავია ან თანაბრად მოძრაობს, და ეს წერტილი მათი სიმძიმის ცენტრია.

იმისათვის, რომ ამ წერტილის ახალ თვისებას ხაზი გაესვას, მას კიდევ ერთ სახელწოდებას აძლევენ: ინერციის ცენტრი. მაგალითად, მზის სისტემის სიმძიმის შესახებ (და, მაშასადამე, სიმძიმის ცენტრის შესახებაც) ლაპარაკი ხომ მხოლოდ პირობითად შეიძლება.

როგორც არ უნდა მოძრაობდნენ სხეულები, რომლებიც ჩაკეტილ სისტემას ჰქმნიან, ინერციის (სიმძიმის) ცენტრი უძრავი იქნება ან ათვლის სხვა სისტემაში ინერციით იმოძრავებს.

ბრუნვის მომენტი

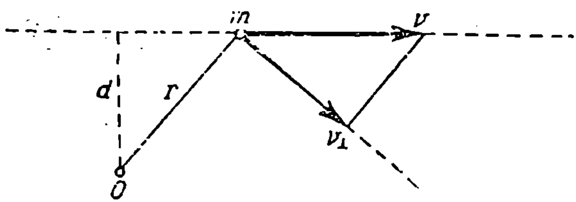
ახლა კიდევ ერთ მექანიკურ ცნებას გავეცნოთ, რომელიც საშუალებას მოგვცემს მოძრაობის მნიშვნელოვანი ახალი კანონი ჩამოვაყალიბოთ.

ამ ცნებას ბრუნვის მომენტი, ან იმპულსის მომენტი, ან მოძრაობის რაოდენობის მომენტი ეწოდება. უკვე სახელწოდება გვეუბნება, რომ საქმე ეხება სიდიდეს, რომელიც რაღაცით ძალის მომენტს უნდა ჰგავდეს.

იმპულსის მომენტი, ისევე როგორც ძალის მომენტი, მოითხოვს იმ წერტილის მითითებას, რომლის მიმართაც განისაზღვრება მომენტი. რომელიმე წერტილის მიმართ იმპულსის მომენტის განსაზღვრისათვის უნდა ავაგოთ იმპულსის ვექტორი და მის მიმართულებაზე წერტილიდან მართობი დავუშვათ (ნახ. 61). mv იმპულსის ნამრავლი d მხარზე არის სწორედ იმპულსის მომენტი, რომელსაც ჩვენ N ასოთი აღვნიშნავთ:

$$N = mvd.$$

თუ სხეული თავისუფლად მოძრაობს, მისი სიჩქარე არ იცვლება; უცვლელი რჩება აგრეთვე მხარი ნებისმიერი წერტილის მიმართ, რადგანაც მოძრაობა სწორი ხაზის გას-



ნახ. 61.

წვრივ სრულდება. მაშასადამე, ასეთი მოძრაობისას იმპულსის მომენტიც უცვლელი რჩება.

ისევე, როგორც ძალის მომენტისათვის, ბრუნვის მომენტისათვისაც შეიძლება სხვა ფორმულა დავწეროთ. შევაერ-

თოთ რადიუსით სხეულის მდებარეობა იმ წერტილთან, რომლის მიმართა მომენტიც გვაინტერესებს (ნახ. 61). ავაგოთ აგრეთვე სიჩქარის გეგმილი რადიუსის პერპენდიკულარულ მიმართულებაზე. ნახატზე აგებული მსგავსი სამკუთხედებიდან გამომდინარეობს: $\frac{v}{v_{\perp}} = \frac{r}{d}$. მაშასადამე, $vd = v_{\perp}r$ და ფორმულა ბრუნვის მომენტისათვის ასეთი სახითაც შეიძლება ჩაიწეროს: $N = m\, v_{\perp} r$.

თავისუფალი მოძრაობისას, როგორც აღვნიშნეთ, ბრუნვის მომენტი უცვლელი რჩება. მაგრამ თუ სხეულზე ძალა მოქმედებს? გამოანგარიშება გვიჩვენებს, რომ ბრუნვის მომენტის ცვლილება ერთ წამში ძალის მომენტის ტოლია.

მიღებული კანონი სხეულთა სისტემაზეც ადვილად ვრცელდება. თუ სისტემაში შემავალი ყველა სხეულის ბრუნვის მომენტებს შევკრებთ, მაშინ მათი ჯამი ტოლი იქნება სხეულებზე მოქმედი ძალების მომენტების ჯამისა. ამრიგად, სხეულთა ჯგუფისთვის სამართლიანია დებულება: იმპულსის ჯამური მომენტის ცვლილება დროის ერთეულში ყველა ძალის მომენტების ჯამის ტოლია.

ბრუნვის მომენტის მუდმივობის კანონი

ორი ქვა რომ თოკით გადავაბათ ერთმანეთს და ერთი მათგანი მძლავრად გავისროლოთ, მეორე ქვაც პირველს გაჰყვება დაჭიმულ თოკზე. ერთი ქვა მეორეს გადაუსწრებს, წინ მოძრაობას ბრუნვაც დაერთვის. დავივიწყოთ მიზიდულობის ველი — ვთქვათ, ქვა ვარსკვლავთშორის სივრცეში გავისროლეთ.

ქვებზე მოქმედი ძალები ერთმანეთის ტოლია და თოკის გასწვრივ ერთმანეთის შემხვედრი მიმართულებით არის მიმართული (ეს ხომ ქმედებისა და უკუქმედების ძალებია). მაგრამ მაშინ ორივე ძალის მხრებიც ნებისმიერი წერტილის მიმართ ერთნაირი იქნება. ტოლი მხრები, მაგრამ ურთიერთსაწინააღმდეგო მიმართულების ძალები ტოლ და ნიშნით ურთიერთსაწინააღმდეგო ძალების მომენტებს გვაძლევენ.

ძალთა ჯამური მომენტი ნულის ტოლი იქნება. მაგრამ აქედან გამომდინარეობს, რომ ნულის ტოლი იქნება აგრეთვე ბრუნვის მომენტის ცვლილებაც, ე. ი. ასეთი სისტემის ბრუნვითი მომენტი მუდმივი დარჩება.

ქვების დამაკავშირებელი თოკი ჩვენ თვალსაჩინოებისათვის დაგვჭირდა. ბრუნვის მომენტის მუდმივობის კანონი სამართლიანია ნებისმიერ ურთიერთმოქმედ სხეულთა წყვილისათვის, როგორი ბუნებაც არ უნდა ჰქონდეს ამ ურთიერთმოქმედებას.

და არა მარტო წყვილისათვის. თუ ძალთა ჩაკეტილ სისტემას ვსწავლობთ, მაშინ სხეულებს შორის მოქმედი ძალები ყოველთვის შეიძლება გავყოთ ტოლი რაოდენობის ქმედებისა და უკუქმედების ძალებად, რომელთა მომენტები წყვილწყვილად გაბათილდება.

ჯამური ბრუნვის მომენტის მუდმივობის კანონი უნივერსალურია, და სამართლიანია სხეულთა ნებისმიერი ჩაკეტილი სისტემისათვის.

თუ სხეული ღერძის ირგვლივ ბრუნავს, მაშინ მისი ბრუნვის მომენტი იქნება

$$N=mvr,$$

სადაც m მასაა, v — სიჩქარე და r — ღერძიდან მანძილი. თუ სიჩქარეს წამში ბრუნთა n რიცხვის საშუალებით გამოვსახავთ, მივიღებთ:

$$v=2\pi nr \qquad \text{და} \qquad N=2\pi mnr^2,$$

ანუ ბრუნვის მომენტი ღერძიდან მანძილის კვადრატის პროპორციულია.

დაჯექით მბრუნავ სკამზე. ხელში მძიმე საწონები აიღეთ, ხელები ფართოდ გაშალეთ და სთხოვეთ ვინმეს, ნელა შემოგაბრუნოთ. ახლა უეცრად მიიკარით ხელები მკერდზე — თქვენ მოულოდნელად უფრო სწრაფად დაიწყებთ ტრიალს. ხელები განზე — მოძრაობა შენელდება, ხელები მკერდთან — მოძრაობა აჩქარდება. ვიდრე ხახუნის გამო სკამი არ შეწყვეტს ბრუნვას, თქვენ რამდენჯერმე მოასწრებთ ბრუნვის სიჩქარის შეცვლას.

რა არის ამის მიზეზი?

ბრუნვის მომენტი ბრუნვათა უცვლელი რიცხვისას საწონების ღერძთან მიახლოების შედეგად შემცირდებოდა. სწორედ ამ შემცირების „საკომპენსაციოდ" იზრდება ბრუნვის სიჩქარე.

ბრუნვის მომენტის მუდმივობის კანონს წარმატებით იყენებენ აკრობატები. როგორ ასრულებს აკრობატი „სალტოს?" უპირველეს ყოვლისა, ზამბარიდან ან პარტნიორის ხელიდან ბიძგით. ბიძგებისას სხეული წინ არის წახრილი და წონა ბიძგის ძალასთან ერთად ძალის მყისიერ მომენტს ქმნის. ბიძგის ძალა იწვევს მოძრაობას წინ, ხოლო ძალის მომენტი ბრუნვას აპირობებს. მაგრამ ეს ბრუნვა ნელია, იგი მაყურებელზე შთაბეჭდილებას არ ახდენს. აკრობატი ღუნავს მუხლებს. „თავისი სხეულის შემოკრებით" ბრუნვის ღერძის ახლოს იგი მნიშვნელოვნად ადიდებს ბრუნვის სიჩქარეს და სწრაფად გადატრიალდება. ასეთია „სალტოს" მექანიკა.

ამავე პრინციპს ემყარება ბალეტის მოცეკვავე ქალის მოძრაობებიც, როცა ის ციბრუტივით ტრიალებს. ჩვეულებრივ, საწყის ბრუნვის მომენტს მას პარტნიორი ანიჭებს. ამ მომენტში მოცეკვავე ქალის კორპუსი დახრილია; იწყება ნელი ბრუნვა, შემდეგ მოხდენილი და სწრაფი მოძრაობით ბალერინა იმართება. ახლა სხეულის ყველა წერტილი ბრუნვის ღერძის ახლოსაა და ბრუნვის მომენტის მუდმივობა სიჩქარის მკვეთრ ზრდას იწვევს.

ბრუნვის მომენტი როგორც ვექტორი

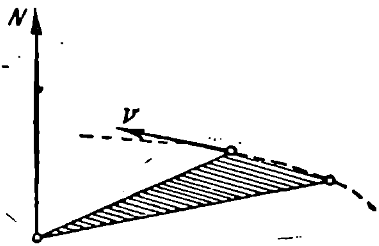
აქამდე ჩვენ ბრუნვის მომენტის სიდიდეზე ვლაპარაკობდით. მაგრამ ბრუნვის მომენტს ვექტორული სიდიდის თვისებებიც აქვს.

განვიხილოთ წერტილის ბრუნვა რაიმე „ცენტრის" მიმართ. ნახ. 62-ზე გამოსახულია წერტილის ორი მახლობელი მდებარეობა. ჩვენთვის საინტერესო მოძრაობა ხასიათდება ბრუნვის მომენტის სიდიდითა და სიბრტყით, რომელშიაც იგი სრულდება. მოძრაობის სიბრტყე ნახატზე დაშტრიხულია —

ეს არის „ცენტრიდან“ მოძრავ წერტილამდე გავლებული რადიუსის მიერ განვლილი ფართი.

შეიძლება გავაერთიანოთ ცნობები მოძრაობის სიბრტყის მიმართულებისა და იმპულსის მომენტის სიდიდის შესახებ. ამისათვის უნდა გამოვიყენოთ მოძრაობის სიბრტყის ნორმალის გასწვრივ მიმართული და სიდიდით მომენტის აბსოლუტური მნიშვნელობის ტოლი მომენტის ვექტორი. მაგრამ ეს არ კმარა — საჭიროა სიბრტყეზე მოძრაობის მიმართულების გათვალისწინებაც: სხეულს ცენტრის ირგვლივ ბრუნვა შეუძლია როგორც საათის ისრის მიმართულებით, ისე მის საწინააღმდეგოდაც.

იმპულსის ვექტორის გამოსახვა ისეა მიღებული, რომ თუ ვექტორის საწინააღმდეგოდ ვიყურებით, წერტილის ბრუნვას საათის ისრის საწინააღმდეგო მიმართულებით უნდა ვხედავდეთ. შეიძლება სხვანაირადაც ვთქვათ: იმპულსის მომენტის ვექტორის მიმართულება ისეა დაკავშირებული ბრუნვის მიმართულებასთან, როგორც ჩახრახნის დროს ბურღის გადაადგილების მიმართულება მისი სახელურის ბრუნვის მიმართულებასთან.



ნახ. 62.

ამრიგად, თუ იმპულსის მომენტის ვექტორი ვიცით, შეგვიძლია ვიმსჯელოთ მომენტის სიდიდეზე, მოძრაობის სიბრტყის სივრცეში მდებარეობასა და „ცენტრის“ მიმართ ბრუნვის მიმართულებაზე.

თუ მოძრაობა ერთსა და იმავე სიბრტყეში სრულდება, მაგრამ მხარი და სიჩქარე იცვლება, მაშინ იმპულსის მომენტის ვექტორი ინარჩუნებს თავის მიმართულებას სივრცეში, მაგრამ იცვლის სიგრძეს. ხოლო ნებისმიერი მოძრაობის შემთხვევაში იმპულსის ვექტორი სიდიდითაც იცვლება და მიმართულებითაც.

შეიძლება გვეჩვენოს, რომ მოძრაობის სიბრტყის მიმართულებისა და ბრუნვის მომენტის სიდიდის ასეთი გაერთია-

ნება ერთ ცნებაში მხოლოდ სიტყვების ეკონომიის მიზანს ემსახურება. სინამდვილეში, თუკი საქმე გვაქვს ისეთ სხეულთა სისტემასთან, რომლებიც ერთ სიბრტყეში არ ბრუნავენ, მომენტის მუდმივობის კანონს მხოლოდ მაშინ მივიღებთ, როდესაც ბრუნვით მომენტებს ისე შევკრებთ, როგორც ვექტორებს.

სწორედ ეს გარემოება გვიჩვენებს, რომ ბრუნვითი მომენტისათვის ვექტორული ხასიათის მიწერას ღრმა შინაარსი აქვს.

ბრუნვითი მომენტი ყოველთვის განისაზღვრება რომელიმე პირობით არჩეული „ცენტრის" მიმართ. ბუნებრივია, რომ მისი სიდიდე, საერთოდ, ამ წერტილის არჩევისგან არის დამოკიდებული. მაგრამ შეიძლება ვაჩვენოთ, რომ თუ სხეულთა სისტემა, რომელსაც განვიხილავთ როგორც მთლიანს, უძრავია (მისი სრული იმპულსი ნულის ტოლია), მაშინ ბრუნვის მომენტის ვექტორი „ცენტრის" არჩევისგან არ არის დამოკიდებული. ბრუნვის ამ მომენტს შეიძლება სხეულთა სისტემის შინაგანი ბრუნვითი მომენტი ვუწოდოთ.

იმპულსის მომენტის ვექტორის მუდმივობის კანონი მესამე და უკანასკნელი მუდმივობის კანონია მექანიკაში. მაგრამ ჩვენ ვღალატობთ სიზუსტეს, როდესაც ვამბობთ, რომ მუდმივობის კანონი მხოლოდ სამია. იმპულსი და იმპულსის მომენტი ხომ ვექტორული სიდიდეებია, ხოლო ვექტორული სიდიდის მუდმივობის კანონი ნიშნავს, რომ უცვლელია სიდიდის არა მარტო რიცხვითი მნიშვნელობა, არამედ მისი მიმართულებაც, სხვანაირად რომ ვთქვათ, უცვლელია ვექტორის სამი მდგენელი სივრცეში სამი ურთიერთმართობი მიმართულების გასწვრივ. ენერგია რიცხვითი მნიშვნელობაა, იმპულსი — ვექტორული, ბრუნვის მომენტიც აგრეთვე ვექტორულია. ამიტომაც უფრო სწორი იქნება თუ ვიტყვით, რომ მექანიკაში გვხვდება მუდმივობის შვიდი კანონი.

ბზრიალა

სცადეთ თეფში ძირით წვრილ ჯოხზე დადგათ და წონასწორობის მდგომარეობაში დაიკავოთ. არაფერი არ გამოვა. მაგრამ ასეთი ტრიუკი ჩინელი ჟონგლიორების საყვარელი ნო-

მერია. ისინი ამ ამოცანას ერთდროულად რამდენიმე ჯოხით ასრულებენ. ჟონგლიორი სულაც არ ცდილობს, წვრილი ჯოხები ვერტიკალურ მდგომარეობაში გააჩეროს. სასწაულის შთაბეჭდილებას ახდენს ის, რომ თეფშები, რომლებიც ოდნავ ეყრდნობა ჰორიზონტალურად დახრილი ჯოხების ბოლოებს, არ ცვივა და თითქმის ჰაერშია ჩამოკიდებული.

თუ შემთხვევა გექნებათ ახლოდან დაუკვირდეთ ჟონგლიორის მუშაობას, ყურადღება მიაქციეთ ერთ მნიშვნელოვან გარემოებას: ჟონგლიორი ისე ატრიალებს თეფშებს, რომ ისინი სწრაფად ბრუნავენ თავიანთ სიბრტყეში.

გურზებით, რგოლებით, ქუდებით ჟონგლირებისას, მსახიობი ყოველთვის ბრუნვით მოძრაობას ანიჭებს მათ. მხოლოდ ამ შემთხვევაში უბრუნდებიან საგნები საწყის მდგომარეობას.

რა უნდა იყოს ბრუნვის ასეთი მდგრადობის მიზეზი? იგი მომენტის მუდმივობის კანონთან არის დაკავშირებული. ბრუნვის ღერძის მიმართულების შეცვლისას ხომ ბრუნვის მომენტის ვექტორის მიმართულებაც იცვლება. ისევე, როგორც სიჩქარის მიმართულების შესაცვლელად საჭიროა ძალა, ბრუნვის მიმართულების შესაცვლელადაც საჭიროა ძალის მომენტი, რომელიც მით მეტი უნდა იყოს, რაც უფრო სწრაფად ბრუნავს სხეული.

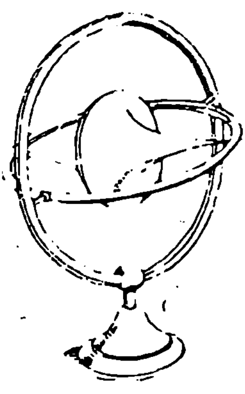
სწრაფად მბრუნავი სხეულის მისწრაფება უცვლელად შეინარჩუნოს ბრუნვის ღერძის მიმართულება, აღწერილის მსგავს მრავალ სხვა შემთხვევაშიც შეიძლება შევამჩნიოთ. მაგალითად, სწრაფად მბრუნავი ბზრიალა არ ყირავდება მაშინაც კი, როცა მისი ღერძი დახრილია.

სცადეთ ხელით წააქციოთ მბრუნავი ბზრიალა; აღმოჩნდება, რომ ამის გაკეთება არც ისე ადვილია. მბრუნავი სხეულის მდგრადობას არტილერიაში იყენებენ. ალბათ გაგიგონიათ, რომ ქვემეხის ლულაში ხრახნული კუთხვილი კეთდება. გამოტყორცნილი ჭურვი თავისი ღერძის ირგვლივ ბრუნავს და ამის წყალობით ჰაერში „ყირაზე არ გადადის". კუთხვილიანი ქვემეხი გაცილებით უფრო ზუსტად ხვდება მიზანს და უფრო შორს სროლის საშუალებასაც იძლევა, ვიდრე უკუთხვილო.

მფრინავისათვის და საზღვაო ნავიგატორისათვის აუცილებელია ყოველთვის იცოდეს, სად მდებარეობს მოცემულ მო-

მენტში დედამიწის ჭეშმარიტი ვერტიკალი თვითმფრინავის ან გემის მდებარეობის მიმართ. შვეული ამ მიზნისათვის არ გამოდგება, რადგანაც აჩქარებული მოძრაობისას იგი გადაიხრება. ამიტომ განსაკუთრებული კონსტრუქციის სწრაფად მბრუნავ ბზრიალას — გიროჰორიზონტს იყენებენ. მისი ბრუნვის ღერძი დედამიწის ვერტიკალის გასწვრივ რომ მივმართოთ, იგი ამ მდგომარეობაში დარჩება, როგორც არ უნდა შეიცვალოს თვითმფრინავმა თავისი მდებარეობა სივრცეში.

მაგრამ რაზე დგას ბზრიალა? თუ მისი სადგამი თვითმფრინავთან ერთად მობრუნდა, როგორღა შეინარჩუნებს ბრუნვის ღერძი თავის მიმართულებას?


ნახ, 63.

სადგამის როლს ასრულებს ეგრეთ წოდებული კარდანის საკიდელის ტიპის მოწყობილობა (ნახ. 63). ამ მოწყობილობის საყრდენებში მინიმალური ხახუნისას ბზრიალას ისე შეუძლია მოძრაობა თითქოს ჰაერში იყოს ჩამოკიდებული.

მბრუნავი ბზრიალებით შეიძლება ტორპედოს ან თვითმფრინავის კურსის ავტომატურად დაცვა. ამ ამოცანას ასრულებენ მექანიზმები, რომლებიც ,,უთვალთვალებენ" ტორპედოს ღერძის გადახრას ბზრიალას ღერძიდან.

მბრუნავი ბზრიალების გამოყენება უდევს საფუძვლად ისეთი მნიშვნელოვანი ხელსაწყოს მოწყობილობას, როგორიც გიროკომპასია. შეიძლება დავამტკიცოთ, რომ კორიოლისისა და ხახუნის ძალების გავლენით ბზრიალას ღერძი ბოლოს და ბოლოს დედამიწის ღერძის პარალელურად დადგება და, მაშასადამე, ჩრდილოეთს გვიჩვენებს.

გიროკომპასებს ფართოდ იყენებენ საზღვაო ფლოტში. მათი მთავარი ნაწილია მძიმე მქნევარა მოტორი, რომელიც წუთში 25.000-მდე ბრუნვას აკეთებს.

მიუხედავად სხვადასხვა ხელისშემშლელი გარემოებებისა, კერძოდ, ხომალდის რწევის გავლენის თავიდან აცილებისას

წარმოქმნილი სიძნელეებისა, გიროკომპასებს მაგნიტურ კომპასებთან შედარებით უპირატესობა აქვთ. უკანასკნელთა ნაკლია ჩვენებათა დამახინჯება რკინის საგნებისა და ხომალდის ელექტრული დანადგრების გავლენით.

მოქნილი ლილვი

თანამედროვე ორთქლის ტურბინების ლილვები ამ გრანდიოზული მანქანების მნიშვნელოვანი ნაწილებია. 10 მ სიგრძისა და 0,5 მ განივკვეთის ლილვის დამზადება რთული ტექნოლოგიური ამოცანაა. მძლავრი ტურბინის ლილვის დატვირთვა შეიძლება 200 ტ აღწევდეს, ხოლო ბრუნვის სიჩქარე — 3.000 ბრ/წთ.

ერთი შეხედვით შეიძლება ვიფიქროთ, რომ ასეთი ლილვი განსაკუთრებით მყარი და მაგარი უნდა იყოს. მაგრამ ეს ასე არ არის. როდესაც ბრუნვის სიჩქარე წუთში რამდენიმე ათეულ ათას ბრუნვას უდრის, ხისტად დამაგრებული ლილვი, რომელსაც არ შეუძლია გაღუნვა, როგორი სიმტკიცისაც არ უნდა იყოს, მაინც ტყდება.

ძნელი არ არის იმის გაგება, თუ რატომ არ შეიძლება ხისტი ლილვების გამოყენება. რა სიზუსტითაც არ უნდა მუშაობდნენ მანქანათმშენებლები, მათ არ შეუძლიათ გამორიცხონ ტურბინის ბორბლის თუნდაც სულ მცირე ასიმეტრია. ასეთი ბორბლის ბრუნვისას უზარმაზარი ცენტრიდანული ძალები წარმოიშობა—მოგაგონებთ, რომ მათი მნიშვნელობა ბრუნვის სიჩქარის კვადრატის პროპორციულია. თუ ისინი ზუსტად არ არიან გაწონასწორებული, ლილვი იწყებს საკისრებზე „ცემას" (გაუწონასწორებელი ცენტრიდანული ძალები ხომ მანქანასთან ერთად „ბრუნავენ"), ტეხავს მათ და ამსხვრევს მანქანას.

ეს მოვლენა თავის დროზე გადაულახავ დაბრკოლებას უქმნიდა ტურბინის სიჩქარის გადიდებას. გამოსავალი მხოლოდ XIX—XX საუკუნეების მიჯნაზე იპოვეს და ტურბინმშენებლობის ტექნიკაში მოქნილი ლილვები შემოიღეს.

იმისათვის, რომ გავიგოთ ამ შესანიშნავი გამოგონების იდეა, ცენტრიდანული ძალების ჯამური მოქმედება უნდა გამოვითვალოთ. მაგრამ როგორ შევკრიბოთ ეს ძალები? ირკვევა, რომ ყველა ცენტრიდანული ძალის ტოლქმედი ლილვის სიმძიმის ცენტრზეა მოდებული და ისეთივე სიდიდე აქვს, თითქოს ტურბინის ბორბლის მთელი მასა სიმძიმის ცენტრში იყოს თავმოყრილი.

აღვნიშნოთ a-თი ტურბინის ბორბლის სიმძიმის ცენტრის მანძილი ღერძიდან, რომელიც ნულისგან ბორბლის მცირე ასიმეტრიის გამო განსხვავდება. ბრუნვისას ლილვზე იმოქმედებს ცენტრიდანული ძალები და ლილვი გაიღუნება. ლილვის გადანაცვლება l-ით აღვნიშნოთ. ვიანგარიშოთ ეს სიდიდე. ცენტრიდანული ძალის ფორმულა ჩვენთვის ცნობილია (იხ. გვ 70) — ეს ძალა პროპორციულია სიმძიმის ცენტრიდან ღერძამდე მანძილისა, რომელიც ახლა არის $a+l$ და ტოლია $4\pi^2n^2M(a+l)$, სადაც n წუთში ბრუნვების რიცხვია, ხოლო M — მბრუნავი ნაწილების მასა. ცენტრიდანული ძალა წონასწორდება დრეკადი ძალით, რომელიც ლილვის გადნაცვლების პროპორციულია და ტოლია kl-ისა, სადაც k კოეფიციენტი ლილვის სიხისტეს ახასიათებს. ამრიგად:

$$kl = 4\pi^2n^2M(a+l)$$

საიდანაც

$$l = a\,\frac{1}{\dfrac{k}{4\pi^2n^2M}-1}.$$

ამ ფორმულიდან ჩანს, რომ მოქნილი ლილვისათვის საშიში არ არის ბრუნვების დიდი რიცხვი. n-ის ძალიან დიდი (თუნდაც უსასრულოდ დიდი) მნიშვნელობებისას ლილვის გაღუნვის სიდიდე l უსაზღვროდ არ იზრდება. სიდიდე $\dfrac{k}{4\pi^2n^2M}$, რომელიც უკანასკნელ ფორმულაშია, ნულს უტოლდება, ხოლო ლილვის გაღუნვა l — ასიმეტრიის სიდიდეს შებრუნებული ნიშნით.

გამოთვლის ასეთი შედეგი ნიშნავს, რომ დიდი ბრუნვებისას ასიმეტრიული ბორბალი, გაგლეჯის ნაცვლად ისე ღუნავს ლილვს, რომ ასიმეტრიის გავლენა მოისპოს. ღუნვადი ლილვი მბრუნავი ნაწილების ცენტრირებას ახდენს, თავისი გაღუნვით სიმძიმის ცენტრი ბრუნვის ღერძზე გადააქვს ამრიგად ცენტრიდანული ძალის გავლენა ნულზე დაჰყავს.

ლილვის მოქნილობა არ არის ნაკლი, პირიქით, ეს მდგრადობის აუცილებელი პირობაა. მდგრადობისათვის ლილვი ხომ a სიდიდით უნდა გაიღუნოს და ამავე დროს არ უნდა გატყდეს.

დაკვირვებული მკითხველი ალბათ შენიშნავს შეცდომას ჩვენს მსჯელობაში. თუ დიდი ბრუნვებისას „მაცენტრირებელ" ლილვს ჩვენს მიერ ნაპოვნი წონასწორობის მდებარეობიდან გადავანაცვლებთ და მარტო ცენტრიდანულ და დრეკად ძალებს განვიხილავთ, ადვილად შევამჩნევთ, რომ ეს წონასწორობა მდგრადი არ არის. მაგრამ აღმოჩნდა, რომ კორიოლისის ძალების გავლენით მდგომარეობა გამოსწორდება და წონასწორობა სავსებით მდგრადი გახდება.

ტურბინა ნელა იწყებს ბრუნვას. დასაწყისში, როცა n ძლიერ მცირეა, $\dfrac{k}{4\pi^2 n^2 M}$ წილადს დიდი მნიშვნელობა ექნება. ვიდრე ეს წილადი ბრუნვების რიცხვის ზრდისას ერთს გადააჭარბებს, ლილვის გაღუნვის სიდიდეს იგივე ნიშანი ექნება, რაც ბორბლის ცენტრის საწყისი გადანაცვლების სიდიდეს. ამრიგად, მოძრაობის ამ საწყის მომენტებში ლილვი არ ახდენს ბორბლის ცენტრირებას, პირიქით, თავისი გაღუნვით ზრდის სიმძიმის ცენტრის საერთო გადანცვლებას და, ამრიგად, ცენტრიდანულ ძალასაც. ბრუნვათა n რიცხვის ზრდისას (ამასთან, დაცული უნდა იყოს პირობა $\dfrac{k}{4\pi^2 n^2 M} > 1$) გადანაცვლება იზრდება და , ბოლოს, კრიტიკული მომენტი დგება. როცა $\dfrac{k}{4\pi^2 n^2 M} = 1$ მნიშვნელი l-ის ფორმულაში ნულის ტოლი ხდება, რაც ფორმალურად იმას ნიშნავს, რომ ლილვის გაღუნვა უსასრულოდ დიდდება. ბრუნვის ასეთი სიჩქარისას ლილვი ტყდება. ტურბინის გაშვების დროს ეს მომენტი ძა-

ლიან სწრაფად უნდა გავიაროთ, ბრუნვათა კრიტიკული მნიშვნელობა სწრაფად უნდა გავირბინოთ და ტურბინის მნიშვნელოვნად უფრო სწრაფად მოძრაობაზე გადავიდეთ, რომლის დროსაც თვითცენტრირების ზემოთ აღწერილი მოვლენა იწყება.

მაგრამ რა კრიტიკული მომენტია ეს? მისი პირობა ჩვენ ასეთი სახით შეგვიძლია გადავწეროთ:

$$4\pi^2 \frac{M}{k} = \frac{1}{n^2}.$$

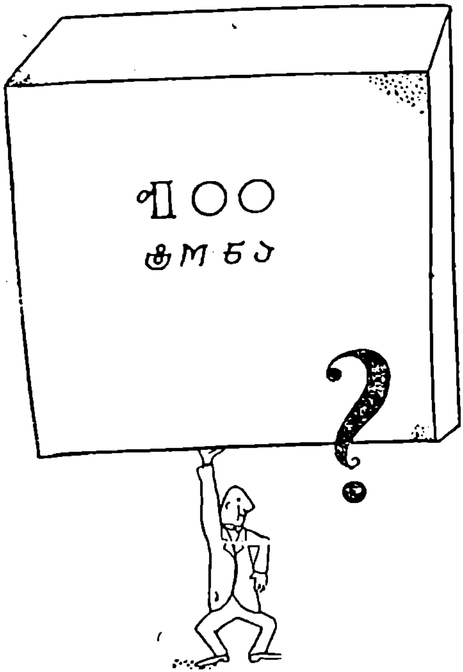
ან, თუ მობრუნებათა რიცხვს შევცვლით ბრუნვის პერიოდით $n=\frac{1}{T}$ თანაფარდობის საშუალებით და ფესვს ამოვიღებთ, ასეთი სახით:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k}}.$$

რა სიდიდე მივიღეთ ტოლობის მარჯვენა მხარეზე? ფორმულას ძალიან ნაცნობი სახე აქვს. თუ 130 გვერდზე ჩავიხედავთ, ვნახავთ, რომ მარჯვენა ნაწილში გვაქვს ლილვზე ბორბლის საკუთარი რხევის პერიოდი. $2\pi\sqrt{\frac{M}{k}}$ პერიოდი ის პერიოდია, რომლითაც დაიწყებდა რხევას ტურბინის M მასის მქონე ბორბალი k სიხისტის ლილვზე, თუკი ბორბალს განზე გავწევდით, რათა რხევა თავისთავად შეესრულებინა.

ამრიგად, სახიფათო მომენტი ტურბინის ბორბლის ბრუნვის პერიოდის დამთხვევაა ტურბინა — ლილვის სისტემის საკუთარი რხევების პერიოდთან. ბრუნვათა კრიტიკული რიცხვის არსებობა რეზონანსის მოვლენასთან არის დაკავშირებული.

VII. მიზიდულობა



რას უჭირავს დედამიწა?

შორეულ წარსულში ამ კითხვაზე უბრალოდ პასუხობდნენ: სამ ვეშაპს. მართალია, გაურკვეველი რჩებოდა, ვეშაპები რაღას ეყრდნობოდნენ, მაგრამ ჩვენს გულუბრყვილო წინაპრებს ეს არ აფიქრებდა.

სწორი წარმოდგენა დედამიწის მოძრაობაზე, მის ფორმასა და მზის ირგვლივ პლანეტების მოძრაობის კანონზომიერებებზე ბევრად უფრო ადრე წარმოიშვა, ვიდრე გაიგებდნენ თუ რა იყო პლანეტების მოძრაობის მიზეზი.

მართლაცდა, რას „უჭირავს" დედამიწა და პლანეტები? რატომ მოძრაობენ ისინი მზის ირგვლივ გარკვეული გზებით და არ ილტვიან მისგან?

პასუხი ასეთ კითხვებზე დიდი ხნის განმავლობაში არ იყო და ეკლესია, რომელიც სამყაროს აგებულების კოპერნიკის სისტემის წინააღმდეგ იბრძოდა, ამას დედამიწის მოძრაობის ფაქტის უარსაყოფად იყენებდა.

ჭეშმარიტების აღმოჩენას ჩვენ დიდ ინგლისელ მეცნიერს ისააკ ნიუტონს (1643 — 1727) უნდა ვუმადლოდეთ.

ცნობილი ისტორიული ანეგდოტის მიხედვით, ბაღში ვაშლის ხის ძირას მჯდომი ნიუტონი ჩაფიქრებული აკვირდებოდა, როგორ ყრიდა ქარი მიწაზე ვაშლებს და ასე მივიდა სამყაროს ყველა სხეულს შორის მიზიდულობის ძალის არსებობის იდეამდე.

ნიუტონის აღმოჩენის შედეგად გამოირკვა, რომ მრავალი, თითქოს სხვადასხვაგვარი მოვლენა — თავისუფალი სხეულების მიწაზე ვარდნა, მთვარისა და მზის ხილული მოძრაობა, ოკეანის მოქცევა და ა. შ. — წარმოადგენს ბუნების ერთი და იმავე კანონის — მსოფლიო მიზიდულობის კანონის გამოვლინებას.

სამყაროს ყველა სხეულს შორის, ამბობს ეს კანონი, იქნება ეს ქვიშის ან მუხუდოს მარცვალი, ქვა თუ პლანეტა, ურთიერთმიზიდულობის ძალები მოქმედებს.

ერთი შეხედვით კანონი არასწორი ჩანს: რაღაც ვერ ვამჩნევთ, რომ ჩვენი გარემომცველი საგნები ერთმანეთს იზიდავდნენ. დედამიწა ნებისმიერ სხეულებს იზიდავს, ამაში არავის არ შეეპარება ეჭვი. მაგრამ იქნებ ეს დედამიწის განსაკუთრებული თვისებაა? არა, ეს ასე არ არის. ორი ნებისმიერი სხეულის მიზიდულობა არ არის დიდი და ამიტომ არ გვხვდება თვალში. მიუხედავად ამისა, სპეციალური ცდებით შეიძლება ამ მიზიდულობის აღმოჩენა. მაგრამ ამაზე შემდეგ.

მხოლოდ და მხოლოდ მსოფლიო მიზიდულობის კანონი ხსნის მზის სისტემის მდგრადობას, პლანეტებისა და სხვა ციური სხეულების მოძრაობას.

მთვარეს ორბიტაზე დედამიწის მიზიდულობის ძალები აკა-

ვებენ, დედამიწას თავის ტრაექტორიაზე — მზის მიზიდულობის ძალები.

ციური სხეულები ისე მოძრაობენ, როგორც თოკით დატრიალებული ქვა.

მსოფლიო მიზიდულობის ძალები უხილავი „ბაგირებია“, რომლებიც ციურ სხეულებს აიძულებენ გარკვეულ ორბიტებზე იმოძრაონ.

მსოფლიო მიზიდულობის ძალების არსებობის მტკიცება ჯერ კიდევ ცოტას ნიშნავდა. ნიუტონმა აღმოაჩინა მიზიდულობის კანონი და განმარტა, რაზეა დამოკიდებული ეს ძალები.

მსოფლიო მიზიდულობის კანონი

პირველი კითხვა, რომელიც ნიუტონმა თავის თავს დაუსვა, ასეთი იყო: რითი განსხვავდება მთვარის აჩქარება ვაშლის აჩქარებისაგან? სხვანაირად რომ ვთქვათ, რა განსხვავებაა g აჩქარებასა, რომელსაც დედამიწა ქმნის თავის ზედაპირზე, ე. ი. ცენტრიდან r მანძილზე, და დედამიწის მიერ R მანძილზე, ანუ დედამიწიდან მთვარის დაშორების მანძილზე შექმნილ აჩქარებას შორის?

ეს $\frac{v^2}{R}$ აჩქარება რომ გამოვთვალოთ, უნდა ვიცოდეთ მთვარის მოძრაობის სიჩქარე და დედამიწიდან მისი მანძილი. ორივე ეს მნიშვნელობა ნიუტონისათვის ცნობილი იყო. მთვარის აჩქარება დაახლოებით 0,27 სმ/წმ^2 ტოლი აღმოჩნდა. ეს თითქმის 3600-ჯერ ნაკლებია $g=980$ სმ/წმ^2 მნიშვნელობაზე.

მაშასადამე, დედამიწის მიერ წარმოშობილი აჩქარება მცირდება დედამიწის ცენტრიდან დაშორებისას. მაგრამ რა სისწრაფით? მანძილი დედამიწის სამოცი რადიუსის ტოლია. ხოლო 3600 60-ის კვადრატია. მანძილის 60-ჯერ გაზრდით აჩქარება ჩვენ 60^2-ჯერ შევამცირეთ.

ნიუტონმა დაასკვნა, რომ აჩქარება და, მაშასადამე, მიზიდულობის ძალაც მანძილის კვადრატის უკუპროპორციულად იცვლება. შემდეგ ჩვენ უკვე ვიცით, რომ სიმძიმის ველში სხე-

ულზე მოქმედი ძალა მისი მასის პროპორციულია. ამიტომ პირველი სხეული იზიდავს მეორეს მეორე სხეულის მასის პროპორციული ძალით, ხოლო მეორე სხეული იზიდავს პირველს პირველი სხეულის მასის პროპორციული ძალით.

ლაპარაკია იგივურად ტოლ ქმედებისა და უკუქმედების ძალებზე. მაშასადამე, ურთიერთმიზიდულობის ძალა როგორც ერთი, ისე მეორე სხეულის მასის, სხვანაირად რომ ვთქვათ, ამ მასების ნამრავლის პროპორციული უნდა იყოს.

ამრიგად,

$$F=\gamma\frac{Mm}{r^2}.$$

სწორედ ეს არის მსოფლიო მიზიდულობის კანონი. ნიუტონმა იგულისხმა, რომ ასეთი კანონი სამართლიანი იქნებოდა სხეულთა ნებისმიერი წყვილისათვის.

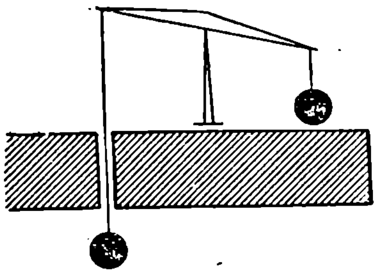
ეს გაბედული ჰიპოთეზა ამჟამად სავსებით დამტკიცებულია. ამგვარად, ორი სხეულის მიზიდულობის ძალა მათი მასების ნამრავლის პირდაპირპროპორციული და მათ შორის მანძილის კვადრატის უკუპროპორციულია.

მაგრამ ეს γ რაღა არის, ფორმულაში რომ შევიდა? ეს პროპორციულობის კოეფიციენტია. ხომ არ შეიძლება იგი ერთის ტოლად ჩავთვალოთ, როგორც მრავალჯერ გაგვიკეთებია? არა, არ შეიძლება: ჩვენ შევთანხმდით მასა გრამებში, მანძილი სანტიმეტრებში, ხოლო ძალა დინებში გაგვეზომა. γ-ს მნიშვნელობა ტოლია ორ თითოგრამიან სხეულს შორის მიზიდულობის ძალისა, თუ ისინი 1 სმ არიან ერთმანეთს დაშორებული. ჩვენ არ შეგვიძლია ძალა ჩავთვალოთ რაღაცის, თუნდაც ერთი დინის ტოლად: γ კოეფიციენტი უნდა გაიზომოს.

γ-ს საპოვნელად, ცხადია, აუცილებელი არ არის გრამიან საწონებს შორის მიზიდულობის ძალის გაზომვა. ჩვენ დაინტერესებული ვართ გაზომვა მასიურ სხეულებზე ჩავატაროთ — მაშინ ძალა მეტი იქნება.

თუ განვსაზღვრავთ ორი სხეულის მასას, გვეცოდინება მათ შორის მანძილი და გავზომავთ მიზიდულობის ძალას, მაშინ γ-ს უბრალო გამოთვლით ვიპოვით.

ასეთი ცდები მრავალჯერ ჩაუტარებიათ. ისინი გვიჩვენებენ, რომ γ-ს მნიშვნელობა ყოველთვის ერთი და იგივეა, ურთიერთმიმზიდავი სხეულების მასალისა და აგრეთვე იმ გარემოს თვისებებისაგან დამოუკიდებლად, რომელშიაც ისინი იმყოფებიან. γ-ს გრავიტაციული მუდმივა ეწოდება. იგი ტოლია $\gamma = 6{,}67 \cdot 10^{-8}$ სმ³/გ·წმ².



ნახ. 64.

γ-ს გაზომვის ერთ-ერთი ცდის სქემა ნახ. 64-ზეა ნაჩვენები. სასწორის მხრეულის ბოლოებზე დაკიდულია ტოლი მასის ორი ბურთულა. ერთი მათგანი ტყვიის ფილის ქვეშაა, მეორე—მის ზემოთ. ტყვია (ცდისთვის აღებულია 100 ტ ტყვია) თავისი მიზიდულობით ზრდის მარჯვენა ბურთულის წონას და ამცირებს მარცხენას წონას. მარჯვენა ბურთულა მარცხენას გადასძლევს. სასწორის მხრეულის გადახრის სიდიდის მიხედვით გამოვითვლით γ-ს მნიშვნელობას.

γ-ს უმნიშვნელო სიდიდით აიხსნება ორ სხეულს შორის მიზიდულობის ძალის აღმოჩენის სიძნელე.

ორი მძიმე 1000 კილოგრამიანი ტვირთი ერთმანეთს უმნიშვნელო ძალით, სულ 6,7 დინით, ე. ი. 0,007 გ-ით იზიდავს, თუ ეს საგნები ერთმანეთისგან, ვთქვათ, 1 მ მანძილზე იმყოფებიან.

მაგრამ რა უზარმაზარია ციურ სხეულთა შორის მიზიდულობის ძალა! მთვარესა და დედამიწას შორის.

$$F = 6{,}7 \cdot 10^{-8} \frac{6 \cdot 10^{27} \cdot 0{,}74 \cdot 10^{26}}{(38 \cdot 10^{9})^2} = 2 \cdot 10^{25} \text{ დინს} \approx 2 \cdot 10^{19} \text{ კგ ძ;}$$

დედამიწასა და მზეს შორის

$$F = 6{,}7 \cdot 10^{-8} \frac{2 \cdot 10^{33} \cdot 6 \cdot 10^{27}}{(15 \cdot 10^{12})^2} = 3{,}6 \cdot 10^{27} \text{ დინს} \approx 3{,}6 \cdot 10^{21} \text{ კგ-ძ!}$$

დედამიწის აწონვა

ვიდრე მსოფლიო მიზიდულობის კანონით ვისარგებლებდეთ, ერთ მნიშვნელოვან დეტალს უნდა მივაქციოთ ყურადღება.

ჩვენ გამოვიანგარიშეთ მიზიდულობის ძალა 1 მ მანძილით დაშორებულ ორ ტვირთს შორის. მაგრამ ეს სხეულები ერთმანეთისგან 1 სმ ტოლ მანძილზე რომ ყოფილიყვნენ? რა უნდა ჩავსვათ ფორმულაში — სხეულების ზედაპირებს შორის მანძილი, სიმძიმის ცენტრებს შორის მანძილი თუ კიდევ რაიმე სხვა?

მსოფლიო მიზიდულობის კანონის $F=\gamma\frac{m_1m_2}{r^2}$ მთელი სიმკაცრით გამოყენება მაშინ შეიძლება, როდესაც ასეთი ეჭვი არ წარმოიშობა. სხეულებს შორის მანძილი მათ ზომაზე ბევრად დიდი უნდა იყოს; ჩვენ უფლება უნდა გვქონდეს სხეულები როგორც წერტილები ისე განვიხილოთ. როგორღა გამოვიყენოთ კანონი ორი ერთმანეთთან ახლოს მდებარე სხეულისთვის? პრინციპულად ეს ადვილია: აზრით სხეული მცირე ნაწილებად უნდა დავყოთ, ყოველი წყვილისთვის ვიანგარიშოთ F ძალა, ხოლო შემდეგ ყველა ძალა შევკრიბოთ (ვექტორულად).

პრინციპულად ეს ადვილია, მაგრამ პრაქტიკულად საკმაოდ ძნელი.

თუმცა ამ შემთხვევაში ბუნება დაგვეხმარა. გამოთვლა გვიჩვენებს: თუ სხეულის ნაწილაკები $\frac{1}{r^2}$-ის პროპორციული ძალით ურთიერთმოქმედებენ, მაშინ სფეროსებური სხეულები სფეროების ცენტრებში მოთავსებული წერტილების მსგავსად მიიზიდებიან. ახლოს მდებარე ორი სფეროსთვის ფორმულა $F=\gamma\frac{m_1m_2}{r^2}$ ზუსტად სამართლიანია, ისევე როგორც დაშორებულთათვის, თუ r სფეროების ცენტრებს შორის მანძილია. ეს წესი ადრე ჩვენ უკვე გამოვიყენეთ, როდესაც დედამიწის ზედაპირზე აჩქარებას ვითვლიდით.

ახლა უფლება გვაქვს ვისარგებლოთ მიზიდულობის ფორმულით და დედამიწის მიერ სხეულის მიზიდულობის ძალა გამოვიანგარიშოთ. r-ის ქვეშ უნდა ვიგულისხმოთ მანძილი დედამიწის ცენტრიდან სხეულამდე.

ვთქვათ, M დედამიწის მასაა და R მისი რადიუსია. მაშინ m მასის სხეულის მიზიდულობის ძალა დედამიწის ზედაპირთან

$$F=\gamma\frac{M}{R^2}\cdot m.$$

მაგრამ ეს ხომ სხეულის წონაა, რომელსაც ჩვენ ყოველთვის გამოვსახავთ როგორც mg. მაშ, სიმძიმის ძალის აჩქარება

$$g=\gamma\frac{M}{R^2}.$$

ახლა კი შეგვიძლია ვთქვათ, როგორ აწონეს დედამიწა. g, γ და R ცნობილი სიდიდეებია; დედამიწის მასა ამ ფორმულის მიხედვით შეიძლება გამოვითვალოთ. ასეთივე ხერხით შეიძლება მზის აწონვაც.

მაგრამ განა შეიძლება ამ გამოანგარიშებას აწონვა ვუწოდოთ? რასაკვირველია, შეიძლება; არაპირდაპირი გაზომვა ფიზიკაში არანაკლებ როლს ასრულებს, ვიდრე პირდაპირი გაზომვა.

ახლა ერთი საინტერესო ამოცანა ამოვხსნათ.

მსოფლიო ტელეხედვის შექმნის გეგმაში არსებით როლს ასრულებს „დაკიდებული" თანამგზავრის შექმნა. ეს თანამგზავრი დედამიწის ზედაპირს ზევით ყოველთვის ერთსა და იმავე წერტილში უნდა იყოს გაჩერებული. იმოქმედებს თუ არა ასეთ თანამგზავრზე არსებითი სიდიდის ხახუნის ძალა? ეს იმაზეა დამოკიდებული, თუ დედამიწიდან რა მანძილზე ბრუნავს ის.

„დაკიდებული" თანამგზავრი უნდა ბრუნავდეს 24 საათის ტოლი T პერიოდით. თუ r არის დედამიწის ცენტრიდან თანამგზავრის დაშორების მანძილი, მაშინ მისი სიჩქარე $v=\frac{2\pi r}{T}$,

აჩქარება კი $\frac{v^2}{r}=\frac{4\pi^2}{T^2}r$. მეორე მხრივ, ეს აჩქარება, რომლის წყაროსაც დედამიწის მიზიდულობა წარმოადგენს, ტოლია $\gamma\frac{M}{r^2}=g\frac{R^2}{r^2}$. აჩქარებათა სიდიდეების გატოლებით მივიღებთ:

$$g\frac{R^2}{r^2}=\frac{4\pi^2 r}{T^2}, \text{ ანუ } r^3=\frac{gR^2T^2}{4\pi^2}.$$

თუ ჩავსვამთ დამრგვალებულ მნიშვნელობებს $g=10$ მ/წმ², $R=6\cdot10^6$მ და $T=9\cdot10^4$ წმ, მივიღებთ: $r^3=7\cdot10^{22}$, ანუ $r\approx4\cdot10^7$ მ$=40.000$ კმ. ასეთ სიმაღლეზე ატმოსფერული ხახუნი არ არის და „დაკიდებული" თანამგზავრი, თუ მისი შექმნა მოხერხდება, არ შეანელებს თავის „უძრავ რბოლას".

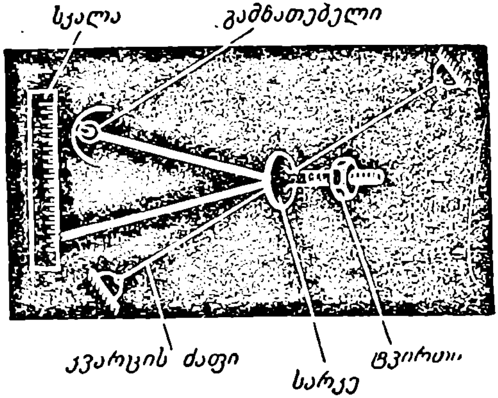
g-ს გაზომვა დაზვერვის სამსახურში

ჩვენ აქ სამხედრო დაზვერვაზე არ გვექნება ლაპარაკი, სადაც სიმძიმის ძალის აჩქარების ცოდნა არ არის საჭირო. მხოლოდ გეოლოგიურ დაზვერვას შევეხებით, რომლის მიზანია სასარგებლო წიაღისეულთა პოვნა მიწის ქვეშ, ორმოების ამოთხრისა და შახტების გაყვანის გარეშე.

არსებობს სიმძიმის ძალის აჩქარების განსაზღვრის რამდენიმე ძალიან ზუსტი მეთოდი. შეიძლება ადვილად ვიპოვოთ g სტანდარტული ტვირთის ზამბარიან სასწორზე აწონვით. გეოლოგიური სასწორი უკიდურესად მგრძნობიარე უნდა იყოს — მისმა ზამბარამ გრამის მემილიონედზე ნაკლები ტვირთის დამატებით უნდა შეიცვალოს დაგრძელება. საუცხოო შედეგებს იძლევა კვარცის გრეხითი სასწორი. მისი მოწყობილობა პრინციპულად რთული არ არის. ჰორიზონტალურად დაჭიმულ კვარცის ძაფზე მიდუღებულია ბერკეტი, რომლის წონაც ძაფის მცირე გრეხას იწვევს (ნახ. 65).

იმავე მიზნისთვის იყენებენ ქანქარასაც. ჯერ კიდევ ცოტა ხნის წინათ g-ს გაზომვის ქანქარიანი მეთოდები ერთადერთი

იყო, და მხოლოდ უკანასკნელი 10—20 წლის განმავლობაში დაიჭირა მათი ადგილი აწონვის უფრო მოხერხებულმა და ზუსტმა მეთოდებმა. ყოველ შემთხვევაში, თუ ქანქარას რხე-



ნახ. 65

ვის პერიოდს გავზომავთ, ფორმულიდან $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ შეიძლება საკმაო სიზუსტით ვიპოვოთ g-ს მნიშვნელობა.

თუ ერთი და იმავე ხელსაწყოთი სხვადასხვა ადგილებზე გავზომავთ g მნიშვნელობას, შეიძლება ვიმსჯელოთ სიმძიმის ფარდობითი ცვლილების შესახებ მემილიონედი ნაწილების სიზუსტით.

დედამიწის ზედაპირის რომელიმე წერტილში g მნიშვნელობის გაზომვით, დამკვირვებელი დაადგენს: აქ მნიშვნელობა ანომალურია, იგი ნორმაზე ამდენით ნაკლებია ან ამდენით მეტიო.

მაგრამ რა არის ნორმა g სიდიდისათვის?

სიმძიმის ძალის აჩქარების მნიშვნელობას დედამიწის ზედაპირზე აქვს ორი კანონზომიერი ცვალებადობა, რომლებიც უკვე დიდი ხანია მიკვლეულია და კარგად არის ცნობილი მკვლევართათვის.

უპირველეს ყოვლისა, g კანონზომიერად მცირდება პოლუსიდან ეკვატორზე გადასვლისას. ამის შესახებ ზემოთ იყო

ნათქვამი. მოგაგონებთ მხოლოდ, რომ ასეთ ცვლილებას ორი მიზეზი იწვევს: ჯერ ერთი, დედამიწა სფერო არ არის და პოლუსთან მდებარე სხეული დედამიწის ცენტრთან უფრო ახლოს იქნება; მეორეც ის, რომ ეკვატორთან მიახლოებისას სიმძიმის ძალა სულ უფრო მეტად შესუსტდება ცენტრიდანული ძალით.

მეორე კანონზომიერი ცვლილება g-სი ეს არის შემცირება სიმაღლის მიხედვით. რაც უფრო მეტია დედამიწიდან მანძილი, მით ნაკლებია g, შემდეგი ფორმულის შესაბამისად: $g=\gamma\frac{M}{(R+h)^2}$, სადაც R დედამიწის რადიუსია, h—ზღვის დონიდან სიმაღლე.

ამრიგად, ერთსა და იმავე განედზე და ზღვის დონიდან ერთსა და იმავე სიმაღლეზე სიმძიმის ძალის აჩქარება ერთნაირი უნდა იყოს.

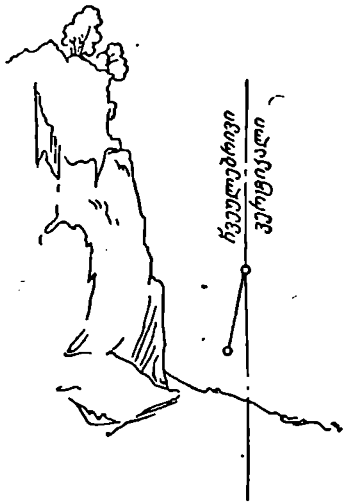
ზუსტი გაზომვა გვიჩვენებს, რომ საერთოდ ხშირად გვხვდება ამ ნორმიდან გადახრა — მიზიდულობის ანომალიები. ანომალიების მიზეზი გაზომვის ადგილის მახლობლად მასების არაერთგვაროვან განაწილებაში უნდა ვეძებოთ.

როგორც განვმარტეთ, დიდი სხეულის მხრივ მიზიდულობის ძალა შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც დიდი სხეულის ნაწილების მხრივ მოქმედი ძალების ჯამი. ქანქარას დედამიწისადმი მიზიდვა მასზე დედამიწის ყველა ნაწილის მოქმედების შედეგია. მაგრამ ცხადია, — უდიდესი წვლილი ჯამურ ძალაში მახლობელ ნაწილაკებს შეაქვთ — მიზიდულობა ხომ მანძილის კვადრატის უკუპროპორციულია.

როცა გაზომვის ადგილის მახლობლად მძიმე მასებია თავმოყრილი, g ნორმაზე მეტი იქნება, საწინააღმდეგო შემთხვევაში g ნორმაზე ნაკლებია.

თუ, მაგალითად, გავზომავთ g მთაზე და თვითმფრინავზე, რომელიც ზღვის ზემოთ მთის სიმაღლეზე მიფრინავს, პირველ შემთხვევაში უფრო დიდ რიცხვს მივიღებთ. მაგალითად, მთა ეტნაზე იტალიაში g მნიშვნელობა 0,292 სმ/წმ^2-ით მეტია ნორმაზე. ასევე ნორმაზე მეტია g მნიშვნელობა ოკეანის განმარტოებულ კუნძულებზე. ცხადია, ორივე შემთხვევაში g ზრდა აიხსნება გაზომვის ადგილას დამატებითი მასების თავმოყრით.

არა მარტო g სიდიდე, სიმძიმის ძალის მიმართულებაც შეიძლება გადაიხაროს ნორმიდან. თუ ტვირთს ძაფზე ჩამოვკიდებთ, მაშინ დაჭიმული ძაფი გვიჩვენებს ვერტიკალს ამ ადგილისათვის. ეს ვერტიკალი შეიძლება გადაიხაროს ნორმიდან. ვერტიკალის „ნორმალური" მიმართულება გეოლოგებისთვის ცნობილია სპეციალური რუკებიდან, რომლებზეც g მნიშვნელობების მონაცემების მიხედვით დედამიწის „იდეალური" ფიგურაა აგებული.



ნახ. 66.

წარმოიდგინეთ, რომ დიდი შვეულით ატარებთ ცდებს მთის ძირში. შვეულის ტვირთს დედამიწა თავისი ცენტრისკენ იზიდავს, მთა კი — განზე. ასეთ შემთხვევაში შვეული ნორმალური ვერტიკალის მიმართულებიდან უნდა გადაიხაროს (ნახ. 66). რადგანაც დედამიწის მასა მთის მასაზე ბევრად მეტია, ამიტომ ასეთი გადახრა რამდენიმე კუთხურ სეკუნდს არ აღემატება.

„ნორმალური" ვერტიკალი ვარსკვლავების მიხედვით განისაზღვრება, რადგანაც ნებისმიერი გეოგრაფიული წერტილისთვის გამოთვლილია ცის რომელი ადგილისკენ არის მიმართული დღე-ღამის და წელიწადის მოცემულ მომენტში დედამიწის „იდეალური" ფიგურის ვერტიკალი.

შვეულის გადახრა ხანდახან უცნაურ შედეგს იძლევა. მაგალითად, ფლორენციაში აპენინების გავლენა იწვევს შვეულის არა მიზიდვას, არამედ განზიდვას. ამის ახსნა მხოლოდ ერთი გარემოებით შეიძლება: მთებში უზარმაზარი სიცარიელეებია.

საინტერესო შედეგს იძლევა სიმძიმის ძალის აჩქარების

გაზომვა მატერიკებისა და ოკეანეების მასშტაბში. მატერიკები ოკეანეებზე გაცილებით უფრო მძიმეა, ამიტომ, თითქოს, g მნიშვნელობები მატერიკებზე მეტი უნდა ყოფილიყო, ვიდრე ოკეანეებზე. სინამდვილეში კი ერთი განედის გასწვრივ ოკეანეებსა და მატერიკებზე გაზომილი g მნიშვნელობები საშუალოდ ერთნაირია.

ახსნა კვლავ ერთადერთია: მატერიკები უფრო მსუბუქ ქანებს ეყრდნობა, ხოლო ოკეანეები — უფრო მძიმეს. მართლაც, იქ, სადაც უშუალო გამოკვლევის ჩატარება შეიძლება, გეოლოგები ადგენენ, რომ ოკეანეები მძიმე ბაზალტის ქანებს ეყრდნობიან, მატერიკები კი — მსუბუქ გრანიტის ქანებს.

მაგრამ აქვე იბადება კითხვა: რატომ აკომპენსირებენ ასე ზუსტად მძიმე და მსუბუქი ქანები მატერიკებისა და ოკეანეების წონის განსხვავებას? ასეთი კომპენსაცია შემთხვევითი არ შეიძლება იყოს, მისი მიზეზები დედამიწის ქერქის აღნაგობიდან უნდა მომდინარეობდეს.

გეოლოგებს მიაჩნიათ, რომ დედამიწის ქერქის ზედა ნაწილები ტივტივებენ ქვევით მოქცეულ პლასტიკურ (ე. ი. სველი თიხის მსგავსად ადვილად დეფორმირებად) მასებზე. 100 კმ სიღრმეზე წნევა ყველგან ერთნაირი უნდა იყოს, ისევე როგორც წყლიანი ჭურჭლის ძირზე, რომელშიც სხვადასხვა წონის ხის ნაჭრები ტივტივებს. ამიტომ ნივთიერების სვეტს, რომლის კვეთის ფართია 1 $მ^2$, ზედაპირიდან 100 კმ სიღრმემდე, ოკეანეშიც და მატერიკშიც ერთნაირი წონა უნდა ჰქონდეს.

წნევის ასეთი გათანაბრების (მას იზოსტაზიას უწოდებენ) შედეგად ოკეანეზე და მატერიკებზე განედის ერთი ხაზის გასწვრივ სიმძიმის ძალის აჩქარების g მნიშვნელობები არსებითად არ განსხვავდება.

სიმძიმის ძალის ადგილობრივი ანომალიები ჩვენ ისეთსავე სამსახურს გვიწევენ, როგორსაც პატარა მუკს ჰაუფის ზღაპარში მისი ჯადოსნური ჯოხი, რომელიც მიწას იმ ადგილზე უკაკუნებდა, სადაც ოქრო ან ვერცხლი იყო.

მძიმე მადანი იქ უნდა ვეძებოთ, სადაც g უდიდესია. პირიქით, მსუბუქი მარილის საბადოებს g მნიშვნელობის შემ-

ცირების ადგილის მახლობლად პოულობენ. g-ს გაზომვა 1 სმ/წმ²-ის მეასიათასედის სიზუსტით შეიძლება.

ქანქარებისა და ძალიან ზუსტი სასწორების გამოყენებაზე დაფუძნებულ დაზვერვის მეთოდებს გრავიტაციულს უწოდებენ. მათ დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვთ, კერძოდ, ნავთობის ძიების დროს. საქმე ისაა, რომ გრავიტაციული მეთოდების საშუალებით ადვილია მიწისქვეშა მარილის გუმბათების აღმოჩენა, ხოლო ძალიან ხშირად ირკვევა, რომ სადაც მარილია, იქ ნავთობიც არის ხოლმე. ამასთან, ნავთობი სიღრმეშია, ხოლო მარილი დედამიწის ზედაპირთან უფრო ახლოს. გრავიტაციული ძიების მეთოდით აღმოაჩინეს ნავთობი ყაზახეთსა და სხვა ადგილებში.

სიმძიმე დედამიწის სიღრმეში

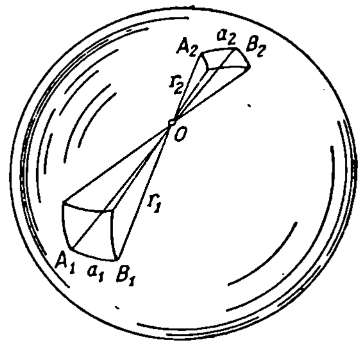
ჩვენ კიდევ ერთი საინტერესო საკითხი დაგვრჩა გასაშუქებელი. როგორ შეიცვლება სიმძიმის ძალა, თუ დედამიწის ქვეშ დავიწყებთ ჩასვლას?

სხეულის წონა ამ საგანსა და დედამიწის ნივთიერების ყოველ ნაწილაკს შორის გაბმული უხილავი ძაფების დაჭიმულობის შედეგია. წონა ჯამური ძალაა, იმ ელემენტარული ძალების შეკრების შედეგია, რომლებიც მოქმედებენ სხეულზე დედამიწის ნაწილაკების მხრივ. ყველა ეს ძალა, თუმცა სხვადასხვა კუთხითაა მიმართული, სხეულს „ქვევით" — დედამიწის ცენტრისკენ ეწევა.

როგორიღა იქნება მიწისქვეშა ლაბორატორიაში მოქცეული სხეულის სიმძიმე? მასზე იმოქმედებს მიზიდულობის ძალები დედამიწის როგორც შიგა, ისე გარეთა ფენების მხრივ.

განვიხილოთ მიზიდულობის ძალები, რომლებიც დედამიწის სფეროს შიგნით მდებარე წერტილზე მოქმედებენ გარეგანი ფენის მხრივ. ეს ფენა რომ თხელ ფენებად დავყოთ, ერთ-ერთ მათგანში a გვერდებიანი მცირე კვადრატი ამოვჭრათ და გავაგრძელოთ კვადრატის პერიმეტრიდან გამოსული იმ O წერტილზე გამავალი ხაზები, რომელშიაც ჩვენ სიმძიმე გვაინტერესებს, მაშინ ფენის მეორე ადგილზე მიიღება

სხვა ზომის a_2 გვერდებიანი მცირე კვადრატი (ნახ. 67). ორი კვადრატის მხრივ O წერტილში მოქმედი მიზიდულობის ძალები ურთიერთსაწინააღმდეგოდ არის მიმართული და მიზიდულობის კანონის თანახმად პროპორციულია m_1/r_1^2 და m_2/r_2^2. მაგრამ კვადრატების მასები მათი ფართის პროპორციულია. ამიტომ მიზიდულობის ძალები a_1^2/r_1^2 და a_2^2/r_2^2 გამოსახულებების პროპორციულია.



ნახ. 67.

მაგრამ ეს შეფარდებები ტოლია. 67-ე ნახატიდან ჩანს, რომ a_1/r_1 და a_2/r_2 წარმოადგენენ OA_1B_1 და OA_2B_2 სამკუთხედების შესაბამისი გვერდების ფარდობებს, რომლებიც მსგავსი იქნება, თუ კვადრატების A_1B_1 და A_2B_2 გვერდებს ძალიან მცირეს ავიღებთ. ამის გაკეთება კი ჩვენ ყოველთვის შეგვიძლია.

მართლაც, თუ კვადრატები მცირეა, მაშინ A_1B_1 და A_2B_2 მონაკვეთების მიმართულებები მცირედ განსხვავდება ამ წერტილების მხებების მიმართულებებისგან. მაშინ შეიძლება კუთხე B_1A_1O და A_2B_2O დამატებითი კუთხე ტოლად ჩავთვალოთ, როგორც კუთხეები, რომლებსაც ქმნიან ერთსა და იმავე რკალზე დაყრდნობილი მხები და ქორდა.

მაშასადამე, $\angle B_1A_1O = \angle OA_2B_2$. გარდა ამისა, ტოლია წვეროებთან მდებარე კუთხეებიც, ე. ი. სამკუთხედებიც მსგავსია.

ამ გეომეტრიული დამტკიცებიდან გამომდინარეობს, რომ $\frac{a_1}{r_1} = \frac{a_2}{r_2}$ და, მაშასადამე, O წერტილში ორი კვადრატის მხრივ მოქმედი მიზიდულობის ძალები წონასწორდება.

თუ თხელ ფენას ასეთი „მოპირდაპირე“ კვადრატების წყვილებად დავყოფთ, ღირსშესანიშნავ ფაქტს დავადგენთ: თხელი ერთგვაროვანი სფერული ფენა არ მოქმედებს მის

შიგნით მდებარე წერტილზე. მაგრამ ეს სამართლიანია ყველა თხელი ფენისთვის, რომლებზეც ჩვენ საინტერესო მიწისქვეშა წერტილს ზემოთ მდებარე სფერული შრე დავყავით.

ამრიგად, მიწის ფენა სხეულს ზემოთ თითქოს არც კი არსებობს. მისი ცალკეული ნაწილების მოქმედება სხეულზე წონასწორდება და მიზიდულობის ჯამური ძალა გარეგანი ფენის მხრივ ნულის ტოლია.

რასაკვირველია, ამ მსჯელობის დროს ჩვენ ვთვლიდით, რომ დედამიწის სიმკვრივე ყოველი ფენის შიგნით ერთნაირია.

ჩვენი მსჯელობის შედეგი საშუალებას გვაძლევს ადვილად მივიღოთ მიწის ქვეშ ნებისმიერ H სიღრმეზე მოქმედი სიმძიმის ძალის ფორმულა. H სიღრმეზე მოთავსებული წერტილი მხოლოდ დედამიწის შინაგანი ფენების მხრივ განიცდის მიზიდულობას. სიმძიმის ძალის აჩქარების ფორმულა $g=\gamma\frac{M}{R^2}$ ამ შემთხვევაშიც შეიძლება გამოვიყენოთ, მაგრამ M და R ამ შემთხვევაში არის მასა და რადიუსი არა მთელი დედამიწისა, არამედ აღებული წერტილის მიმართ მისი „შინაგანი" ნაწილისა.

დედამიწას რომ ყველა ფენაში ერთნაირი სიმკვრივე ჰქონდეს, ფორმულა g-თვის ასეთ სახეს მიიღებდა:

$$g=\gamma\frac{\rho\frac{4}{3}\pi(R_{\text{დ}}-H)^3}{(R_{\text{დ}}-H)^2}=\frac{4}{3}\pi\gamma\rho(R_{\text{დ}}-H),$$

სადაც ϱ სიმკვრივეა, R — დედამიწის რადიუსი.

ეს იმას ნიშნავს, რომ g შეიცვლებოდა $(R_{\text{დ}}-H)$-ის პირდაპირპროპორციულად: რაც უფრო მეტი იქნება H სიღრმე, მით ნაკლები იქნება g.

მაგრამ სინამდვილეში g-ს ქცევა დედამიწის ზედაპირის მახლობლად — ჩვენ შეგვიძლია დავუკვირდეთ მას 5 კმ სიღრმემდე (ზღვის დონის ქვევით) — სრულებით არ ემორჩილება ამ კანონს. ცდა გვიჩვენებს, რომ ამ ფენებში g, პირიქით, სიღრმის მიხედვით იზრდება. ცდის დაცილება ფორმულისგან

იმით აიხსნება, რომ მხედველობაში არ იყო მიღებული სიმკვრივის ცვლილება სხვადასხვა სიღრმეებზე.

დედამიწის საშუალო სიმკვრივეს ადვილად გამოვითვლით, თუ მასას დედამიწის სფეროს მოცულობაზე გავყოფთ. ეს გვაძლევს 5,52 ტოლ მნიშვნელობას. ამავე დროს ზედაპირული ქანების სიმკვრივე ბევრად ნაკლებია — იგი 2,75 ტოლია. დედამიწის ფენების სიმკვრივე სიღრმის მიხედვით იზრდება. დედამიწის ზედაპირულ ფენებში ეს ეფექტი აჭარბებს იდეალურ შემცირებას, რომელიც გამოყვანილი ფორმულიდან გამომდინარეობს, და g სიდიდე მატულობს.

მიზიდულობის ენერგია

უბრალო მაგალითით ჩვენ უკვე გავეცანით მიზიდულობის ენერგიას. დედამიწის მიმართ h სიმაღლეზე ატანილ სხეულს აქვს პოტენციალური ენერგია. mgh.

მაგრამ ამ ფორმულით სარგებლობა მხოლოდ მაშინ შეიძლება, როცა სიმაღლე h დედამიწის რადიუსზე ბევრად ნაკლებია.

მიზიდულობის ენერგია მნიშვნელოვანი სიდიდეა, ამიტომ საინტერესოა მივიღოთ მისი ისეთი ფორმულა, რომელიც სამართლიანი იქნება დედამიწის ზედაპირიდან ნებისმიერ სიმაღლეზე ატანილი სხეულისთვის და, საერთოდ, ორი მასისთვის, რომლებიც მიიზიდებიან უნივერსალური კანონის მიხედვით:

$$F=\gamma\frac{m_1m_2}{r^2}.$$

დავუშვათ, ურთიერთმიზიდვის გავლენით სხეულები ცოტათი დაახლოვდნენ. მათ შორის მანძილი იყო r_1 და გახდა r_2. ამ დროს სრულდება მუშაობა $A=F(r_1-r_2)$. ძალის მნიშვნელობა რომელიღაც შუა წერტილისთვის უნდა ავიღოთ. ისე რომ,

$$A=\gamma\frac{m_1m_2}{r^2_{\text{საშ}}}(r_1-r_2).$$

თუ r_1 და r_2 ერთმანეთისგან მცირედ განსხვავდება, მაშინ r^2-ის შეიძლება r_1 r_2 ნამრავლით შევცვალოთ. მივიღებთ:

$$A=\gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}-\gamma \frac{m_1 m_2}{r_1}.$$

ეს მუშაობა მიზიდულობის ენერგიის ხარჯზე სრულდება:

$$A=U_1-U_2$$

სადაც U_1 მიზიდულობის პოტენციალური ენერგიის საწყისი მნიშვნელობაა, ხოლო U_2 — მისი საბოლოო მნიშვნელობა.

ამ ორი ფორმულის შედარებით, პოტენციალური ენერგიისათვის ვღებულობთ გამოსახულებას:

$$U=-\gamma \frac{m_1 m_2}{r}.$$

იგი მიზიდულობის ძალის ფორმულას ჰგავს, მაგრამ მნიშვნელში r პირველ ხარისხშია აყვანილი.

ამ ფორმულის მიხედვით ძალიან დიდი r-ისთვის პოტენციალური ენერგია $U=0$. ეს გონივრულია, რადგანაც ასეთ დიდ მანძილებზე მიზიდულობა უკვე აღარ იქნება საგრძნობი. მაგრამ სხეულების დაახლოების დროს პოტენციალური ენერგია უნდა მცირდებოდეს. მუშაობა ხომ მის ხარჯზე სრულდება.

ნულიდან შემცირება სადღა უნდა მოხდეს? უარყოფითი მნიშვნელობების მხარეს. სწორედ ამიტომ დგას ფორმულაში მინუსი. — 5 ხომ ნულზე ნაკლებია, ხოლო — 10 — 5-ზე ნაკლები.

თუ ლაპარაკი დედამიწის ზედაპირის მახლობლად მოძრაობას ეხება, სიმძიმის ძალის ზოგადი გამოსახულება შეიძლება mg ნამრავლით შევცვალოთ. მაშინ დიდი სიზუსტით $U_1-U_2=mgh$.

მაგრამ დედამიწის ზედაპირზე სხეულს აქვს პოტენციალური ენერგია $-\gamma \frac{Mm}{R}$, სადაც R დედამიწის რადიუსია. მაშასადამე, დედამიწის ზედაპირიდან h სიმაღლეზე

$$U=-\gamma \frac{Mm}{R}+mgh.$$

როდესაც ჩვენ პირველად გამოვიყენეთ პოტენციალური ენერგიის ფორმულა $U=mgh$, შევთანხმდით, სიმაღლე და ენერგია დედამიწის ზედაპირიდან აგვეთვალა. $U=mgh$ ფორმულით სარგებლობისას ჩვენ ვაგდებთ მუდმივ წევრს — $-\gamma\frac{Mm}{R}$ პირობით მას ნულის ტოლად ვთვლით. რადგანაც მხოლოდ ენერგიების სხვაობა გვაინტერესებს — ჩვეულებრივად ხომ იზომება მუშაობა, რომელიც ენერგიების სხვაობას წარმოადგენს, — ამიტომ მუდმივი წევრის $-\gamma\frac{Mm}{R}$ არსებობა პოტენციალური ენერგიის ფორმულაში არავითარ როლს არ ასრულებს.

მიზიდულობის ენერგია განსაზღვრავს იმ ჯაჭვების სიმტკიცეს, რომლებითაც სხეული დედამიწაზეა „დაბმული". როგორ დავწყვიტოთ ეს ჯაჭვები, როგორ მივაღწიოთ იმას, რომ დედამიწიდან გატყორცნილი სხეული დედამიწაზე აღარ დაბრუნდეს? ცხადია, ამისთვის საჭიროა სხეულს დიდი საწყისი ენერგია მივანიჭოთ. მაგრამ როგორია მინიმალური მოთხოვნილება?

დედამიწიდან დაშორების მიხედვით დედამიწიდან გატყორცნილი სხეულის (ჭურვის, რაკეტის) პოტენციალური ენერგია გაიზრდება (U-ს აბსოლუტური მნიშვნელობა მცირდება); კინეტიკური ენერგია კი შემცირდება. თუ სხეულის კინეტიკური ენერგია დროზე ადრე გაუტოლდება ნულს, ე. ი. ვიდრე ჩვენ დედამიწის მიზიდულობის ჯაჭვებს დავწყვიტავთ, გატყორცნილი ჭურვი დედამიწაზე დაბრუნდება.

აუცილებელია, სხეულმა მანამდე შეინარჩუნოს კინეტიკური ენერგია, ვიდრე მისი პოტენციალური ენერგია პრაქტიკულად ნულამდე არ დაეცემა. გაშვებამდე ჭურვს ჰქონდა პოტენციალური ენერგია $-\gamma\frac{Mm}{R}$ (M და R — დედამიწის მასა და რადიუსია). ამიტომაც ჭურვს ისეთი სიჩქარე უნდა მივანიჭოთ, რომელიც გატყორცნილი ჭურვის ენერგიას დადებითად აქცევს. უარყოფითი სრული ენერგიის მქონე სხეული (პოტენციალური ენერგიის აბსოლუტური მნიშვნელობა კინე-

ტიკურზე მეტია) ვერ გააღწევს მიზიდულობის სფეროს ფარგლებს.

ამრიგად, ჩვენ ვიღებთ მარტივ პირობას. იმისათვის რომ m მასის სხეული დედამიწას მოსწყდეს, საჭიროა, როგორც ითქვა, მიზიდულობის პოტენციალური ენერგიის

$$\gamma\frac{Mm}{R}.$$

გადალახვა.

ჭურვის სიჩქარემ ამ დროს ეგრეთ წოდებული მეორე კოსმოსური სიჩქარის v_2 მნიშვნელობას უნდა მიაღწიოს. ამ სიჩქარის გამოანგარიშებაც ადვილია კინეტიკურ და პოტენციალურ ენერგიათა ტოლობიდან:

$$\frac{mv_2^2}{2}=\gamma\frac{mM}{R},\ \text{ე. ი.}\ v_2^2=2\gamma\frac{M}{R},$$

ან, რადგანაც $g=\gamma\frac{M}{R^2}$,

$$v_2{}^2=2gR.$$

მიღებული ფორმულით გამოთვლილი v_2 მნიშვნელობა 11 კმ/წმ შეადგენს, რასაკვირველია ატმოსფეროს წინააღმდეგობის გათვალისწინების გარეშე. ეს სიჩქარე $\sqrt{2}=1,41$-ჯერ მეტია ხელოვნური თანამგზავრის პირველ კოსმოსურ $v_1=\sqrt{gR}$ სიჩქარეზე, როცა თანამგზავრი დედამიწის ზედაპირის მახლობლად ბრუნავს, ე. ი. $v_2=\sqrt{2}\cdot v_1$.

მთვარის მასა 81-ჯერ ნაკლებია დედამიწის მასაზე; მისი რადიუსი დედამიწისაზე ოთხჯერ ნაკლებია. ამიტომ მიზიდულობის ენერგია მთვარეზე ოცჯერ უფრო მცირეა, ვიდრე დედამიწაზე, და მთვარისაგან მოწყვეტისათვის საკმარისია 2,5 კმ/წმ სიჩქარე.

კინეტიკური ენერგია $\frac{mv_2^2}{2}$ იხარჯება პლანეტასთან — გამგზავრების სადგურთან მიზიდულობის ჯაჭვის გასაწყვეტად. ხოლო თუ გვინდა, მიზიდულობის გადალახვის შემდეგ, რაკეტამ v სიჩქარით იმოძრაოს, ამისთვის საჭიროა დამატებითი ენერგია $\frac{mv^2}{2}$. ამ შემთხვევაში, რაკეტის გაშვებისას აუცი-

ლებელია მივანიჭოთ მას $\frac{mv_0^2}{2}=\frac{mv_2^2}{2}+\frac{mv^2}{2}$ ენერგია. ამრიგად, აღნიშნული სამი სიჩქარე დაკავშირებულია მარტივი თანაფარდობით:

$$v_0^2=v_2^2+v^2.$$

ახლა საინტერესოა, როგორი უნდა იყოს დედამიწისა და მზის მიზიდულობის გადასალახავად საჭირო v_3 სიჩქარე — მინიმალური სიჩქარე ჰურვისა, რომელსაც შორეული ვარსკვლავებისკენ გავგზავნით? ეს სიჩქარე ჩვენ v_3-ით აღვნიშნეთ, რადგანაც მას მესამე კოსმოსურ სიჩქარეს უწოდებენ.

პირველ ყოვლისა განვსაზღვროთ მზის მიზიდულობის გადასალახავად აუცილებელი სიჩქარე.

როგორც ზემოთ ვთქვით, სამოგზაუროდ გასაგზავნი ჰურვის დედამიწის მიზიდულობის სფეროდან გამოსასვლელად საჭირო სიჩქარე $\sqrt{2}$-ჯერ მეტია, ვიდრე დედამიწის თანამგზავრის ორბიტაზე გაყვანის სიჩქარე. ეს მსჯელობები თანაბარი უფლებით შეიძლება მზეზეც გავავრცელოთ, ე. ი. შეიძლება ვთქვათ, რომ მზისგან წასვლის სიჩქარე $\sqrt{2}$-ჯერ მეტია მზის თანამგზავრის (ე. ი. დედამიწის) სიჩქარეზე. რამდენადაც მზის ირგვლივ დედამიწის მოძრაობის სიჩქარე დაახლოებით 30 კმ/წმ შეადგენს, ამიტომ მზის მიზიდულობის სფეროდან წასვლისთვის საჭიროა 42 კმ/წმ ტოლი სიჩქარე. ეს ძალიან ბევრია, მაგრამ ჰურვის შორეულ ვარსკვლავებთან გასაგზავნად, რასაკვირველია, საჭიროა დედამიწის სფეროს მოძრაობის გამოყენება და სხეულის იმ მხარეს გაშვება, საითაც დედამიწა მოძრაობს. მაშინ ჩვენ სულ უნდა დავამატოთ $42-30=12$ კმ/წმ.

ახლა საბოლოოდ შეგვიძლია მესამე კოსმოსური სიჩქარის გამოთვლა. ეს ის სიჩქარეა, რომლითაც უნდა გავუშვათ რაკეტა, რომ დედამიწის მიზიდულობის სფეროდან გასვლის შემდეგ მას ჰქონდეს 12 კმ/წმ სიჩქარე. თუ ზემოთ მოყვანილი ფორმულით ვისარგებლებთ, მივიღებთ:

$$v_3^2=(11)^2+(12)^2,$$

საიდანაც $v_3=16$ კმ/წმ.

ამრიგად, თუ სხეულს 11 კმ/წმ სიჩქარე აქვს, იგი დასცილდება დედამიწას, მაგრამ ასეთი „ჰურვი" შორს ვერ წავა; დედამიწა მას გაუშვებს, მაგრამ მზე არ მისცემს თავისუფლებას. იგი მზის თანამგზავრად გადაიქცევა.

ირკვევა, რომ ვარსკვლავთშორის მოგზაურობისთვის აუცილებელი სიჩქარე მხოლოდ ერთნახევარჯერაა მეტი მზის სისტემაში დედამიწის ორბიტის შიგნით სამოგზაუროდ საჭირო სიჩქარეზე. თუმცა, როგორც უკვე ითქვა, ჰურვის საწყისი სიჩქარის ყოველი შესამჩნევი გაზრდა მნიშვნელოვან ტექნიკურ სიძნელეებთან არის დაკავშირებული (იხ. გვ. 97).

როგორ მოძრაობენ პლანეტები

კითხვაზე, როგორ მოძრაობენ პლანეტები, შეიძლება მოკლედ ვუპასუხოთ: მიზიდულობის კანონის თანახმად, მიზიდულობის ძალები ხომ პლანეტებზე მოქმედი ერთადერთი ძალებია.

რადგანაც პლანეტების მასა ბევრად ნაკლებია მზის მასაზე, ამიტომ პლანეტებს შორის ურთიერთქმედების ძალები დიდ როლს არ ასრულებენ. ყოველი პლანეტა თითქმის ისე მოძრაობს, როგორც ამას მხოლოდ მზის მიზიდულობის ძალა უკარნახებს, სხვა პლანეტები თითქოს არც კი არსებობდეს.

მზის ირგვლივ პლანეტის მოძრაობის კანონები მსოფლიო მიზიდულობის კანონიდან გამომდინარეობს.

მაგრამ ისტორიულად ეს ასე არ ყოფილა. პლანეტების მოძრაობის კანონები ნიუტონამდე აღმოაჩინა შესანიშნავმა გერმანელმა ასტრონომმა იოჰან კეპლერმა მიზიდულობის კანონის დაუხმარებლად, ასტრონომიულ დაკვირვებათა თითქმის ოცწლიანი დამუშავების შედეგად.

გზები, ან, როგორც ასტრონომები ამბობენ, ორბიტები, რომლებსაც პლანეტები მზის ირგვლივ აღწერენ, ძალიან უახლოვდება წრეხაზს.

რა კავშირშია პლანეტის გარსშემოვლის პერიოდი მისი ორბიტის რადიუსთან?

მზის მხრივ პლანეტაზე მოქმედი მიზიდულობის ძალა ტოლია

$$F=\gamma \frac{mM}{r^2},$$

სადაც M მზის მასაა, m — პლანეტის მასა, r — მათ შორის მანძილი.

მაგრამ მექანიკის ძირითადი კანონის მიხედვით, F/m სხვა არაფერია, თუ არა აჩქარება, და, ამასთან, ცენტრისკენული:

$$\frac{F}{m}=\frac{v^2}{r}.$$

პლანეტის სიჩქარე შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც წრეხაზის $2\pi r$ სიგრძე, გაყოფილი გარსშემოვლის T პერიოდზე. თუ ჩავსვამთ $v=\frac{2\pi r}{T}$ და F ძალის მნიშვნელობას აჩქარების ფორმულაში, მივიღებთ:

$$\frac{4\pi^2\cdot r}{T^2}=\frac{\gamma M}{r^2}, \text{ ე. ი. } T^2=\frac{4\pi^2}{\gamma M}r^3.$$

პროპორციულობის კოეფიციენტი r^3-ის წინ არის სიდიდე, რომელიც მხოლოდ მზის მასისგან არის დამოკიდებული და ნებისმიერი პლანეტისთვის ერთნაირია. მაშასადამე, ორი პლანეტისთვის სამართლიანია თანაფარდობა

$$\frac{T_1^2}{T_2^2}=\frac{r_1^3}{r_2^3}.$$

პლანეტების გარსშემოვლის დროთა კვადრატების ფარდობა მათი ორბიტების რადიუსების კუბების ფარდობის ტოლი ყოფილა. ეს საინტერესო კანონი კეპლერმა ცდების შედეგად შეიმუშავა. მსოფლიო მიზიდულობის კანონმა ახსნა კეპლერის დაკვირვებები.

ერთი პლანეტის წრიული მოძრაობა მეორის ირგვლივ მხოლოდ ერთი შესაძლებლობათაგანია.

ტრაექტორია ერთი სხეულისა, რომელიც მეორის ირგვლივ ბრუნავს, ხახუნის ძალების წყალობით შეიძლება სულ სხვადასხვაგვარი იყოს. მაგრამ როგორც გამოანგარიშება გვიჩვენებს. და გამოანგარიშებამდე კეპლერმა აღმოაჩინა, ყვე-

ლა ისინი ეკუთვნიან მრუდეების ერთ კლასს, რომელსაც ელიფსური მრუდეების კლასი ეწოდება.

თუ ძაფს შევაბამთ სახაზავი ქაღალდის სუფთა ფურცელში ჩარჭობილ ორ ქინძისთავს, ძაფს ფანქრის წვერით დავჭიმავთ და ფანქარს ისე ვამოძრავებთ, რომ ძაფი დაჭიმული დარჩეს, ქაღალდზე, ბოლოს და ბოლოს, დაიხაზება ჩაკეტილი მრუდი. სწორედ ეს არის ელიფსი (ნახ. 68). ადგილები, სადაც ქინძისთავებია ჩარჭობილი, ელიფსის ფოკუსები იქნება.

ელიფსებს შეიძლება სხვადასხვაგვარი ფორმა ჰქონდეს. თუ ქინძისთავებს შორის მანძილზე გაცილებით გრძელ ძაფს ავიღებთ, მაშინ ელიფსი ძალიან დაემსგავსება წრეხაზს. პირიქით, თუ ძაფის სიგრძე ოდნავ აღემატება ქინძისთავებს შორის მანძილს, მაშინ მივიღებთ წაგრძელებული ფორმის ელიფსს, რომელსაც თითქმის ჯოხის ფორმა ექნება.

პლანეტები აღწერენ ელიფსს, რომლის ერთ-ერთ ფოკუსში მზე იმყოფება.

როგორ ელიფსებს აღწერენ პლანეტები? თურმე წრეხაზთან ძალიან მიახლოებულს.

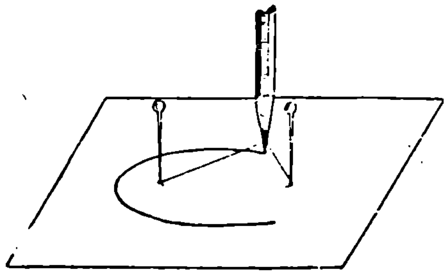
ყველაზე მეტად განსხვავდება წრეხაზისგან მზესთან უფრო ახლოს მყოფი პლანეტის — მერკურის გზა. მაგრამ ამ შემთხვევაშიც ელიფსის უდიდესი დიამეტრი უმოკლესს მხოლოდ 2%-ით აღემატება. დახედეთ ნახ. 69-ს. მარსის ორბიტას ვერც გაარჩევთ წრეხაზისგან.

მაგრამ რამდენადაც მზე ელიფსის ერთ-ერთ ფოკუსშია და არა მის ცენტრში, მანძილი პლანეტიდან მზემდე უფრო შესამჩნევად იცვლება. ელიფსის ორ ფოკუსზე გავავლოთ ხაზი. ეს ხაზი ელიფსს ორ ადგილზე გადაჰკვეთს. მზისადმი უახლოეს წერტილს პერიჰელიუმი ეწოდება, უშორესს — აფელიუმი. პერიჰელიუმში მერკური 1,5-ჯერ უფრო ახლოს არის მზესთან, ვიდრე აფელიუმში.

მთავარი პლანეტები მზის ირგვლივ წრეხაზთან მიახლოებულ ელიფსებს აღწერენ. მაგრამ არსებობს ციური სხეულები, რომლებიც მზის ირგვილ ძლიერ წაგრძელებულ ელიფსებზე მოძრაობენ. მათ კომეტები მიეკუთვნება. კომეტების ორბიტები წაგრძელებულობის მხრივ არც კი შეიძლება შევადაროთ პლანეტების ორბიტებს. ელიფსებზე მოძრავი ციური

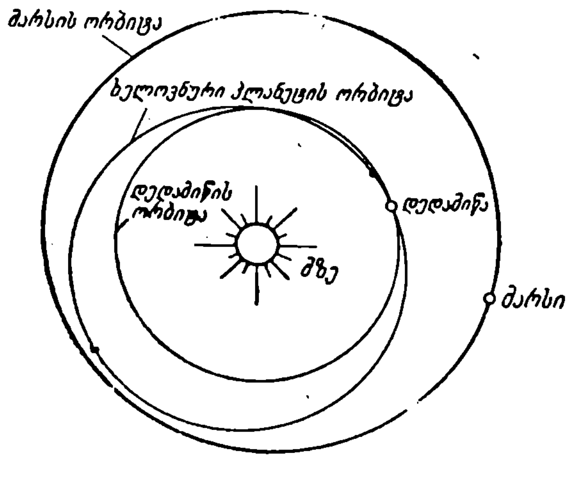
სხეულები შეიძლება მზის ოჯახს მივაკუთვნოთ, მაგრამ ჩვენს სისტემაში შემთხვევითი სხეულებიც შემოიჭრება ხოლმე.

შემჩნეული ყოფილა კომეტები, რომლებიც მზის მახლობლად ისეთი ფორმის მრუდებს აღწერდნენ, რომ თავისუფ-



ნახ. 68.

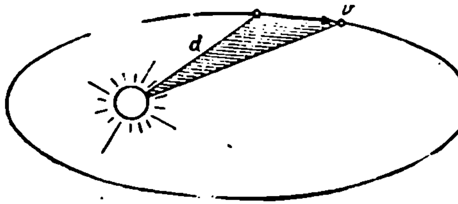
ლად შეიძლებოდა გამოგვეტანა დასკვნა: კომეტა აღარ დაბრუნდება, იგი არ ეკუთვნის მზის სისტემას. კომეტების აღწერილ „გახსნილ“ მრუდებს ჰიპერბოლები ეწოდება.



ნახ. 69.

განსაკუთრებით სწრაფად მოძრაობენ ასეთი კომეტები მზესთან ახლოს ჩავლისას. ეს გასაგებიცაა — კომეტის სრუ-

ლი ენერგია მუდმივია, ხოლო მზესთან მიახლოებისას, მას უმცირესი პოტენციალური ენერგია აქვს. მაშასადამე, მოძრაობის კინეტიკური ენერგია ამ შემთხვევაში უდიდესი იქნება. ასეთ ეფექტს იძლევა, რასაკვირველია, ყველა პლანეტა, და მათ შორის ჩვენი დედამიწაც. მაგრამ ეს ეფექტი დიდი არ არის, რადგანაც მცირეა პოტენციალურ ენერგიებს შორის განსხვავება აფელიუმსა და პერიჰელიუმში.



ნახ. 70.

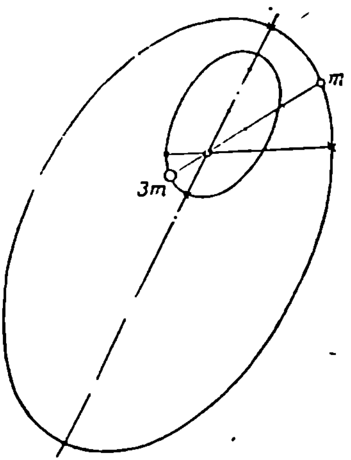
პლანეტის მოძრაობის საინტერესო კანონი გამომდინარეობს იმპულსის მომენტის მუდმივობის კანონიდან.

ნახ. 70-ზე გამოსახულია პლანეტის ორი მდებარეობა. მზიდან, ე. ი. ელიფსის ფოკუსიდან პლანეტების მდებარეობამდე გავლებულია ორი რადიუსი და წარმოშობილი სექტორი დაშტრიხულია. უნდა განისაზღვროს იმ ფართის სიდიდე, რომელსაც აღწერს რადიუსი დროის ერთეულში. თუ კუთხე მცირეა, რადიუსის მიერ დროის ერთეულში აღწერილი სექტორი შეიძლება სამკუთხედით შევცვალოთ. სამკუთხედის ფუძე არის v სიჩქარე (ერთ წამში გავლილი გზა), ხოლო მისი სიმაღლე სიჩქარის d მხარის ტოლია. ამიტომ სამკუთხედის ფართია $vd/2$.

მომენტის მუდმივობის კანონიდან გამომდინარეობს mvd სიდიდის მუდმივობა მოძრაობის დროს. მაგრამ თუ mvd უცვლელია, არც სამკუთხედის ფართი $vd/2$ იცვლება. ჩვენ შეგვიძლია დავხაზოთ სექტორები დროის ნებისმიერი მომენტებისთვის — ფართის მიხედვით ისინი ტოლი აღმოჩნდება. პლანეტის სიჩქარე იცვლება, მაგრამ ის, რასაც შეიძლება სექტორიალური სიჩქარე ვუწოდოთ, უცვლელი რჩება.

ყველა ვარსკვლავს არ ახლავს პლანეტები. ცაში საკმაოდ ბევრი ორმაგი ვარსკვლავია. ორი უზარმაზარი ციური სხეული ერთმანეთის გარშემო ბრუნავს.

მზე თავისი უზარმაზარი მასის გამო ოჯახის ცენტრად ითვლება. ორმაგ ვარსკვლავებში ორივე ციურ სხეულს სიდიდით ტოლი მასები აქვთ. ამ შემთხვევაში არ უნდა ვიფიქროთ, თითქოს ერთ-ერთი ვარსკვლავი უძრავი იყოს. როგორია ამ შემთხვევაში მოძრაობა? ჩვენ ვიცით, რომ ყოველ ჩაკეტილ სისტემაში არის ერთი უძრავი (ან თანაბრად მოძრავი) წერტილი—ეს ინერციის ცენტრია. ამ წერტილის ირგვლივ ბრუნავს ორივე ვარსკვლავი. ამასთან ისინი მსგავს ელიფსებს აღწერენ, რაც გვერდზე დაწერილი პირობიდან $\frac{m_1}{m_2}=\frac{r_2}{r_1}$ გამომდინარეობს. ერთი ვარსკვლავის ელიფსი იმდენჯერ მეტია მეორე ვარსკვლავის ელიფსზე, რამდენჯერაც მეორე ვარსკვლავის მასა პირველ მასაზე მეტია (ნახ. 71). ტოლი მასების შემთხვევაში ორივე ვარსკვლავი ინერციის ცენტრის ირგვლივ ერთნაირ ტრაექტორიებს აღწერს.



ნახ. 71.

მზის სისტემის პლანეტები იდეალურ პირობებში იმყოფებიან: მათ მოძრაობას არ ახლავს ხახუნი.

ადამიანების მიერ შექმნილი მცირე ხელოვნური სხეულები — თანამგზავრები — არ არიან ასეთ იდეალურ მდგომარეობაში: ხახუნის ძალას, თუნდაც თავიდან მეტად უმნიშვნელოს, მაგრამ მაინც საგრძნობს, გადამწყვეტი გავლენა აქვს მათ მოძრაობაზე.

პლანეტის სრული ენერგია უცვლელი რჩება. თანამგზავრის სრული ენერგია ყოველი შემოვლისას ოდნავ მცირდება. ერთი შეხედვით ისე ჩანს, თითქოს ხახუნმა უნდა შეანელოს თანამგზავრის მოძრაობა. სინამდვილეში საწინააღმდეგო სურათი გვაქვს.

პირველ ყოვლისა, გავიხსენოთ, რომ თანამგზავრის სიჩქარე ტოლია $\sqrt{gR}$ ან $\sqrt{\gamma \frac{M}{R}}$, სადაც R არის მანძილი დედამიწის ცენტრიდან, ხოლო M — მისი მასა.

თანამგზავრის სრული ენერგია ტოლია:

$$E=-\gamma\frac{Mm}{R}+\frac{mv^2}{2}.$$

თუ თანამგზავრის სიჩქარეს ჩავსვამთ, კინეტიკური ენერგიისთვის მივიღებთ გამოსახულებას $\gamma\frac{Mm}{2R}$. ჩვენ ვხედავთ, რომ აბსოლუტური სიდიდის მიხედვით კინეტიკური ენერგია პოტენციალურზე ორჯერ ნაკლებია, ხოლო სრული ენერგია ტოლია

$$E=-\frac{\gamma}{2}\cdot\frac{mM}{R}.$$

ხახუნის არსებობის შემთხვევაში სრული ენერგია შემცირდება, ე. ი. (რამდენადაც იგი უარყოფითია) გაიზრდება აბსოლუტური სიდიდის მიხედვით; R მანძილი იწყებს კლებას: თანამგზავრი ქვევით ჩამოდის. რა მოუვა ამ დროს ენერგიის შესაკრებებს? პოტენციალური ენერგია მცირდება (იზრდება აბსოლუტური სიდიდით), კინეტიკური ენერგია იზრდება.

საერთო ბალანსი მაინც უარყოფითია, რადგანაც პოტენციალური ენერგია ორჯერ უფრო სწრაფად მცირდება კინეტიკური ენერგიის ზრდასთან შედარებით.

ხახუნი იწვევს თანამგზავრის მოძრაობის სიჩქარის გაზრდას და არა შემცირებას.

ახლა გასაგებია, რატომ უსწრებს დიდი მატარებელი რაკეტა პატარა თანამგზავრს. დიდ რაკეტას მეტი აქვს ხახუნი.

მთვარე რომ არ ყოფილიყო

აქ ჩვენ არ ვიმსჯელებთ იმ სავალალო შედეგზე, რომელიც მოჰყვებოდა მთვარის არარსებობას პოეტებისა და მიჯნურებისათვის. პარაგრაფის სათაური გაცილებით უფრო პროზაულად უნდა გავიგოთ: რა გავლენას ახდენს მთვარის არსებობა დედამიწის მექანიკაზე.

როდესაც ზევით ვმსჯელობდით, თუ რა ძალები მოქმედებს მაგიდაზე დადებულ წიგნზე, დარწმუნებით ვამბობდით: დედამიწის მიზიდულობა და რეაქციის ძალა. მაგრამ მკაცრად რომ ვიმსჯელოთ, მაგიდაზე დადებულ წიგნს იზიდავს მთვარეც, მზეც და ვარსკვლავებიც.

მთვარე ჩვენი უახლოესი მეზობელია. დავივიწყოთ მზე და ვარსკვლავები და ვნახოთ, როგორ შეიცვლება სხეულის წონა დედამიწაზე მთვარის გავლენით.

დედამიწა და მთვარე ფარდობით მოძრაობაში იმყოფებიან. მთვარის მიმართ დედამიწა როგორც მთლიანი (ე. ი. დედამიწის ყველა წერტილი) $\gamma\frac{m}{r^2}$ აჩქარებით მოძრაობს, სადაც m მთვარის მასაა, ხოლო r — მანძილი მთვარის ცენტრიდან დედამიწის ცენტრამდე.

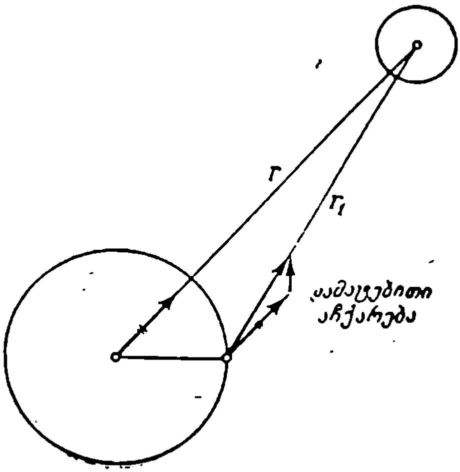
განვიხილოთ დედამიწის ზედაპირზე დადებული სხეული. ჩვენ გვაინტერესებს რამდენად შეიცვლება მისი წონა მთვარის გავლენით. წონა დედამიწაზე განისაზღვრება დედამიწის მიმართ აჩქარებით. ამიტომ, სხვანაირად რომ ვთქვათ, ჩვენ გვაინტერესებს, რამდენად შეიცვლება მთვარის გავლენით დედამიწის ზედაპირზე დადებული სხეულის აჩქარება დედამიწის მიმართ.

დედამიწის აჩქარება მთვარის მიმართ არის $\gamma\frac{m}{r^2}$; დედამიწის ზედაპირზე დადებული სხეულის აჩქარება მთვარის მიმართ — $\gamma\frac{m}{r_1^2}$, სადაც r_1 მანძილია სხეულიდან მთვარემდე (ნახ. 72).

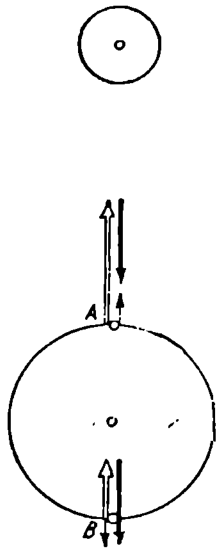
ჩვენ კი გვჭირდება სხეულის დამატებითი აჩქარება დედამიწის მიმართ: იგი ტოლი იქნება შესაბამისი აჩქარებების გეომეტრიული სხვაობისა.

სიდიდე $\gamma \frac{m}{r^2}$ დედამიწისთვის მუდმივია, ხოლო $\gamma \frac{m}{r_1^2}$ დედამიწის ზედაპირის სხვადასხვა წერტილებში სხვადასხვაა. მაშ ჩვენთვის საინტერესო გეომეტრიული სხვაობაც სხვადასხვა იქნება დედამიწის სფეროს სხვადასხვა ადგილისთვის.

როგორი იქნება სიმძიმე დედამიწაზე მთვარესთან ყველაზე მიახლოებულ, ყველაზე დაშორებულ და ამ ორი წერტილის შუა ადგილებში?



ნახ. 72.



ნახ. 73.

მთვარის მიერ დედამიწის ცენტრის მიმართ გამოწვეული აჩქარების საპოვნელად, ე. ი. დედამიწის g-ს შესწორების საპოვნელად, საჭიროა $\gamma \frac{m}{r_1^2}$ სიდიდეს დედამიწის სფეროს აღნიშნული ადგილებისთვის (თეთრი ისრები ნახ. 73-ზე) გამოვაკლოთ მუდმივი სიდიდე $\gamma \frac{m}{r^2}$. ამასთან, უნდა გვახსოვ-

დეს, რომ აჩქარება $\gamma\frac{m}{r^2}$ — დედამიწისა მთვარისკენ — მიმართულია დედამიწის ცენტრიდან მთვარეზე გამავალი ხაზის პარალელურად. ვექტორის გამოკლება ტოლფასია შებრუნებული ვექტორის მიმატებისა. შავი ისრებით ნახატზე ნაჩვენებია ვექტორები — $\gamma\frac{m}{r^2}$.

თუ ნახატზე გამოხატულ ვექტორებს შევკრებთ, ვიპოვით, რასაც ვეძებთ: დედამიწის ზედაპირზე მთვარის გავლენით წარმოშობილ თავისუფალი ვარდნის აჩქარების ცვლილებას.

მთვარესთან უახლოეს ადგილზე ჯამური დამატებითი აჩქარება ტოლია

$$\gamma\frac{m}{(r-R)^2}-\gamma\frac{m}{r^2}$$

და მთვარისკენაა მიმართული. სიმძიმე დედამიწაზე მცირდება, სხეული A წერტილში უფრო მსუბუქდება, ვიდრე მთვარის არარსებობის შემთხვევაში.

თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ R ბევრად ნაკლებია r-ზე, დაწერილი ფორმულა შეიძლება გავამარტივოთ. საერთო მხიშვნელზე დაყვანის შემდეგ მივიღებთ:

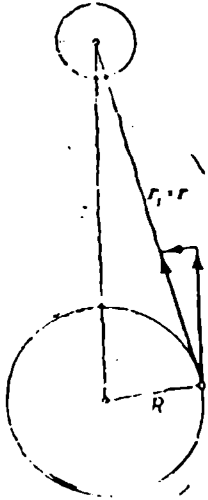
$$\frac{\gamma mR\,(2r-R)}{r^2(r-R)^2}.$$

თუ ფრჩხილებს შიგნით უგულებელვყოფთ შედარებით მცირე R სიდიდეს, რომელიც მნიშვნელოვნად უფრო დიდ r და $2r$ სიდიდეებს აკლდება, მივიღებთ:

$$\frac{2\gamma mR}{r^3}.$$

ახლა ანტიპოდებზე გადავიდეთ. B წერტილში აჩქარება მთვარის მხრივ მეტი კი არა, ნაკლებია დედამიწის საერთო აჩქარებაზე. მაგრამ ახლა ჩვენ ვიმყოფებით დედამიწის სფეროს მთვარიდან უშორეს მხარეზე. მთვარის მიზიდულობის შემცირება აქ იგივე შედეგს იძლევა, რასაც მიზიდულობის

გაზრდა A წერტილში — სიმძიმის ძალის აჩქარების შემცირებას. ხომ მართლაც მოულოდნელი შედეგია — მთვარის გავლენით სხეული აქაც უფრო მსუბუქდება. სხვაობა



ნახ. 74.

$$\gamma \frac{m}{(r+R)^2} - \gamma \frac{m}{r^2} \approx - \frac{2\gamma m R}{r^3}$$

აბსოლუტური სიდიდის მიხედვით ისეთივე გამოდის, როგორც A წერტილში.

სხვა მდგომარეობაა შუა ხაზზე. აქ აჩქარებები ერთმანეთისადმი კუთხით არის მიმართული, და მთვარის მიერ დედამიწის საერთო $\gamma \frac{m}{r^2}$ აჩქარებისა და დედამიწის ზედაპირზე მდებარე სხეულის მთვარით გამოწვეული $\gamma \frac{m}{r_1^2}$ აჩქარების გამოკლება გეომეტრიულად უნდა შესრულდეს (ნახ. 74). თუ სხეულს დედამიწაზე ისე განვალაგებთ, რომ r_1 და r ტოლი იყოს, ჩვენ უმნიშვნელოდ დავშორდებით შუა ხაზს. აჩქარებათა ვექტორული სხვაობა ტოლფერდა სამკუთხედის ფუძეს წარმოადგენს. 74-ე ნახატზე გამოსახული სამკუთხედების მსგავსებიდან ჩანს, რომ საძიებელი აჩქარება იმდენჯერ ნაკლებია $\gamma \frac{m}{r^2}$ -ზე, რამდენჯერაც R ნაკლებია r-ზე. მაშასადამე, საძიებელი დამატება g-თვის დედამიწის ზედაპირის შუა ხაზზე ტოლია

$$\frac{\gamma m R}{r^3}.$$

რიცხვითი მნიშვნელობით ეს ორჯერ ნაკლებია დედამიწის მიზიდულობის ძალის შესუსტებაზე განაპირა წერტილებში. ხოლო რაც შეეხება ამ დამატებითი აჩქარების მიმართულებას, იგი, როგორც ნახატიდან ჩანს, ამ შემთხვევაშიც პრაქტიკულად მოცემულ წერტილში დედამიწის ზედაპი-

რისადმი ვერტიკალის მიმართულებას ემთხვევა. იგი ქვევით არის მიმართული, ე. ი. წონის გადიდებას იწვევს.

ამრიგად, მთვარის გავლენა დედამიწის მექანიკაზე მის ზედაპირზე მყოფი სხეულების წონის შეცვლაში მდგომარეობს. ამასთან, მთვარიდან ყველაზე მახლობელ და დაშორებულ წერტილებში წონა მცირდება, ხოლო შუა ხაზზე მატულობს, თანაც წონის ცვლილება მეორე შემთხვევაში ორჯერ ნაკლებია, ვიდრე პირველში.

რასაკვირველია, მოყვანილი მსჯელობა სამართლიანია ნებისმიერი პლანეტისთვის, მზისთვის, ვარსკვლავებისთვის.

ადვილი გამოსაანგარიშებელია, რომ არც პლანეტები და არც ვარსკვლავები არ იძლევიან მთვარის მიერ გაპირობებული აჩქარების უმნიშვნელო ნაწილსაც კი.

ნებისმიერი ციური სხეულის მოქმედების შედარება მთვარის მოქმედებასთან ძალიან ადვილია: ამ სხეულით გაპირობებული დამატებითი აჩქარება უნდა გაიყოს „მთვარის დამატებაზე“:

$$\frac{\gamma m R}{r^3} : \frac{\gamma m_{\text{მთვარის}} R}{r^3_{\text{მთვარის}}}$$

მივიღებთ:

$$\frac{m}{m_{\text{მთვარის}}} \cdot \frac{r^3_{\text{მთვარის}}}{r^3}.$$

ეს შეფარდება ერთზე ძალიან ნაკლები არ არის მხოლოდ მზისთვის. მზე ბევრად შორს არის ჩვენგან, ვიდრე მთვარე, მაგრამ მთვარის მასა ათეულ მილიონჯერ ნაკლებია მზის მასაზე.

რიცხვითი მნიშვნელობების ჩასმით მივიღებთ, რომ მზის გავლენით სიმძიმე დედამიწაზე 2,17-ჯერ ნაკლებად იცვლება. ვიდრე მთვარის გავლენით.

ახლა დაახლოებით შევაფასოთ, რამდენად შეიცვლება სხეულების წონა დედამიწაზე, თუ მთვარე დედამიწის ირგვლივ ორბიტას დატოვებს. თუ $2\gamma mR/r^3$ გამოსახულებაში რიცხვით მნიშვნელობებს ჩავსვამთ, ვნახავთ, რომ მთვარით გაპირობებული აჩქარება 0,0001 სმ/წმ², ანუ g-ს ერთი მეათმილიონედის რიგის სიდიდეა.

თითქოს არაფერია. ღირდა კი ამ უმნიშვნელო ეფექტის გამო დაძაბულად გაგვედევნებინა თვალი მექანიკის საკმაოდ რთული ამოცანის ამოხსნისთვის? ნუ იჩქარებთ ასეთი დასკვნის გაკეთებას. ეს „უმნიშვნელო“ ეფექტი მოქცევის მძლავრი ტალღების მიზეზი გახლავთ. იგი წყლის უზარმაზარი მასების გადანაცვლებით დღე-ღამეში 10^{16} კგმ კინეტიკურ ენერგიას ჰქმნის. ეს ენერგია დედამიწის ზურგზე არსებული ყველა მდინარის კინეტიკური ენერგიის ტოლია.

მართლაც, სიდიდის გამოანგარიშებული პროცენტული ცვლილება ძალიან მცირეა. სხეული, რომელიც ასეთივე „უმნიშვნელო“ სიდიდით გამსუბუქდება, უმნიშვნელოდ დაშორდება დედამიწის ცენტრს. მაგრამ დედამიწის რადიუსი ხომ 6.000.000 მ ტოლია და უმნიშვნელო გადახრა ათეულ სანტიმეტრებს შეადგენს.

წარმოიდგინეთ, რომ მთვარემ შეწყვიტა თავისი მოძრაობა დედამიწის მიმართ და სადღაც ოკეანეს დაჰნათის თავზე. გამოანგარიშება გვიჩვენებს, რომ წყლის დონე ამ ადგილზე 54 სმ-ით აიწევს. ასევე აიწევს წყალი ანტიპოდებთან. ამ უკიდურესი წერტილების შუა ხაზზე წყლის დონე ოკეანეში 27 სმ-ით დაიწევს.

თავისი ღერძის ირგვლივ დედამიწის ბრუნვის გამო ოკეანის დონის აწევისა და დაწევის „ადგილები“ განუწყვეტლივ იცვლიან ადგილს. სწორედ ეს არის მოქცევები. დაახლოებით ექვსი საათის განმავლობაში წყლის დონე მაღლა იწევს და წყალი ნაპირისკენ მოდის — ეს მოქცევაა. შემდეგ უკუქცევა იწყება და ისიც ექვს საათს გრძელდება. მთვარის ყოველ დღე-ღამეში ორი მოქცევა და ორი უკუქცევაა. მოქცევის მოვლენათა სურათი ძალზე რთულდება წყლის ნაწილაკების ხახუნით, ზღვის ფსკერის ფორმით და ნაპირების მოხაზულობით.

მაგალითად, კასპიის ზღვაში მოქცევები და უკუქცევები შეუძლებელია უბრალოდ იმიტომ, რომ ზღვის მთელი ზედაპირი ერთდროულად ერთნაირ პირობებშია.

სხვაგვარი მოქცევებია ოკეანესთან გრძელი და ვიწრო სრუტეებით შეერთებულ შიდა ზღვებში, მაგალითად შავ ზღვასა და ბალტიის ზღვაში.

განსაკუთრებით ძლიერი მოქცევები იცის ვიწრო ყურეებში, სადაც ოკეანიდან მომავალი მოქცევის ტალღა ძალიან მაღალია. მაგალითად, გიჟიგინის უბეში, ოხოტის ზღვაზე, მოქცევის სიმაღლე რამდენიმე მეტრს აღწევს.

თუ ოკეანის ნაპირები საკმაოდ ბრტყელია (მაგალითად, საფრანგეთში), მოქცევის დროს წყლის აწევამ შეიძლება მრავალი კილომეტრით შეცვალოს ხმელეთისა და ზღვის საზღვრის მდებარეობა.

მოქცევის მოვლენები ხელს უშლის დედამიწის ბრუნვას. მოქცევის ტალღების მოძრაობა ხომ ხახუნთან არის დაკავშირებული. ამ ხახუნის გადასალახავად — მას მოქცევის ხახუნს უწოდებენ — უნდა დაიხარჯოს მუშაობა. ამიტომ ბრუნვის ენერგია, და მასთან ერთად დედამიწის ღერძის ირგვლივ ბრუნვის სიჩქარეც, მცირდება.

სწორედ ეს მოვლენა იწვევს დღე-ღამის დაგრძელებას, რაზეც მე-10 გვერდზე გვქონდა საუბარი.

მოქცევის ხახუნი საშუალებას გვაძლევს გავიგოთ, რატომ არის მთვარე დედამიწისკენ ყოველთვის ერთი და იმავე მხრით მოქცეული.

ოდესღაც მთვარე ალბათ თხევად მდგომარეობაში იყო. ამ თხევადი სფეროს ბრუნვას დედამიწის ირგვლივ თან ახლდა ძალიან მძლავრი მოქცევის ხახუნი, რომელმაც თანდათან შეანელა მთვარის მოძრაობა. ბოლოს და ბოლოს, მთვარემ შეწყვიტა დედამიწის მიმართ ბრუნვა, მოქცევები შეწყდა და მთვარემაც დაგვიმალა თავისი ზედაპირის ნახევარი.

VIII. წნევა

ჰიდრავლიკური წნეხი

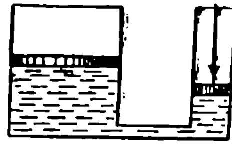
ჰიდრავლიკური წნეხი ძველისძველი მანქანაა, მაგრამ მან დღემდე შეინარჩუნა თავისი მნიშვნელობა.

დახედეთ 75-ე ნახატზე გამოსახულ ჰიდრავლიკურ წნეხს. დახშულ წყლიან ჭურჭელში ორ დგუშს შეუძლია მოძრაობა — დიდს და პატარას. ერთ დგუშს რომ ხელი დავაჭიროთ, წნევა მეორე დგუშს გადაეცემა და იგი აიწევა. რამდენ წყალსაც შეიყვანს ჭურჭლის შიგნით პირველი დგუში, იმდენივე წყალი ავა მეორე დგუშის საწყისი დონის ზევით.

თუ დგუშების ფართია S_1 და S_2, ხოლო გადანაცვლება — l_1 და l_2, მაშინ მოცულობათა ტოლობა გვაძლევს: $S_1 l_1 = S_2 l_2$, ანუ

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{S_2}{S_1}.$$

ჩვენ გვინდა დგუშების წონასწორობის პირობა გავიგოთ. ამ პირობას ადვილად ვიპოვით, თუ იმ დებულებიდან გამოვალთ, რომ გაწონასწორებული ძალების მუშაობა ნულის ტოლი უნდა იყოს. თუკი ასეა, დგუშების გადანაცვლებისას მათზე მოქმედი ძალების მუშაობებიც ტოლი უნდა იყოს (შებრუნებული ნიშნით). მაშასადამე,



ნახ. 75.

$$F_1 l_1 = F_2 l_2, \text{ ანუ } \frac{F_2}{F_1} = \frac{l_1}{l_2}.$$

წინა ტოლობასთან შედარებით, ვნახავთ, რომ

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}.$$

ეს უბრალო განტოლება ძალის უზარმაზარი გამრავლების შესაძლებლობას აღნიშნავს. წნევის გადამცემ დგუშს შეიძლება ასჯერ, ათასჯერ ნაკლები ფართობი ჰქონდეს. ამდენჯერვე განსხვავებული იქნება დიდ დგუშზე მოქმედი ძალა კუნთის ძალისგან.

ჰიდრავლიკური წნეხის საშუალებით შეიძლება ლითონის ჭედვა და ტვიფრვა, ყურძნის წურვა, სიმძიმეების აწევა.

რასაკვირველია, ძალაში მოგება დაკავშირებული იქნება მანძილში წაგებასთან. იმისთვის, რომ სხეული წნეხით 1 სმ-ით შევკუმშოთ, საჭიროა ხელით იმდენჯერ მეტი გზის გავლა, რამდენჯერაც F_2 და F_1 ძალები ერთმანეთისგან განსხვავდება.

ძალის ფართთან F/S ფარდობას ფიზიკოსები წნევას უწოდებენ. იმის ნაცვლად, რომ ვთქვათ: 1 კგ-ძალა 1 სმ² ფართზე მოქმედებსო, ვამბობთ, უფრო მოკლედ: წნევა (მას P ასოთი აღნიშნავენ) $P=1$ კგ-ძ/სმ².

ნაცვლად შეფარდებისა $\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}$, ახლა შეიძლება დავწეროთ:

$$\frac{F_2}{S_2} = \frac{F_1}{S_1} \text{ ანუ } p_1 = p_2.$$

ამრიგად, ორივე დგუშზე წნევა ერთნაირია.

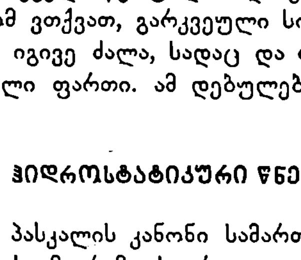
ჩვენი მსჯელობა არ არის დამოკიდებული დგუშების ადგილმდებარეობისგან, არც იმას აქვს მნიშვნელობა, ჰორიზონტალური იქნება მათი ზედაპირები, ვერტიკალური თუ დახრილი. შეიძლება ავირჩიოთ სითხის შემცველი ზედაპირის ორი ნებისმიერი უბანი და ვამტკიცოთ, რომ წნევა ამ ზედაპირზე ყველგან ერთნაირია.

ამრიგად, ირკვევა, რომ სითხის შიგნით წნევა ერთნაირია მის ყველა წერტილში და ყველა მიმართულებით. სხვაგვარად რომ ვთქვათ, გარკვეული სიდიდის ფართზე მოქმედებს ერთი და იგივე ძალა, სადაც და როგორც არ უნდა იყოს განლაგებული ფართი. ამ დებულებას პასკალის კანონი ეწოდება.

ჰიდროსტატიკური წნევა

პასკალის კანონი სამართლიანია სითხეებისა და გაზებისთვის. მაგრამ ის არ ითვალისწინებს ერთ მნიშვნელოვან გარემოებას — წონის არსებობას.

დედამიწის პირობებში ამის დავიწყება არ შეიძლება. წონა წყალსაც აქვს. ამიტომ გასაგებია, რომ წყლის ქვეშ სხვადასხვა სიღრმეზე მოთავსებული ორი ფართი სხვადასხვა წნევას განიცდის. რას უდრის ეს განსხვავება? პირობითად გამოვყოთ სითხის შიგნით ჰორიზონტალურფუძეებიანი სწორი ცილინდრი. შიგ მყოფი წყალი აწვება გარემომცველ წყალს. ამ წნევის სრული ძალა ცილინდრში მოთავსებული სითხის mg წონის ტოლია



ნახ. 76.

(ნახ. 76). ეს სრული ძალა შედგება ცილინდრის ფუძეებსა და მის გვერდით ზედაპირებზე მოქმედი ძალებისგან. მაგრამ გვერდითი ზედაპირის საპირისპირო მხარეებზე მოქმედი ძალები სიდიდით ტოლია და მიმართულებით ურთიერთსაწინააღმდეგო. ამიტომ გვერდით ზედაპირზე მოქმედი ყველა ძალის ჯამი ნულის ტოლია. მაშასადამე, mg წონა $F_2—F_1$ ძალების

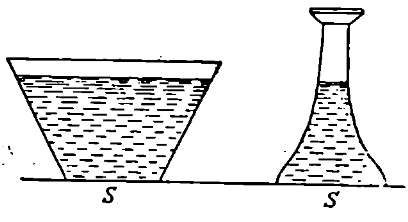
სხვაობის ტოლი იქნება. თუ ცილინდრის სიმაღლეა h, ფუძის ფართია S და სითხის სიმკვრივე ϱ, მაშინ mg ნაცვლად შეიძლება დავწეროთ ϱghS. ამ სიდიდეს უდრის ძალთა სხვაობა. იმისთვის, რომ წნევათა სხვაობა მივიღოთ, საჭიროა წონა S ფართზე გავყოთ. როგორც ირკვევა, წნევათა სხვაობა ϱgh ტოლია.

პასკალის კანონის თანახმად, სხვადასხვაგვარად ორიენტირებული, მაგრამ ერთ სიღრმეზე მოთავსებული ფართებისათვის წნევა ერთნაირი იქნება. მაშასადამე, სითხის ორ წერტილში, რომელთაგან ერთი h სიმაღლეზეა მეორის ზემოთ, წნევათა სხვაობა ერთეულის ტოლი კვეთისა და h სიმაღლის მქონე სითხის სვეტის წონის ტოლი იქნება.

$$p_2 - p_2 = \varrho gh.$$

თავისივე წონით გაპირობებულ წყლის წნევას ჰიდროსტატიკურს უწოდებენ.

დედამიწის პირობებში სითხის თავისუფალ ზედაპირს უფრო ხშირად ჰაერი აწვება. ჰაერის წნევას ატმოსფერულს უწოდებენ. სიღრმეში წნევა შედგება ატმოსფერული და ჰიდროსტატიკური წნევებისგან.



ნახ. 77.

იმისთვის, რომ წყლის წნევის ძალა გამოვიანგარიშოთ, საჭიროა ვიცოდეთ მხოლოდ იმ ფართის ზომა, რომელსაც ის აწვება, და სითხის სვეტის სიმაღლე მის ზემოთ. დანარჩენი, პასკალის კანონის თანახმად, არავითარ როლს არ ასრულებს.

ეს შეიძლება საკვირველად მოგვეჩვენოს. ნუთუ ნახ. 77-ზე გამოსახული ორი ჭურჭლის ერთნაირ ფსკერზე ერთნაირი ძა-

ლა მოქმედებს? მარცხენაში ხომ ბევრად მეტი სითხეა. მიუხედავად ამისა, ფსკერზე მოქმედი ძალები ორივე შემთხვევაში $\varrho g h S$ ტოლია. ეს მეტია მარჯვენა ჭურჭელში წყლის წონაზე და ნაკლებია მარცხენა ჭურჭელში წყლის წონაზე. მარცხენა ჭურჭელში გვერდითი კედლები „ზედმეტი" წყლის წონას იღებენ, ხოლო მარჯვენაში, პირიქით, კედლები წყლის წონას რეაქციის ძალებს ამატებენ. ამ საინტერესო გარემოებას ხანდახან ჰიდროსტატიკურ პარადოქსს უწოდებენ.

თუ სხვადასხვა ფორმის ორ ჭურჭელში ერთ დონეზე ჩავასხამთ წყალს და მერე მილით შევაერთებთ, წყალი ერთი ჭურჭლიდან მეორეში არ გადავა. წყლის გადასვლა იმ შემთხვევაშია მოსალოდნელი, როდესაც ჭურჭელში განსხვავებული წნევაა. მაგრამ რაკი ასე არ არის, შეერთებულ ჭურჭლებში მათი ფორმისგან დამოუკიდებლად სითხე ყოველთვის ერთ დონეზე რჩება.

პირიქით, თუ შეერთებულ ჭურჭლებში წყლის დონეები განსხვავებულია, წყალი გადაინაცვლებს და დონეები გათანაბრდება.

წყლის წნევა ჰაერის წნევაზე ბევრად მეტია. 10 მ სიღრმეზე 1 სმ² ფართს წყალი აწვება ატმოსფერულ წნევისთვის 1 კგ ძალის დამატებით, ერთი კილომეტრის სიღრმეზე — 100 კგ ძალის დამატებით.

ოკეანეს ზოგიერთ ადგილებში 10 კმ-ზე მეტი სიღრმე აქვს. წყლის წნევის ძალა ასეთ სიღრმეებზე განსაკუთრებით დიდია. ხის ნაჭრები 5 კმ სიღრმეზე ჩაშვების შედეგად ამ უზარმაზარი წნევით იმდენად მკვრივდებიან, რომ ასეთი „ნათლობის" შემდეგ აგურებივით იძირებიან წყლით სავსე კასრში.

ეს უზარმაზარი წნევა დიდ დაბრკოლებებს უქმნის ზღვის ცხოვრების მკვლევართ. წყლის სიღრმეებში ფოლადის სფეროებით — ეგრეთ წოდებული ბატისფეროებით, ან ბატისკაფებით ჩადიან, რომლებიც 1 სმ²-ზე 1 ტონაზე მეტ წნევას უძლებენ.

ხოლო წყალქვეშა ნავებს შეუძლიათ მხოლოდ 100—200 მეტრზე ჩაშვება.

ატმოსფეროს წნევა

ჩვენ ვცხოვრობთ ჰაერის ოკეანის — ატმოსფეროს ფსკერზე. ყოველი სხეული, ნებისმიერი ქვიშის მარცვალი, ყოველი საგანი დედამიწაზე ატმოსფეროს წნევის გავლენას განიცდის.

ატმოსფეროს წნევა არც ისე მცირეა. სხეულის ზედაპირის ყოველ კვადრატულ სანტიმეტრზე მოქმედებს დაახლოებით 1 კგ ძალა.

ატმოსფერული წნევის მიზეზი ნათელია. როგორც წყალს, ჰაერსაც აქვს წონა და, მაშასადამე, ქმნის წნევას, რომელიც (ისევე, როგორც წყლის შემთხვევაში) სხეულს ზემოთ მოთავსებული ჰაერის სვეტის წონის ტოლია. რაც უფრო მაღლა ავალთ მთაზე, მით ნაკლები ჰაერი იქნება ჩვენს ზემოთ და, მაშასადამე, მით უფრო შემცირდება ატმოსფეროს წნევა.

სამეცნიერო და საყოფაცხოვრებო მიზნებისათვის საჭიროა ვიცოდეთ, როგორ გავზომოთ წნევა. ამისთვის არსებობს სპეციალური ხელსაწყოები — ბარომეტრები.

ბარომეტრის დამზადება არ არის ძნელი. ერთი მხრიდან დახშულ მილში ასხამენ ვერცხლისწყალს. ღია ბოლოს თითს უცობენ, მილს აპირქვავებენ და ბოლოთი ვერცხლისწყლიან ჯამში უშვებენ. ამ დროს ვერცხლისწყალი მილში ქვევით ეშვება, მაგრამ არ იღვრება. სივრცე ვერცხლისწყლის ზემოთ მილში უდავოდ უჰაეროა. ვერცხლისწყალს მილში გარეთა ჰაერის წნევა აკავებს (ნახ. 78).

რა ზომისაც არ უნდა იყოს ვერცხლისწყლიანი ჯამი, როგორი დიამეტრიც არ უნდა ჰქონდეს მილს, ვერცხლისწყალი ყოველთვის დაახლოებით ერთნაირ — 76 სმ სიმაღლეზე ჩერდება.

თუ 76 სმ-ზე მოკლე მილს ავიღებთ, იგი მთლიანად შეივსება ვერცხლისწყლით და სიცარიელე აღარ დაგვრჩება. 76 სმ სიმაღლის ვერცხლისწყლის სვეტი სადგამს იგივე ძალით აწვება, როგორითაც ატმოსფერო.

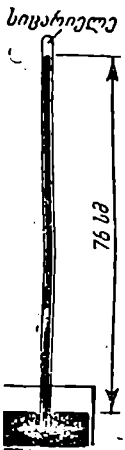
ვერცხლისწყლის 76 სმ სიმაღლის სვეტი 1 სმ^2 ფართს ზემოთ დაახლოებით ერთ კილოგრამს იწონის, უფრო ზუსტად — 1,033 კგ-ძ. ამ რიცხვს იძლევა ვერცხლისწყლის მოცულობა 1 · 76 სმ^3, გამრავლებული მის სიმკვრივეზე — 13,6-

ზე. ერთი კილოგრამი ერთ კვადრატულ სანტიმეტრზე — ეს არის სწორედ ნორმალური ატმოსფერული წნევის სიდიდე.

რიცხვი 76 სმ აღნიშნავს, რომ ვერცხლისწყლის ასეთი სვეტით წონასწორდება მთელი ატმოსფეროს ჰაერის სვეტი ასეთივე ფართის ზემოთ.

თუ დედამიწის ფართს $4\pi R^2$ ფორმულიდან გამოვითვლით, მაშინ მთელი ატმოსფეროს წონა უზარმაზარი რიცხვით $5 \cdot 10^{18}$ კგ-ძ გამოისახება.

ბარომეტრულ მილს შეიძლება სრულიად განსხვავებული ფორმები მიეცეს, მნიშვნელოვანია მხოლოდ ერთი რამ: მილის ერთი ბოლო ისე უნდა დაიხშოს, რომ ვერცხლისწყლის ზედაპირის ზევით ჰაერი არ ჩარჩეს. ვერცხლისწყლის მეორე დონეზე ატმოსფეროს წნევა მოქმედებს.



ნახ. 78.

ვერცხლისწყლის ბარომეტრით შეიძლება ძალიან დიდი სიზუსტით გაიზომოს ატმოსფეროს წნევა. რასაკვირველია, სავალდებულო არ არის ვერცხლისწყლის გამოყენება, სხვა ნებისმიერი სითხეც გამოდგება, მაგრამ ვერცხლისწყალი ყველაზე უფრო მძიმე სითხეა და მისი სვეტის სიმაღლე ნორმალური წნევისას ეს მინიმალური იქნება.

წნევის გასაზომად სხვადასხვა ერთეულებით სარგებლობენ. ხშირად უბრალოდ მიუთითებენ ვერცხლისწყლის სვეტის სიმაღლეს მილიმეტრებში. მაგალითად, ამბობენ, რომ დღეს წნევა ნორმაზე მეტია, იგი ტოლია 768 მმ Hg (ე. ი. ვერცხლისწყლისა).

როცა ვიცით ვერცხლისწყლის სიმკვრივე, ყოველთვის შეიძლება წნევა კგ-ძ/სმ^2-ზე გადავიანგარიშოთ. ვერცხლისწყლის სვეტის ყოველი მილიმეტრი ტოლია 1,36 გ-ძ/სმ^2.

760 მმ Hg წნევას ხშირად ფიზიკურ ატმოსფეროს უწოდებენ. 1 კგ-ძ/სმ^2 წნევას კი — ტექნიკურ ატმოსფეროს.

ფიზიკოსები ხშირად იყენებენ აგრეთვე წნევის ერთეულს — ბარს. 1 ბარი$=10^6$ დინ/სმ^2. რადგანაც 1 გ-ძ$=981$ დინ, ამიტომ 1 ბარი დაახლოებით ერთი ატმოსფეროს ტოლია.

უფრო ზუსტად, ნორმალური ატმოსფერული წნევა დაახლოებით 1013 მილიბარს უდრის.

ვერცხლისწყლის ბარომეტრი მაინცდამაინც მოხერხებული ხელსაწყო არ არის. ვერცხლისწყლის ზედაპირი ღია არ უნდა დარჩეს (ვერცხლისწყლის ორთქლი მშხამავია), გარდა ამისა, ხელსაწყო პორტატული არ არის.

ეს ნაკლოვანებები არა აქვს ლითონის ბარომეტრებს — ანეროიდებს (ე. ი. უჰაეროებს).

ასეთი ბარომეტრი ყველას უნახავს. ეს არის სკალიანი და ისრიანი ლითონის პატარა, მრგვალი კოლოფი. სკალაზე დატანილია წნევის სიდიდეები, ჩვეულებრივ, ვერცხლისწყლის სვეტის სანტიმეტრებში.

ლითონის კოლოფიდან ამოტუმბულია ჰაერი. კოლოფის სარქველს მძლავრი ზამბარა აკავებს, რადგანაც წინააღმდეგ შემთხვევაში იგი ატმოსფეროს წნევით შეიჭყლიტებოდა. წნევის ცვლილებისას სარქველი ჩაიზნიქება ან ამოიზნიქება. სახურავთან დაკავშირებულია ისარი, ამასთან ისე, რომ ჩაზნექისას ისარი მარჯვნივ მიდის.

ასეთ ბარომეტრს მისი ჩვენებების ვერცხლისწყლის ბარომეტრის ჩვენებებთან შედარების საფუძველზე აგრადუირებენ.

თუ წნევის გაგება გსურთ, არ დაგავიწყდეთ ბარომეტრზე თითით დაკაკუნება. ციფერბლატის ისარი დიდ ხანს განიცდის და, ჩვეულებრივ, „გუშინდელ ამინდზე" ჩერდება.

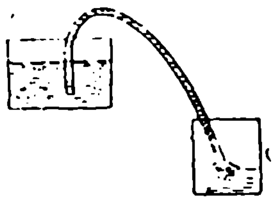
ატმოსფერულ წნევაზე არის დამყარებული მარტივი ხელსაწყოს — სიფონის მოწყობილობა.

ავტომანქანის მძღოლს სურს დაეხმაროს ამხანაგს, რომელსაც ბენზინი გამოელია. როგორ გადმოასხას ბენზინი თავისი ავტომანქანის ავზიდან? ჩაიდანივით ხომ ვერ დახრის.

ამ საქმეს რეზინის მილი შველის. მის ერთ ბოლოს ბენზინის ავზში უშვებენ, მეორე ბოლოდან კი პირით ჰაერს ამოწოვენ. შემდეგ სწრაფი მოძრაობით ღია ბოლოს თითებს უჭერენ და ბენზინის ავზზე დაბლა სწევენ. ახლა თითები შეიძლება გავუშვათ — ბენზინი შლანგიდან გადმოვა (ნახ. 79).

მოხრილი რეზინის მილი არის სწორედ სიფონი. ამ შემთხვევაში სითხე იმავე მიზეზით მოძრაობს, როგორც სწორ დახრილ მილში.

სიფონის მოქმედებისთვის აუცილებელია ატმოსფერული წნევა: იგი ქმნის სითხის „დასაყრდენს“ და არ აძლევს მილში სითხის სვეტს გაწყვეტის საშუალებას. ატმოსფეროს წნევა რომ არ ყოფილიყო, სვეტი გაღუნვის წერტილში გაწყდებოდა და სითხე ორივე ჭურჭელში ჩაიღვრებოდა.



ნახ. 79.

სიფონი იმ შემთხვევაში დაიწყებს მუშაობას, როდესაც სითხე მარჯვენა (ასე ვთქვათ, „გამოღვრის“) მუხლში გადმოსაღვრელი სითხის დონეზე ქვევით ჩამოვა. წინააღმდეგ შემთხვევაში სითხე უკანვე ჩაიღვრება.

როგორ გაიგეს ატმოსფეროს წნევის არსებობა

ჯერ კიდევ ძველი ცივილიზაციისთვის იყო ცნობილი შემწოვი ტუმბოები. მათი დახმარებით წყალს მნიშვნელოვან სიმაღლეზე სწევდნენ. წყალი საოცარი მორჩილებით მიჰყვებოდა ასეთი ტუმბოს დგუშს.

ძველი დროის ფილოსოფოსები, რომლებსაც ამ მოვლენის მიზეზი აფიქრებდათ, ასეთ ღრმააზროვან დასკვნამდე მივიდნენ: წყალი იმიტომ მიჰყვება დგუშს, რომ ბუნებას სიცარიელისა ეშინია, სწორედ ამიტომ არ რჩება დგუშსა და წყალს შორის თავისუფალი ადგილი.

ამბობენ, ერთმა ოსტატმა ტოსკანის ჰერცოგის ბაღებისთვის ფლორენციაში ააგო შემწოვი ტუმბო, რომლის დგუშსაც წყალი 10 მეტრზე მაღლა უნდა შეეწოვა. მაგრამ ასეთი ტუმბოთი წყლის შეწოვის ყოველი ცდა უშედეგოდ დამთავრდა. წყალი 10 მეტრის სიმაღლეზე მიჰყვებოდა დგუშს, შემდეგ კი დგუში სცილდებოდა წყალს, და წარმოიშობოდა სწორედ ის სიცარიელე, რომლისაც ბუნებას ეშინია.

როდესაც გალილეის მიმართეს თხოვნით, აეხსნა ამ წარუმატებლობის მიზეზი, მან უპასუხა, რომ ბუნებას მართლაც არ

უყვარს სიცარიელე, მაგრამ გარკვეულ საზღვრამდე. გალილეის მოწაფემ ტორიჩელიმ, ალბათ, ეს შემთხვევა გამოიყენა საბაბად და 1643 წ. დააყენა თავისი ცნობილი ცდა ვერცხლისწყლით სავსე მილზე. ეს ცდა ჩვენ ზევით ავწერეთ — ვერცხლისწყლის ბარომეტრის დამზადება არის სწორედ ტორიჩელის ცდა.

ტორიჩელიმ აიღო 76 სმ-ზე გრძელი მილი, ვერცხლისწყლის ზემოთ შექმნა სიცარიელე (მას ხშირად სწავლულის პატივსაცემად ტორიჩელის სიცარიელეს უწოდებენ) და დაამტკიცა ატმოსფერული წნევის არსებობა.

ამ ცდით ტორიჩელიმ გაარკვია ტოსკანელი ჰერცოგის ოსტატის წარუმატებლობის მიზეზი. მართლაც, ცხადია, რამდენი მეტრის მანძილზე გაჰყვება წყალი მორჩილად შემწოვი ტუმბოს დგუშს. ეს მოძრაობა მანამდე გაგრძელდება, ვიდრე 1 სმ² განივკვეთის წყლის სვეტის წონა 1 კგ-ძ ტოლი არ გახდება. წყლის ასეთი სვეტის სიმაღლე 10 მ იქნება. აი რატომ ეშინია ბუნებას სიცარიელის... მაგრამ მხოლოდ 10 მ-მდე, ზემოთ აღარ.

1654 წელს, ტორიჩელის აღმოჩენიდან 11 წლის შემდეგ, ატმოსფეროს წნევის მოქმედება თვალსაჩინოდ დაგვანახა მაგდებურგის ბურგომისტრმა ოტო ფონ გერიკემ. ავტორს ცდის ფიზიკურ არსზე უფრო მისი დადგმის თეატრალობამ მოუხვეჭა სახელი.

სპილენძის ორი ნახევარსფერო შეერთებული იყო რგოლისებური შუასადებით. ერთ-ერთ ნახევარსფეროზე მიმაგრებული ონკანის საშუალებით შედგენილი სფეროდან ჰაერის ამოტუმბვის შემდეგ ნახევარსფეროების დაცილება უკვე შეუძლებელი იყო. დაცულია გერიკეს ცდის დაწვრილებითი აღწერა. ატმოსფეროს წნევა ნახევარსფეროებზე ახლა უკვე შეგვიძლია გამოვთვალოთ: თუ სფეროს დიამეტრი 37 სმ იყო, ძალა დაახლოებით ოთხი ტონის ტოლი იქნებოდა. ნახევარსფეროების დასაცილებლად გერიკემ უბრძანა რვა-რვა ცხენი შეებათ ორ ჯგუფად. ცხენებს გამოაბეს ნახევარსფეროებზე მიმაგრებულ რგოლებში გაყრილი ბაგირი, მაგრამ ამაოდ, ნახევარსფეროები მაინც ვერ დააცილეს ერთმანეთს.

რვა ცხენის ძალა (სწორედ რვის და არა თექვსმეტის, რადგანაც რვა ცხენიანი მეორე ჯგუფი, რომელიც უფრო მეტი ეფექტისთვის იყო შებმული, შეიძლებოდა კედელში ჩამაგრებული კავით შეეცვალათ, ამით ნახევარსფეროებზე მოქმედი ძალები იგივე დარჩებოდა) საკმარისი არ იყო მაგდებურგის ნახევარსფეროების დასაცილებლად.

თუ ორი სხეული ერთმანეთს ეხება და მათ შორის ცარიელი სიღრუეა, მაშინ ეს სხეულები არ დასცილდებიან ერთმანეთს ატმოსფეროს წნევის გავლენით.

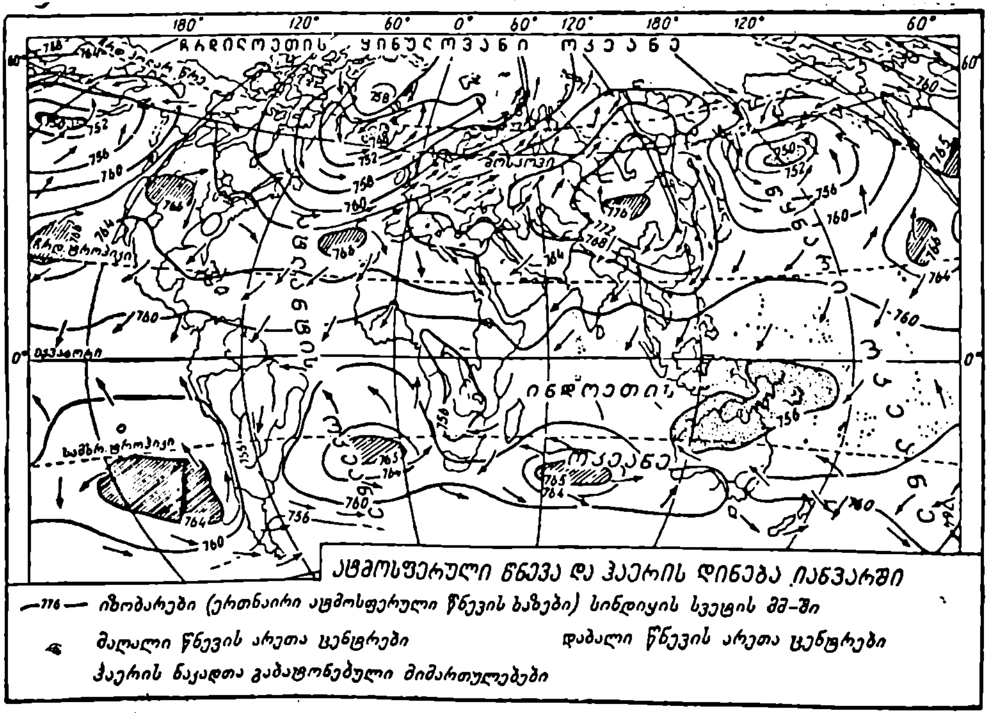
ატმოსფერული წნევა და ამინდი

ამინდის ცვლილებისას წნევის რყევას ძალზე არარეგულარული ხასიათი აქვს. ოდესღაც ფიქრობდნენ, რომ ამინდს მხოლოდ წნევა განსაზღვრავდა. ამიტომ ბარომეტრებზე ჯერ კიდევ დღემდე კეთდება წარწერები: მოწმენდილი ამინდი, სიმშრალე, წვიმა, ქარიშხალი. ასეთი წარწერაც კი გვხვდება: „მიწისძვრა".

წნევის შეცვლა მართლაც ძალიან მოქმედებს ამინდის ცვლილებაზე. მაგრამ ის გადამწყვეტი არ არის. საშუალო, ანუ ნორმალური წნევა ზღვის დონეზე 1013 მილიბარია. წნევის რყევა შედარებით დიდი არ არის. წნევა იშვიათად ეცემა 935—940 მილიბარზე ქვევით, ასევე იშვიათად მატულობს იგი 1055—1060 მილიბარამდე.

ყველაზე დაბალი წნევა აღინიშნება 1927 წ. 18 აგვისტოს ჩინეთის ზღვაზე — 885 მილიბარი. ყველაზე მაღალი — დაახლოებით 1080 მილიბარი — 1900 წ. 23 იანვარს ციმბირში სადგურ ბარნაულში (ყველა მნიშვნელობა აღებულია ზღვის დონის მიმართ).

ნახ. 80-ზე გამოსახულია რუკა, რომლითაც სარგებლობენ მეტეოროლოგები ამინდის ცვლილების ანალიზის დროს. რუკაზე გავლებულ ხაზებს იზობარები ეწოდება. ყოველ ასეთ ხაზზე წნევა ერთნაირია (მისი სიდიდე რიცხვით არის აღნიშნული). ყურადღება მიაქციეთ ყველაზე დაბალი და ყველაზე მაღალი წნევის არეებს — წნევის „მწვერვალებსა" და „ორმოებს".


180° 120° 60° 0° 60° 120° 180° 120° 60°
ჩრდილოეთის ყინულოვანი ოკეანე
ეკვატორი
ჩრდ. ტროპიკი
სამხრ. ტროპიკი
ინდოეთის ოკეანე
ატმოსფერული წნევა და ჰაერის დინება იანვარში
—776— იზობარები (ერთნაირი ატმოსფერული წნევის ხაზები) სინდიყის სვეტის მმ-ში
მაღალი წნევის არეთა ცენტრები
დაბალი წნევის არეთა ცენტრები
ჰაერის ნაკადთა გაბატონებული მიმართულებები

ნახ. 80.

ატმოსფერული წნევის განაწილებაზეა დამოკიდებული ქარის მიმართულება და ძალა.

დედამიწის ზედაპირის სხვადასხვა ადგილას წნევა ერთნაირი არ არის. უფრო ძლიერი წნევა ჰაერს ნაკლები წნევის მქონე ადგილებში „სდენის". ქარი თითქოს იზობარების პერპენდიკულარული მიმართულებით უნდა ქროდეს, ე. ი. იქით, საითაც წნევა უფრო სწრაფად ეცემა. მაგრამ ქარების რუკები სხვაგვარ მდგომარეობას გვიჩვენებს. ჰაერის წნევაში კორიოლისის ძალა ერევა და შეაქვს თავისი ძალიან მნიშვნელოვანი შესწორება.

როგორც ვიცით, ჩრდილო ნახევარსფეროში მოძრავ ნებისმიერ სხეულზე მოძრაობის გასწვრივი მიმართულებისგან მარჯვნივ გადამხრელი კორიოლისის ძალა მოქმედებს. ეს ჰაერის ნაწილაკებსაც ეხება. მეტი წნევის ადგილებიდან ნაკლები წნევის ადგილებისკენ გადევნილი ნაწილაკი იზობარების გარდიგარდმო უნდა მოძრაობდეს, მაგრამ კორიოლისის ძალა მას მარჯვნივ ხრის და ქარის მიმართულება იზობარების მიმართულებასთან დაახლოებით 45° ტოლ კუთხეს ქმნის.

საოცრად დიდი ეფექტია ასეთი მცირე ძალისთვის. ეს იმით აიხსნება, რომ კორიოლისის ძალის მოქმედების ხელისშემშლელი გარემოებაც — ჰაერის ფენების ხახუნი — ძალიან უმნიშვნელოა.

კიდევ უფრო საინტერესოა კორიოლისის ძალების გავლენა ქარების მიმართულებაზე წნევის „მწვერვალებსა" და „ორმოებში". კორიოლისის ძალის გავლენით წნევის მწვერვალებიდან მომავალი ჰაერი არ მიედინება ყველა მიმართულებით რადიუსების გასწვრივ, იგი მრუდი ხაზების — სპირალების გასწვრივ მოძრაობს. ეს ჰაერის სპირალური დინებები ერთსა და იმავე მხარეს ტრიალდება და მაღალი წნევის არეში ქმნის წრიულ გრიგალს, რომელიც ჰაერის მასებს საათის ისრის მიმართულებით გადააადგილებს. (ნახ. 28) (იხ. 86 გვ). ნათლად გვიჩვენებს, როგორ გარდაიქმნება რადიალური მოძრაობა სპირალურად მუდმივი გადამხრელი ძალის გავლენით.

იგივე სურათია დადაბლებული წნევის არეშიც. კორიოლისის ძალა რომ არ ყოფილიყო, ჰაერი ამ არისკენ თანაბრად იდენდა ყველა რადიუსის გასწვრივ. მაგრამ გზაში ჰაერის მა-

სები მარჯვნივ იხრება. ამ შემთხვევაში, როგორც ნახაზიდან ჩანს, წარმოიშობა წრიული გრიგალი, რომელიც ჰაერს საათის ისრის საწინააღმდეგოდ ამოძრავებს.

დაბალი წნევის არეში წარმოშობილ ქარს ციკლონი ეწოდება, მაღალი წნევის არეში კი — ანტიციკლონი.

ნუ გეგონებათ, თითქოს ყოველი ციკლონი ქარიშხალს ან გრიგალს ნიშნავდეს. ციკლონის ან ანტიციკლონის გავლა თქვენს მშობლიურ ქალაქზე ჩვეულებრივი მოვლენაა, თუმცა იგი უმეტესად ამინდის შეცვლასთან არის დაკავშირებული. ბევრ შემთხვევაში ციკლონის მოახლოება ცუდ ამინდს მოასწავებს, ხოლო ანტიციკლონის მოახლოება — კარგი ამინდის მაუწყებელია.

არქიმედეს კანონი

ჩამოვკიდოთ საწონები ზამბარიან სასწორზე. ზამბარა დაგრძელდება და საწონების წონას გვიჩვენებს. საწონებს ნუ მოვხსნით, ისე ჩავუშვათ სასწორი წყალში. შეიცვლება თუ არა მისი ჩვენება? დიახ, შეიცვლება. სხეული თითქოს მოიკლებს წონაში. თუ ცდას კილოგრამიანი რკინის საწონით ჩავატარებთ, წონა დაახლოებით 140 გრამით „შემცირდება".

რატომ? რასაკვირველია, ცხადია, არც საწონის მასა და არც დედამიწის მიზიდულობა არ შეცვლილა. წონის დაკარგვის მიზეზი მხოლოდ ერთი შეიძლება იყოს: წყალში ჩაშვებულ საწონზე ქვევიდან ზევით მოქმედებს 140 გრამ-ძალა. საიდან გაჩნდა ძველი დროის დიდი მეცნიერის არქიმედეს მიერ აღმოჩენილი ეს ამომგდები ძალა? ვიდრე განვიხილავდეთ მყარ სხეულს წყალში, ჯერ განვიხილოთ „წყალი წყალში". პირობითად წყლის ნებისმიერი მოცულობა გამოვყოთ. ამ მოცულობას აქვს წონა, მაგრამ ფსკერზე არ ვარდება. რატომ? პასუხი აშკარაა — ამას გარემომცველი წყლის ჰიდროსტატიკური წნევა ეწინააღმდეგება, ე. ი. ამ წნევის ტოლქმედი განსახილავ მოცულობაში წყლის წონის ტოლია და ვერტიკალურად ზევით არის მიმართული.

ახლა თუ იმავე მოცულობას მყარი სხეულით შევავსებთ, ცხადია, ჰიდროსტატიკური წნევა იგივე დარჩება.

ამრიგად, სითხეში ჩაძირულ სხეულზე ჰიდროსტატიკური წნევის შედეგად მოქმედებს ვერტიკალურად ზევით მიმართული და რიცხობრივად სხეულის მიერ გამოდევნილი წყლის წონის ტოლი ძალა. არქიმედეს კანონიც სწორედ ეს გახლავთ.

ამბობენ, არქიმედე აბაზანაში იწვა და ფიქრობდა, როგორ გამოერკვია, არის თუ არა ვერცხლის მინარევი ოქროს გვირგვინში. აბაზანის მიღების დროს ადამიანი აშკარად გრძნობს ამომგდებ ძალას. კანონი უეცრად გაიხსნა არქიმედესათვის და მთელი თავისი შესანიშნავი სიმარტივით წარმოუდგა. შეძახილით „ევრიკა!" (რაც ნიშნავს „ვიპოვე!") არქიმედე აბაზანიდან ამოხტა და ოთახში გაიქცა ძვირფასი გვირგვინის მოსატანად, რომ დაუყოვნებლივ განესაზღვრა მისი წონის დანაკარგი წყალში.

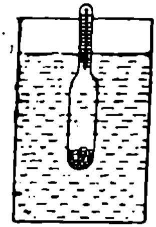
სხეულის წონის დანაკარგი წყალში, გრამებში გამოსახული, სხეულის მიერ გამოდევნილი წყლის წონის ტოლი იქნება. როცა ვიცით წყლის წონა, მაშინვე განვსაზღვრავთ მის მოცულობას, რომელიც გვირგვინის მოცულობის ტოლი იქნება. თუ გვირგვინის წონა გვეცოდინება, ადვილად ვიპოვით იმ ნივთიერების სიმკვრივეს, რომლისგანაც იგია დამზადებული, და რაკი გვეცოდინება ოქროსა და ვერცხლის სიმკვრივეები ვიპოვით მინარევის ნაწილსაც.

არქიმედეს კანონი, რასაკვირველია, ნებისმიერი სითხისთვის არის სამართლიანი. თუ ϱ სიმკვრივის სითხეში ჩაშვებულია v მოცულობის სხეული, მაშინ გამოდევნილი სითხის წონა, ანუ ამომგდები ძალა $\varrho g v$ ტოლი იქნება.

არქიმედეს კანონზეა დამყარებული მარტივი ხელსაწყოების მოწყობილობა, რომლებითაც თხევადი პროდუქტების თვისებებს ამოწმებენ. სპირტს ან რძეს წყალი რომ შევურიოთ, მათი სიმკვრივე შეიცვლება, სიმკვრივის მიხედვით კი შემადგენლობაზე შეიძლება მსჯელობა. ასეთი გაზომვა მარტივად და სწრაფად სრულდება არეომეტრის საშუალებით (ნახ. 81). სითხეში ჩაშვებული არეომეტრი მეტად ან ნაკლებად იძირება იმის მიხედვით, თუ როგორია სითხის სიმკვრივე.

არეომეტრი მაშინ იქნება წონასწორობაში, როდესაც არქიმედეს ძალა არეომეტრის წონას გაუტოლდება.

არეომეტრს აქვს დანაყოფები და სითხის სიმკვრივე იმ ნიშანთან იკითხება, რომელიც სითხის დონეზე იმყოფება. არეომეტრებს, რომლებიც სპირტის კონტროლისთვის იხმარება, სპირტსაზომებს უწოდებენ, რძის შესამოწმებელ არეომეტრებს კი — ლაქტომეტრებს.



ნახ. 81.

ადამიანის სხეულის საშუალო სიმკვრივე ცოტათი მეტია ერთზე. ვინც ცურვა არ იცის, მტკნარ წყალში ჩაიძირება. მარილიანი წყლის სიმკვრივე ერთს აღემატება, ზღვების უმეტესობაში წყლის მარილიანობა უმნიშვნელოა და წყლის სიმკვრივე თუმც ერთზე მეტია. იგი მაინც ნაკლებია ადამიანის სხეულის საშუალო სიმკვრივეზე. წყლის სიმკვრივე ყარაბოღაზ-გოლის ყურეში — კასპიის ზღვაზე — 1,18. ეს ადამიანის სხეულის საშუალო სიმკვრივეზე მეტია. ამ ყურეში ჩაძირვა შეუძლებელია. შეიძლება წყალზე დაწვე და წიგნი იკითხო.

ყინული ცურავს წყალზე. მაგრამ თანდებული „ზე" აქ მთლად მართებულად არ არის გამოყენებული. ყინულის სიმკვრივე დაახლოებით 10%-ით ნაკლებია წყლის სიმკვრივეზე. ამიტომ არქიმედეს კანონიდან გამომდინარეობს, რომ ყინულის ნაჭერი წყალში თავისი მოცულობის დაახლოებით 0,9-ით იძირება. სწორედ ამის გამოა ესოდენ სახიფათო გემების შეხვედრა აისბერგებთან.

თუ ბერკეტიანი სასწორი გაწონასწორებულია ჰაერში, ეს იმას არ ნიშნავს, რომ ის სიცარიელეშიც გაწონასწორებული იქნება. არქიმედეს კანონი ისევე სამართლიანია ჰაერისათვის, როგორც წყლისთვის. ჰაერში მყოფ სხეულზე მოქმედებს ამომგდები ძალა, რომელიც სხეულის მოცულობის ტოლი ჰაერის წონას უდრის. ჰაერში სხეული „ნაკლებს" იწონის, ვიდრე სიცარიელეში. წონის დაკარგვა მით მეტია, რაც უფრო დიდია სხეულის მოცულობა. ერთი ტონა ხე მეტ წონას კარგავს, ვიდრე ერთი ტონა ტყვია. ხუმრობით დასმულ კითხვაზე, რა უფრო მსუბუქია, ასეთივე პასუხი უნდა გავცეთ: ერთი ტონა ტყვია უფრო მძიმეა ერთ ტონა ხეზე, თუკი მათ ჰაერში ავწონით.

ვიდრე საქმე მცირე სხეულებთან გვაქვს, წონის კარგვა ჰაერში დიდი არ არის. მაგრამ თუ ოთახის ზომის სხეულს ავწონით, მაშინ რამდენიმე ათეული კილოგრამი „დაგვაკლდება“. ზუსტი აწონვის დროს მხედველობაში უნდა მივიღოთ შესწორება ჰაერში წონის კარგვაზე.

არქიმედეს ძალა ჰაერში საშუალებას გვაძლევს ავაგოთ საჰაერო ბურთები, აეროსტატები და სხვადასხვა სახის დირიჟაბლები. ამისათვის საჭიროა ჰაერზე მსუბუქი გაზი.

თუ 1 $м^3$ მოცულობის ბუშტს ავავსებთ წყალბადით, რომლის 1 $м^3$-ის წონა 0,09 კგ-ძ ტოლია, მაშინ ამწევი ძალა — არქიმედეს ძალისა და გაზის სიმძიმის სხვაობა — ტოლი იქნება:

$$1{,}29 \text{ კგ-ძ} - 0{,}09 \text{ კგ-ძ} = 1{,}20 \text{ კგ-ძ};$$

1,29 კგ/$მ^3$ ჰაერის სიმკვრივეა.

მაშასადამე, ასეთ ბუშტზე შეიძლება დაახლოებით ერთი კილოგრამი ტვირთის ჩამოკიდება და ეს მას ხელს არ შეუშლის ღრუბლებზე მაღლა ავიდეს.

ცხადია, რომ შედარებით მცირე მოცულობის — რამდენიმე ასეული კუბური მეტრის — წყალბადის ბურთებს შეუძლიათ ჰაერში მნიშვნელოვანი ტვირთის აწევა.

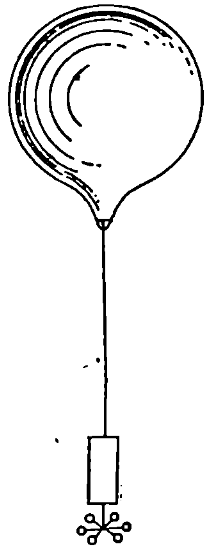
წყალბადიანი აეროსტატების სერიოზული ნაკლია წყალბადის წვადობა. ჰაერთან ერთად წყალბადი ფეთქებად ნარევს ქმნის. აეროსტატების შექმნის ისტორიაში აღნიშნულია ტრაგიკული შემთხვევები.

ამიტომ როდესაც ჰელიუმი აღმოაჩინეს, იგი საჰაერო ბურთების შესავსებად გამოიყენეს. ჰელიუმი წყალბადზე ორჯერ მძიმეა და ამიტომ ამ გაზით გავსებული ბურთის ამწევი ძალა ნაკლებია. მაგრამ იქნება თუ არა ეს განსხვავება არსებითი? ჰელიუმით სავსე 1 $მ^3$ მოცულობის საჰაერო ბურთის ამწევი ძალა შეიძლება გამოვიანგარიშოთ როგორც სხვაობა: 1,29 კგ-ძ — 0,18 კგ-ძ = 1,11 კგ-ძ. ამწევი ძალა სულ 8%-ით შემცირდა. ამავე დროს ჰელიუმის ღირსებები აშკარაა.

აეროსტატი პირველი აპარატი იყო, რომლითაც ადამიანი

ჰაერში ავიდა. ჰერმეტულად დახურულ გონდოლიან აეროსტატებს დღემდე იყენებენ ატმოსფეროს ზედა ფენების შესასწავლად. მათ სტრატოსტატებს უწოდებენ. სტრატოსტატები 20 კმ-ზე მეტ სიმაღლეზე ასულან.

ამჟამად ფართოდაა გავრცელებული სხვადასხვა გამზომი აპარატურით აღჭურვილი საჰაერო ბურთები, რომლებიც გაზომვის შედეგებს რადიოთი გადმოსცემენ (ნახ. 82). ასეთ რადიოზონდებზე დაყენებული მინიატურულბატარეებიანი რადიოგადამცემი პირობითი ნიშნებით გადმოსცემს ცნობებს ატმოსფეროს სინოტივის, ტემპერატურის და წნევის შესახებ სხვადასხვა სიმაღლეზე.



ნახ. 82.

არამართული აეროსტატი შეიძლება შორეულ მოგზაურობაში გაიგზავნოს და საკმაოდ ზუსტად განისაზღვროს, სად დაეშვება ის დედამიწაზე. ამისათვის საჭიროა, აეროსტატი დიდ სიმაღლეზე, 20—30 კმ-ზე ავიდეს. ასეთ სიმაღლეებზე საჰაერო დინებები ძლიერ მდგრადია და აეროსტატის გზის წინასწარი გამოთვლაც საკმაოდ კარგად შეიძლება.

აუცილებლობის შემთხვევაში არსებობს აეროსტატის ამწევი ძალის ავტომატურად შეცვლის საშუალებაც. ამისათვის ან გაზი უნდა გამოვუშვათ, ან ბალასტი ჩამოვაგდოთ.

წინათ ჰაერში საფრენად იყენებდნენ ხრახნიანი მოტორით აღჭურვილ აეროსტატებს. ასეთ აეროსტატებს — მათ დირიჟაბლებს უწოდებენ (რაც „მართვადს“ ნიშნავს) — გარსდენად ფორმას აძლევდნენ. დირიჟაბლებმა ვერ გაუძლეს თვითმფრინავების კონკურენციას; 30 წლის წინანდელ თვითმფრინავებთან შედარებითაც კი ისინი მეტისმეტად დიდი ზომის, სამართავად უხერხული, ზოზინა და „დაბალჭერიანებია“.

მილიონობით ატმოსფეროს ტოლი წნევა

ჩვენ ყოველდღიურად ვხვდებით დიდ წნევას, რომელიც მცირე ფართზე მოდის. ვიანგარიშოთ, მაგალითად, როგორია დაახლოებით ნემსის წვერზე შექმნილი წნევა. ვთქვათ, ნემსის ან ლურსმნის წვერს 0,1 მმ ხაზოვანი ზომა აქვს. ეს იმას ნიშნავს, რომ წვეროს ფართი 0,0001 სმ² ტოლია. თუ ასეთ ლურსმანზე სულ მცირე 10 კგ-ძ ვიმოქმედებთ, მაშინ ლურსმნის ბოლო შეჰქმნის 100.000 ატმოსფერო წნევას. საკვირველი არ არის, რომ წვეტიანი საგნები ასე ადვილად შედიან მკვრივი სხეულების სიღრმეში.

ამ მაგალითიდან გამომდინარეობს, რომ დიდი წნევის შექმნა მცირე ფართზე სრულიად ჩვეულებრივი რამ არის. სულ სხვაგვარად არის საქმე, როცა საჭიროა მაღალი წნევის შექმნა დიდ ფართობზე.

ლაბორატორიულ პირობებში მაღალი წნევა ძლიერი წნეხის, მაგალითად, ჰიდრავლიკური წნეხის საშუალებით იქმნება (ნახ. 83). წნეხის ძალვა გადაეცემა მცირე ფართის დგუშს და იგი შეიდენება ჰურჰელში, სადაც საჭიროა მაღალი წნევის შექმნა.

ასეთი გზით დიდი სიძნელეების გარეშე შეიძლება შეიქმნას რამდენიმე ათასი ატმოსფეროს ტოლი წნევა. ხოლო ზემაღალი წნევის მისაღებად საჭიროა ცდის გართულება, რადგანაც ჰურჰლის მასალა ასეთ წნევას ვერ გაუძლებს.

აქ ჩვენ ბუნება დაგვეხმარა. ირკვევა, რომ 20.000 ატმოსფეროს რიგის წნევებისას ლითონები მნიშვნელოვნად მტკიცდება. ამიტომ ზემაღალი წნევების მისაღებ აპარატს ათავსებენ სითხეში, რომელიც 30.000 ატმოსფეროს რიგის წნევის ქვეშ იმყოფება. ამ შემთხვევაში შიგნითა ჰურჰელში (აქაც დგუშის საშუალებით) ხერხდება რამდენიმე ასეული ათასი ატმოსფერო წნევის შექმნა. ყველაზე მაღალი წნევა — 400.000 ატმოსფერო — მიიღო ამერიკელმა ფიზიკოსმა ბრიჯმენმა.

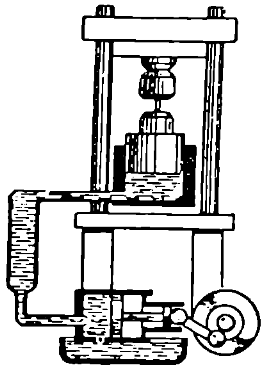
ტყუილად კი არ იჩენენ ზემაღალი წნევებისადმი ინტერესს. ამგვარი წნევების პირობებში შეიძლება ისეთი მოვლენები განვითარდეს, რომელთა სხვა გზით გამოწვევა შეუძლებელია. 1955 წ. მიიღეს ხელოვნური ალმასი. ამისთვის საჭი-

რო გახდა 100.000 ატმოსფერო წნევა და დამატებით 2300° ტემპერატურა.

300.000 ატმოსფეროს რიგის ზემაღალი წნევები დიდ ფართებზე მიიღება მყარი და თხევადი ფეთქებადი ნივთიერებების — ნიტროგლიცერინის, ტროტილის და სხვათა აფეთქებისას.

შეუდარებლად უფრო მაღალი წნევები — 10^{13} ატმოსფერომდე მიიღება ატომური ბომბის შიგნით აფეთქების დროს.

აფეთქების დროს წარმოქმნილი წნევა ძალიან ხანმოკლეა. მუდმივი მაღალი წნევა არსებობს ციურ სხეულთა სიღრმეში, მათ შორის, რასაკვირველია, დედამიწის სიღრმეშიც. დედამიწის სფეროს ცენტრში წნევა დაახლოებით 3 მილიონი ატმოსფეროს ტოლია.



ნახ. 83.

ზედაპირული ძალები

შეიძლება თუ არა წყლიდან მშრალად ამოსვლა? რასაკვირველია, ამისთვის საჭიროა ტანზე ისეთი ნივთიერება წავისვათ, რომელიც არ სველდება. წაისვით თითზე პარაფინი და წყალში ჩაუშვით. როდესაც ამოიღებთ, დაინახავთ, რომ თითს წყალი არ მიჰკარებია, ორ-სამ წვეთს თუ არ მივიღებთ მხედველობაში. საკმარისია თითი დაიქნიოთ და წვეთებიც ჩამოცვივა.

ამ შემთხვევაში ამბობენ: წყალი არ ასველებს პარაფინს. ვერცხლისწყალი ასეთ თვისებას ამჟღავნებს თითქმის ყველა მყარი სხეულის მიმართ: ვერცხლისწყალი არ ასველებს კანს, მინას, ხეს...

წყალი უფრო ჭირვეულია. იგი ზოგ სხეულს მჭიდროდ ეკვრის, ზოგს კი სულაც არ ეკარება. წყალი არ ასველებს ცხიმიან ზედაპირებს, მაგრამ კარგად ასველებს სუფთა მინას, ხეს, ქაღალდს, მატყლს.

თუ წყლის წვეთს სუფთა მინაზე მოვათავსებთ, იგი გაიშლება და ძალზე თხელ ფენას შექმნის. პარაფინზე კი წვეთი სიმძიმის ძალით ოდნავ ჩაჭყლეტილ თითქმის სფერულ ფორმას შეინარჩუნებს.

იმ ნივთიერებათა რიცხვს, რომლებიც თითქმის ყველა სხეულს „ეკვრიან", მიეკუთვნება ნავთი. იგი მიისწრაფვის გაიშალოს მინაზეც, ლითონზეც და ამიტომ უნარი აქვს გამოძვრეს ცუდად დახურული ჭურჭლიდან. დაღვრილი ნავთის პატარა გუბეს დიდი ხნით შეუძლია მოგვიწამლოს არსებობა: ნავთი დიდ ზედაპირს იკავებს, შედის ნაპრალებში, აღწევს ტანისამოსში. ამიტომ არის ასე ძნელი მისი არასასიამოვნო სუნის მოცილება.

სხეულთა უნარს, რომ არ დასველდეს, შეუძლია საინტერესო მოვლენები გამოიწვიოს. აიღეთ ნემსი, წაუსვით ცხიმი და ფრთხილად დააწვინეთ წყალზე. ნემსი არ ჩაიძირება. თუ ყურადღებით დაუკვირდებით, შეიძლება შეამჩნიოთ, რომ ნემსი იწვევს წყლის ზედაპირის ჩაზნექას და მშვიდად დევს წარმოქმნილ ჩაღრმავებაში. მაგრამ საკმარისია მსუბუქი დაწოლა და ნემსი ჩაიძირება. ამისათვის საჭიროა, მისი მნიშვნელოვანი ნაწილი წყლის ზედაპირის ქვეშ აღმოჩნდეს.

ამ საინტერესო თვისებას იყენებენ წყალზე მცურავი მწერები. ისინი ისე სწრაფად დარბიან წყლის ზედაპირზე, რომ თათებს არც ისველებენ.

დასველებით ამდიდრებენ მადანს ფლოტაციურად. სიტყვა „ფლოტაცია" „ამოტივტივებას" ნიშნავს. წვრილად დაფხვნილ მადანს წყლიან როფში ტვირთავენ და შიგ უმატებენ მცირე რაოდენობით სპაციალურ ზეთს, რომელსაც უნარი აქვს დაასველოს სასარგებლო წიაღისეულის მარცვლები და არ დაასველოს „ფუჭი ქანის" (ასე უწოდებენ მადნის უსარგებლო ნაწილს) მარცვლები. არევისას სასარგებლო წიაღისეულის მარცვლები ზეთის აპკით იფარება.

მადნის, წყლისა და ზეთისაგან დამზადებულ შავ ფაფაში ჰაერს უბერავენ. წარმოიშობა ჰაერის მრავალი პატარა ბუშტულა — ქაფი. ჰაერის ბუშტულები ზევით ამოდის. ფლოტაციის პროცესი იმ გარემოებას ემყარება, რომ ზეთის ფენით დაფარული მარცვლები ჰაერის ბუშტულებს ეკვრიან. მსხვილ

ბუშტულას, ისე როგორც საჰაერო ბურთს, ზევით ამოაქვს პატარა მარცვალი.

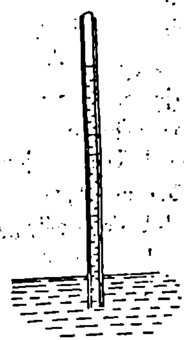
სასარგებლო წიაღისეული ზედაპირზე ამოდის ქაფში. ფუჭი ქანი კი ძირზე რჩება. ქაფს ხდიან და გზავნიან შემდგომი დამუშავებისთვის ეგრეთ წოდებული „კონცენტრატის" მისაღებად, რომელიც რამდენიმე ათეულჯერ ნაკლებ ფუჭ ქანს შეიცავს.

ზედაპირების შეჭიდულობის ძალას შეუძლია დაარღვიოს დონეების გათანაბრება შეერთებულ ჭურჭლებში. ამის სამართლიანობის შემოწმება ძალიან ადვილია.

თუ წვრილ (მილიმეტრის ნაწილი დიამეტრში) მინის მილს წყალში ჩავუშვებთ, ზიარი ჭურჭლების კანონის საწინააღმდეგოდ წყალი სწრაფად დაიწყებს შიგ ზევით ასვლას და მისი დონე მნიშვნელოვნად ასცდება ფართო ჭურჭლის წყლის დონეს (ნახ. 84).

რატომ? რა ძალა აკავებს ზევით ასული სითხის სვეტის წონას? მაღლა აწევა გამოწვეულია წყლისა და მინის შეჭიდულობის ძალებით.

ზედაპირული შეჭიდულობის ძალები მხოლოდ მაშინ მჟღავნდება მკაფიოდ, როდესაც სითხე მაღლა ადის საკმაოდ წვრილ მილებში. რაც უფრო წვრილია მილი, მით მაღლა აიწევს სითხე, მით უფრო მკაფიოა მოვლენა. ამ ზედაპირული მოვლენის სახელწოდება წვრილი მილების სახელწოდებასთან არის დაკავშირებული, რომელთა არხის დიამეტრი მილიმეტრის ნაწილებით იზომება; ასეთ მილს კაპილარული შეარქვეს (რაც ასე ითარგმნება: „თმასავით წვრილი"). წვრილ მილებში სითხის აწევის მოვლენას კაპილარობა ეწოდება.



ნახ. 84.

რა სიმაღლეზე შეუძლია კაპილარულ მილებს სითხის აწევა? ირკვევა, რომ 1 მმ დიამეტრის მილში წყალი 1,5 მმ იწევს ზევით. თუ დიამეტრი 0,01 მმ, სითხის აწევის სიმაღლე იმდენჯერ მატულობს, რამდენჯერაც მილის დიამეტრი შემცირდა, ე. ი. 15 სმ-მდე.

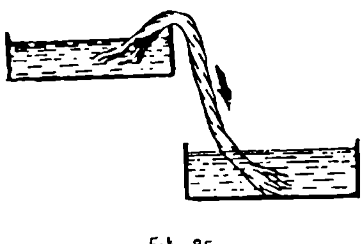
რასაკვირველია, სითხის აწევა შესაძლებელია იმ შემთხვევაში თუ კედლები სველდება. ადვილად მივხვდებით, რომ ვერცხლისწყალი არ აიწევს მინის მილში. პირიქით, ვერცხლისწყალი მინის მილებში დაბლა ეშვება. იგი იმდენად „ვერ იტანს“ მინასთან შეხებას, რომ ისწრაფვის შეამციროს საერთო ზედაპირი იმ მინიმუმამდე, რომლის საშუალებასაც სიმძიმის ძალა იძლევა.

არსებობს მრავალი სხეული, რომლებიც უწვრილესი მილების სისტემისმაგვარი ნივთიერებისგან შესდგება. ასეთ სხეულებში ყოველთვის აღინიშნება კაპილარული მოვლენები.

გრძელი არხებისა და ფორების მთელი სისტემა აქვთ მცენარეებსა და ხეებს. ამ არხების დიამეტრები მილიმეტრის მეასედზე მცირეა. ამის წყალობით კაპილარულ ძალებს ნიადაგის წყალი მნიშვნელოვან სიმაღლეზე ააქვთ და მას მცენარის სხეულს აწვდიან.

ძალიან მოსახერხებელი რამ არის საშრობი ქაღალდი. ვთქვათ, მელანი დააწვეთეთ, ამ დროს კი ფურცლის გადაშლაა საჭირო. ხომ არ მოუცდით, ვიდრე წვეთი გაშრება! იღებთ საშრობი ქაღალდის ფურცელს, მის ბოლოს წვეთში უშვებთ და მელანი სწრაფად მიემართება ზევით სიმძიმის ძალის საწინააღმდეგოდ.

ეს არის ტიპიური კაპილარული მოვლენა. საშრობი ქაღალდის სტრუქტურა მიკროსკოპში ჩანს. იგი შედგება ქაღალდის ბოჭკოების არამკვრივი ბადისგან, რომლებიც ერთმანეთთან წვრილ და გრძელ არხებს ქმნიან. სწორედ ეს არხები ასრულებენ მილების როლს. ბოჭკოებისაგან შექმნილი გრძელი ფორების ანუ არხების ასეთივე სისტემაა პატრუქებში. პატრუქებით ლამპებში ნავთი ადის ზევით. პატრუქის საშუალებით შეიძლება სიფონის მოწყობაც—ამისათვის პატრუქის ერთი ბოლო პირამდე წყლით



ნახ. 85.

სავსე ჰიქაში უნდა ჩავუშვათ, ჰიქის ნაპირზე გადმოკიდებული მისი მეორე ბოლო კი პირველზე ქვევით უნდა იყოს (ნახ. 85).

ქსოვილების თვისებას შეისრუტონ სითხე ქსოვილის ძაფებისგან შექმნილი წვრილი არხებით, სამღებრო წარმოების ტექნოლოგიაშიც ხშირად იყენებენ.

IX. სამყაროს აგურები

ელემენტები

რისგან არის აგებული ჩვენი გარემომცველი სამყარო? ამ კითხვაზე პირველი, ჩვენამდე მოღწეული, პასუხები ძველ საბერძნეთში დაიბადა დაახლოებით 25 საუკუნის წინ.

ეს პასუხები ერთი შეხედვით უკიდურესად უცნაური ჩანს და ჩვენ ბევრი ქაღალდი დაგვეხარჯებოდა, სანამ მკითხველს ავუხსნიდით ძველი დროის ბრძენთა ლოგიკას. თალესი, მაგალითად, ამტკიცებდა, ყველაფერი წყლისგან შედგებაო, ანაქსიმენე ამბობდა, სამყარო ჰაერისგან არის აგებულიო, ჰერაკლიტეს აზრით კი ყველაფერი ცეცხლისგან შედგებოდა.

ახსნათა ასეთმა შეუსაბამობამ უფრო გვიანდელი ბერძენი „სიბრძნის მოყვარულნი" (ასე ითარგმნება სიტყვა „ფილოსოფოსი") აიძულა გაედიდებინათ სამყაროს საწყისების, ან როგორც მათ ძველ სამყაროში უწოდებდნენ, ელემენტების რიცხვი. ემპედოკლე ამტკიცებდა, რომ არსებობს ოთხი ელემენტი: მიწა, წყალი, ჰაერი და ცეცხლი. ამ მოძღვრებაში საბოლოო (საკმაოდ ხანგრძლივი დროისთვის) შესწორებებს არისტოტელემ შეიტანა.

არისტოტელეს მიხედვით, ყველა სხეული ერთი და იმავე ნივთიერებისაგან შედგება, მაგრამ ამ ნივთიერებას სხვადასხვა თვისებების მიღება შეუძლია. არანივთიერი ელემენტი — თვისება ოთხია: სიცივე, სითბო, სინოტივე და სიმშრალე. წყვილ-წყვილად შეერთებისა და ნივთიერებისთვის მინიჭების შედეგად არისტოტელეს ელემენტი-თვისებები ქმნიან ემპედოკლეს ელემენტებს. ასე მაგალითად, მშრალი და ცივი ნივთიერება იძლევა მიწას, მშრალი და ცხელი — ცეცხლს, ნოტიო და ცივი — წყალს და, ბოლოს, ნოტიო და ცხელი — ჰაერს.

თუმცაღა, როცა ბევრ საკითხზე პასუხის გაცემა გაუძნელდათ, ძველი დროის ფილოსოფოსებმა ოთხ ელემენტ-თვისებას კიდევ „ღვთაებრივი კვინტესენცია" დაუმატეს. ეს არის რაღაც მზარეული ღმერთის მსგავსი, რომელიც ერთად ხარშავს სხვადასხვაგვარ ელემენტ-თვისებას. ღმერთის მოშველიებით, რასაკვირველია, ადვილია ნებისმიერი გაუგებრობის განმარტება.

სხვათა შორის, ძალიან დიდი ხნის განმავლობაში — თითქმის XVIII საუკუნემდე — ცოტა ვინმეს თუ გაუბედავს დაეჭვება და კითხვების დასმა. არისტოტელეს მოძღვრება ეკლესიამ აღიარა და მის სამართლიანობაში დაეჭვება მკრეხელობად ითვლებოდა.

მიუხედავად ამისა, ეჭვი მაინც წარმოიშვა. ეს ეჭვი ალქიმიამ დაბადა.

შორეულ წარსულში ადამიანმა იცოდა, რომ ჩვენს გარემომცველ ყველა სხეულს შეუძლია სხვა სხეულად გარდაქმნა. წვა, მადნის გამოწვა, ლითონთა შელღობა კარგად იყო ცნობილი. ამას მოწმობს ჩვენამდე მოღწეული ძველი ხელნაწერები.

ეს თითქოს არც ეწინააღმდეგებოდა არისტოტელეს მოძღვრებას. ნებისმიერი გარდაქმნისას იცვლებოდა, ასე ვთქვათ, ელემენტების „დოზირება". თუ მთელი სამყარო სულ ოთხი ელემენტისგან შედგება, მაშინ სხეულთა გარდაქმნის საშუალებები ძალიან დიდი უნდა იყოს. საჭიროა მხოლოდ ვიპოვოთ საიდუმლო როგორ მივიღოთ ნებისმიერი სხეულიდან სხვა ნებისმიერი სხეული.

განა მიმზიდველი არ არის ოქროს გაკეთება ან განსაკუთრებული, არაჩვეულებრივი „ფილოსოფიური ქვის" პოვნა? ასეთი ქვა ხომ თავის მფლობელს სიმდიდრეს, ძალაუფლებასა და მარადიულ ახალგაზრდობას ჰპირდება. მეცნიერებას ოქროსა და ფილოსოფიური ქვის დამზადების, აგრეთვე ნებისმიერი სხეულის სხვა ნებისმიერ სხეულად გარდაქმნის შესახებ ძველი არაბები ალქიმიას უწოდებენ.

საუკუნეების განმავლობაში ადამიანები სიცოცხლეს სწირავდნენ ამ ამოცანის გადაწყვეტას. ალქიმიკოსებმა ვერ ისწავლეს ოქროს კეთება, ვერ იპოვეს ფილოსოფიური ქვა, მაგრამ, სამაგიეროდ, სხეულთა გარდაქმნის მრავალი ძვირფასი ფაქტი მოაგროვეს. ამ ფაქტებმა ბოლოს და ბოლოს თვითონ ალქიმიას გამოუტანეს სასიკვდილო განაჩენი. XVII საუკუნეში ბევრისთვის გახდა ნათელი, რომ ძირითადი ნივთიერებების — ელემენტების რიცხვი ოთხზე შეუდარებლად მეტია. ვერცხლისწყალი, ტყვია, გოგირდი, ოქრო, სურმა დაუშლადი ნივთიერებები აღმოჩნდა, უკვე აღარ შეიძლებოდა თქმა, რომ ეს ნივთიერებები ელემენტებისგან იყო აგებული. პირიქით, საჭირო გახდა მათი მიმატება სამყაროს ელემენტთა რიცხვისთვის.

1668 წელს ინგლისში გამოვიდა რობერტ ბოილის წიგნი „სკეპტიკური ქიმიკოსი, ანუ დაეჭვებანი და პარადოქსები ალქიმიკოსების ელემენტების თაობაზე". აქ ჩვენ ელემენტის სრულიად ახლებურ განმარტებას ვპოულობთ. ეს უკვე აღარ არის ალქიმიკოსების მოუხელთებელი, საიდუმლოებით მოცული არანივთიერი ელემენტი. ახლა ელემენტი ნივთიერებაა, სხეულის შემადგენელი ნაწილია.

ეს ელემენტის ცნების თანამედროვე განსაზღვრაში თავსდება.

ბოილის ელემენტთა რიცხვი დიდი არ იყო. სწორ სიას ბოილმა ცეცხლიც დაუმატა. მაგრამ ისიც უნდა ითქვას, რომ იდეები ელემენტ-თვისებათა შესახებ მის შემდეგაც ცოცხლობდნენ. დიდი ფრანგი მეცნიერის ლავუაზიეს (1743—1794) სიაშიც კი ნამდვილ ელემენტებთან ერთად ვხვდებით უწონადო ელემენტებსაც: სითბომბადს და სინათლის ნივთიერებას, თუმცა ლავუაზიე ქიმიის დამაარსებლად ითვლება.

XVIII საუკუნის პირველ ნახევარში 15 ელემენტი იყო ცნობილი, ხოლო საუკუნის ბოლოსათვის მათი რიცხვი 35-მდე გაიზარდა, თუმცა მათგან მხოლოდ ოცდასამია ნამდვილი ელემენტი, დანარჩენები ან არარსებული ელემენტებია, ან ისეთი ნივთიერებები, როგორიც მწვავე ნატრიუმი და კალიუმი, რომლებიც რთული ნივთიერებები აღმოჩნდა.

XIX საუკუნის შუა წლებში ქიმიის სახელმძღვანელოებში აღწერილი იყო უკვე ორმოცდაათ დაუშლად ნივთიერებაზე მეტი.

ზოგიერთი ელემენტის შეგნებულ ძიებას ბიძგი მისცა დიდი რუსი ქიმიკოსის მენდელეევის პერიოდულმა კანონმა. აქ ჯერ კიდევ ადრეა ამ კანონზე ლაპარაკი. ვიტყვით მხოლოდ, რომ თავისი კანონით მენდელეევმა დაადგინა, როგორ უნდა ეძებნათ ჯერ კიდევ აღმოუჩენელი ელემენტები.

XX საუკუნის დასაწყისისათვის აღმოაჩინეს ყველა ელემენტი, რომლებსაც ბუნებაში ვხვდებით. მათმა რიცხვმა ითხმოცდარვას მიაღწია.

ატომები

2000 წლის წინათ ძველ რომში დაიწერა ორიგინალური პოემა. მისი ავტორი იყო ლუკრეციუს კარი. „საგანთა ბუნებისათვის“ — ასე ეწოდებოდა ლუკრეციუსის პოემას.

მჟღერი ლექსით მოგვითხრო ლუკრეციუსმა თავის პოეტურ ნაწარმოებში, რა შეხედულებისა იყო ძველი დროის ბერძენი ფილოსოფოსი დემოკრიტე სამყაროზე.

რა შეხედულებები იყო ეს? ეს იყო მოძღვრება უმცირეს, უხილავ ნაწილაკებზე, რომელთაგანაც არის აგებული ჩვენი

სამყარო. დემოკრიტე აკვირდებოდა სხვადასხვა მოვლენებს და ცდილობდა თითოეული მათგანი აეხსნა.

აი, მაგალითად, წყალი. ძლიერი გათბობის შედეგად იგი უხილავ ორთქლად იქცევა და ქროლდება. როგორ შეიძლება ამის ახსნა? ცხადია, წყლის ასეთი თვისება მის შინაგან აგებულებასთან არის დაკავშირებული.

ან, მაგალითად, რატომ ვგრძნობთ ყვავილების სუნს შორიდანვე?

ასეთ საკითხებზე ფიქრისას დემოკრიტე დარწმუნდა, რომ სხეულები მხოლოდ გვეჩვენება უწყვეტი, სინამდვილეში კი ისინი უმცირესი ნაწილაკებისგან შედგებიან. სხვადასხვა სხეულში ეს ნაწილაკები განსხვავებული ფორმისაა, მაგრამ ისინი იმდენად მცირე ზომისაა, რომ მათი დანახვა შეუძლებელია. სწორედ ამიტომ გვეჩვენება უწყვეტად ნებისმიერი სხეული.

დემოკრიტემ ამ უწვრილეს, განუყოფელ ნაწილაკებს, რომლისგანაც წყალი და ყველა სხვა სხეული შედგება, „ატომები" უწოდა, რაც ბერძნულად „განუყოფელს" ნიშნავს.

24 საუკუნის წინანდელი ძველი ბერძენი მოაზროვნეების შესანიშნავი გამჭრიახობა შემდგომ დიდი ხნით მიივიწყეს და ათას წელზე უფრო მეტი ხნის განმავლობაში სწავლულ სამყაროში მარტოდმარტო არისტოტელეს მცდარი მოძღვრება ბატონობდა.

არისტოტელე ამტკიცებდა, რომ ყველა ნივთიერებას შეუძლია მეორე ნივთიერებად გარდაქმნა და კატეგორიულად უარყოფდა ატომების არსებობას. ნებისმიერი სხეული უსასრულოდ შეიძლება ვანაწილოთო, — ასწავლიდა იგი.

1647 წელს ფრანგმა პიერ გასენდიმ გამოსცა წიგნი, რომელშიაც თამამად უარყოფდა არისტოტელეს მოძღვრებას და ამტკიცებდა, რომ ყველა ნივთიერება სამყაროში შედგება განუყოფელი ნაწილაკების — ატომებისგან. ატომები ერთმანეთისგან განირჩევიან ფორმით, სიდიდითა და წონით.

გასენდი ძველი დროის ატომისტებს ეთანხმებოდა და ეს მოძღვრება კიდევ უფრო განავითარა. მან ახსნა, სახელდობრ, როგორ შეუძლია წარმოშობა და წარმოიშობა კიდეც სამყაროში მილიონობით სხვადასხვაგვარი ბუნების სხეული. ამისთვის,

ამტკიცებდა ის, არ არის საჭირო ატომების დიდი რიცხვი. ატომი ხომ იგივეა, რაც სამშენებლო მასალა სახლებისთვის. სამი სახის სამშენებლო მასალისგან — აგურების, ფიცრებისა და მორებისგან — შეიძლება აიგოს უამრავი სრულიად სხვადასხვაგვარი სახლი. სწორედ ასევე რამდენიმე ათეული ატომიდან ბუნებას შეუძლია ათასობით სრულიად სხვადასხვაგვარი სხეულის შექმნა. ამასთან, ყოველ სხეულში სხვადასხვა ატომები მცირე ჯგუფებად ერთიანდებიან; ამ ჯგუფებს გასენდიმ „მოლეკულები“, ე. ი. „პატარა მასები“ უწოდა (ლათინური სიტყვიდან „მოლეს“, რაც მასას ნიშნავს).

სხვადასხვა სხეულის მოლეკულები ერთმანეთისგან განსხვავდებიან მათში შემავალი ატომების რიცხვითა და სახით („ხარისხით“). ადვილი მოსაფიქრებელია, რომ რამდენიმე ათეული სხვადასხვა ატომიდან შეიძლება შეიქმნას მათი სხვადასხვაგვარი კომბინაციების — მოლეკულების უზარმაზარი რიცხვი. აი, რატომ არის ჩვენი გარემომცველი სხეულები ესოდენ ნაირგვარი.

მაგრამ გასენდის შეხედულებებში ჯერ კიდევ ბევრი რამ იყო მცდარი. მაგალითად, მას მიაჩნდა, რომ არსებობს სითბოს, სიცივის, გემოსა და სუნის განსაკუთრებული ატომები. იმ დროის სხვა მეცნიერთა მსგავსად, ვერც მან შეძლო არისტოტელეს გავლენისგან მთლიანად განთავისუფლება, იგი არისტოტელეს არანივთიერ ელემენტებს აღიარებდა.

რუსეთის დიდი განმანათლებლისა და მეცნიერების დამფუძნებლის მ. ლომონოსოვის თხზულებებში არის შემდეგი მოსაზრებები, რომლებიც ცდით ბევრად მოგვიანებით დადასტურდა.

ლომონოსოვი წერს, რომ მოლეკულა შეიძლება იყოს ერთგვაროვანიც და სხვადასხვაგვაროვანიც. პირველ შემთხვევაში მოლეკულაში დაჯგუფებულია ერთგვაროვანი ატომები. მეორეში — მოლეკულა ერთმანეთისგან განსხვავებული ატომებისგან შედგება. თუ რაიმე სხეული ერთგვაროვან მოლეკულებს შეიცავს, იგი მარტივად უნდა ჩაითვალოს. პირიქით, თუ სხეული სხვადასხვაგვარი ატომებისგან აგებული მოლეკულებისგან შედგება, ლომონოსოვი მას შერეულს უწოდებს.

ამჟამად ჩვენ კარგად ვიცით, რომ ბუნების სხვადასხვა-

გვარ სხეულებს სწორედ ასეთი აგებულება აქვთ. მართლაც, ავიღოთ, მაგალითად, გაზი ჟანგბადი; მის ყოველ მოლეკულაში შედის ჟანგბადის ორი ერთნაირი ატომი. ეს მარტივი ნივთიერების მოლეკულაა. ხოლო თუ მოლეკულის შემადგენელი ატომები განსხვავებულია, მაშინ უკვე „შერეული", რთული ქიმიური ნაერთია, მისი მოლეკულები შედგებიან იმ ქიმიური ელემენტების ატომებისგან, რომლებიც ამ შენაერთის შემადგენლობაში შედიან.

შეიძლება სხვაგვარადაც ვთქვათ: ყოველი მარტივი ნივთიერება შედგენილია ერთი ქიმიური ელემენტის ატომებისგან; რთული ნივთიერება კი შეიცავს ორი და მეტი ელემენტის ატომებს.

ბევრი მოაზროვნე მსჯელობდა ატომების არსებობის სასარგებლოდ, მაგრამ ნამდვილად ატომები მეცნიერებაში შეიყვანა და კვლევის საგნად აქცია ინგლისელმა მეცნიერმა დალტონმა. მან აჩვენა, რომ არსებობს ქიმიური კანონზომიერებები, რომელთა ბუნებრივი ახსნა მხოლოდ მაშინ შეიძლება თუ გამოვიყენებთ წარმოდგენებს ატომების შესახებ.

დალტონის შემდეგ ატომები საბოლოოდ დამკვიდრდა მეცნიერებაში. მაგრამ ზოგიერთ მეცნიერს კიდევ ძალიან დიდხანს არ „სჯეროდა ატომებისა". ერთი მათგანი გასული საუკუნის ბოლოს წერდა, რომ რამდენიმე ათეული წლის შემდეგ ატომების „პოვნა მხოლოდ ბიბლიოთეკების მტვერში იქნება შესაძლებელი"-ო.

ახლა ამგვარი მსჯელობა სასაცილო ჩანს. ატომის „ცხოვრების" შესახებ ჩვენ იმდენი რამ ვიცით, რომ მის არსებობაში დაეჭვება იგივეა, რაც შავი ზღვის რეალობაში ეჭვის შეტანა.

ატომების ფარდობითი წონა ქიმიკოსებმა განსაზღვრეს. თავდაპირველად ატომური წონის ერთეულად წყალბადის ატომის წონა მიიღეს. აზოტის ატომური წონა დაახლოებით 14 აღმოჩნდა, ჟანგბადისა — დაახლოებით 16, ქლორისა — დაახლოებით 35,5. იმის გამო, რომ ჟანგბადის შენაერთები ყველაზე უფრო გავრცელებულია, შემდგომში რამდენადმე განსხვავებულად შეარჩიეს ატომური წონის ფარდობითი ერთეულები, სადაც რიცხვი 16,0000 ჟანგბადს მიეწერებოდა. ამ სკალით წყალბადის ატომური წონა 1,008 აღმოჩნდა.

საინტერესო ცდების შედეგად ფიზიკოსებმა მოახერხეს ატომების აბსოლუტური წონის გაზომვა. რადგანაც ფარდობითი წონები ცნობილია, საკმარისია გაიზომოს გრამებში ერთი რომელიმე სახის ატომის, მაგალითად, წყალბადის ატომის წონა.

ცხადია, ფიზიკოსებს არ დაუმზადებიათ სასწორი, რომელზეც შეიძლება ერთი ატომის დადება და მისი საწონით გაწონასწორება. ატომების წონის განსასაზღვრავად ისინი სარგებლობდნენ სხვა გაზომვებით, რომლებიც სრულებით არ არის პირდაპირ აწონვაზე ნაკლებ სარწმუნო.

ატომური წონის ერთეული ტოლი აღმოჩნდა:

$$m = 1{,}66 \cdot 10^{-24} \text{ გ.}$$

ამ რიცხვის სიმცირე რომ წარმოვიდგინოთ, ასეთი მაგალითი მოვიყვანოთ: ვთქვათ, ყოველ ადამიანს დედამიწის ზურგზე (დედამიწის მოსახლეობა კი ორ მილიარდზე მეტია) თითო მილიარდი მოლეკულა გამოართვით. რა რაოდენობის ნივთიერებას მოაგროვებთ? გრამის რამდენიმე მემილიონედს.

ან კიდევ ასეთი შედარება: დედამიწა იმდენჯერ მძიმეა ვაშლზე, რამდენჯერაც ვაშლი მძიმეა წყალბადის ატომზე.

m-ის შებრუნებულ სიდიდეს ავოგადროს რიცხვი ეწოდება:

$$N = \frac{1}{m} = 6{,}023 \cdot 10^{23}.$$

ამ უზარმაზარ რიცხვს შემდეგი აზრი აქვს. ავიღოთ ნივთიერების ისეთი რაოდენობა, რომ გრამების რიცხვი ატომის ან მოლეკულის ფარდობითი M წონის ტოლი იყოს. ასეთ რაოდენობას 1 გრამ-ატომი ან 1 გრამ-მოლეკულა ეწოდება (ხშირად სიმოკლისთვის „გრამ-მოლეკულის" ნაცვლად ამბობენ „მოლი"). მოლეკულის წონა გრამებში Mm ტოლია. ამიტომ მოლეკულების რიცხვი ნებისმიერი ნივთიერების გრამ-მოლეკულაში

$$\frac{M}{Mm} = N,$$

ანუ ავოგადროს რიცხვის ტოლია.

რა არის სითბო

რითი განსხვავდება ცხელი სხეული ცივისგან? ამ კითხვაზე XIX საუკუნის დასაწყისამდე ასეთ პასუხს იძლეოდნენ: ცხელი სხეული მეტ სითბომბადს შეიცავს, ვიდრე ცივი. ეს იგივეა, რომ, ვთქვათ: წვენი მით უფრო მარილიანია, რაც მეტ მარილს შეიცავს. სითბომბადი რაღაა? ამ კითხვაზე პასუხი ასეთი იყო: „სითბომბადი სითბური მატერიაა, ელემენტარული ცეცხლია“. იდუმალი და გაუგებარია. არსებითად კი ეს ისეთივე პასუხია, როგორც, ვთქვათ, თოკის ასეთი განმარტება: „თოკი არის უბრალო ბაგირი“.

სითბომბადის თეორიასთან ერთად დიდი ხანია არსებობდა სხვა შეხედულება სითბოს ბუნებაზე და მას დიდი ოსტატობით იცავდა XVI—XVIII საუკუნეების ბევრი გამოჩენილი სწავლული.

ფრენსის ბეკონი თავის წიგნში „ახალი ორგანონი“ წერდა: „თვით სითბო თავისი არსებით სხვა არაფერია თუ არა მოძრაობა... სითბო მდგომარეობს სხეულის უწვრილეს ნაწილაკთა ცვალებად მოძრაობაში“.

რობერტ ჰუკი წიგნში „მიკროგრაფია“ ამტკიცებდა: „სითბო არის სხეულის ნაწილთა განუწყვეტელი მოძრაობა... არ არსებობს ისეთი სხეული, რომლის ნაწილაკებიც უძრავი იყოს“.

ასეთივე სახის განსაკუთრებულად მკაფიო გამოთქმებს ჩვენ ვხვდებით ლომონოსოვთან (1745 წ.) მის შრომაში „მოსაზრებები სითბოსა და სიცივის მიზეზის შესახებ“. ამ თხზულებაში უარყოფილია სითბომბადის არსებობა და ნათქვამია, რომ „სითბო მდგომარეობს მატერიის ნაწილაკთა შინაგან მოძრაობაში“.

ძალზე ხატოვნად ამბობდა რუმფორდი XVII საუკუნის ბოლოს: „სხეული მით უფრო ცხელია, რაც უფრო ინტენსიურად მოძრაობენ მისი შემადგენელი ნაწილაკები, მსგავსად ზარისა, რომელიც მით უფრო ხმამაღლა ჟღერს, რაც უფრო ძლიერად ირხევა იგი“.

ამ შესანიშნავ მოსაზრებებში, რომლებმაც ბევრად გაუსწრეს წინ თავიანთ დროს, დაფარულია სითბოს ბუნებაზე ჩვენი თანამედროვე შეხედულებების საფუძვლები.

ხანდახან წყნარი, მშვიდი, უღრუბლო, დღეებია. ფოთოლიც კი არ ირხევა ხეზე, უძრავად დგას წყლის სარკისებური ზედაპირი. ყველაფერი ჩვენს ირგვლივ საზეიმო დუმილსა და სიმშვიდეს მოუცავს. უძრავია ხილული სამყარო. მაგრამ რა ხდება ამ დროს ატომებისა და მოლეკულების სამყაროში?

თანამედროვე ფიზიკას ბევრის თქმა შეუძლია ამის შესახებ. არასოდეს, არავითარ პირობებში არ წყდება სამყაროს შემადგენელი უხილავი ნაწილაკების მოძრაობა.

მაშ რატომ ვერ ვხედავთ ჩვენ ამ მოძრაობას? ნაწილაკები მოძრაობენ, სხეული კი უძრავია. განა შეიძლება ასე?..

ხომ არ დაკვირვებიხართ როდისმე მუმლის გუნდს? უქარო ამინდში გუნდი თითქოს ჰაერში ჰკიდია. გუნდის შიგნით კი ინტენსიური ცხოვრებაა. ასობით მწერი მარჯვნივ გაექანა, ამდენივე მარცხნივ მიაწყდა, მაგრამ მთელი გუნდი იმავე ადგილზე დარჩა და თავისი ფორმა არ შეუცვლია.

ატომებისა და მოლეკულების უხილავ მოძრაობასაც ასეთივე ქაოსური, მოუწესრიგებელი ხასიათი აქვს. თუ რომელიღაც მოლეკულები მოცულობიდან გამოვიდნენ, მათ ადგილს სხვები იჭერენ, და რადგანაც ახალმოსულები ოდნავადაც არ განსხვავდებიან წასული მოლეკულებისგან, სხეული ისეთივე რჩება. ნაწილაკების მოუწესრიგებელი, ქაოსური მოძრაობა არ ცვლის ხილული სამყაროს თვისებებს.

ამაო ხომ არ არის ეს ლაპარაკი — შეიძლება იკითხოს მკითხველმა. რით არის ეს, თუგინდ ლამაზი, მსჯელობა სითბომბადის თეორიაზე უფრო დამაჯერებელი? განა უნახავს ვინმეს ნივთიერების ნაწილაკების მარადიული სითბური მოძრაობა?

ნაწილაკების სითბური მოძრაობის დანახვა შეიძლება და ამასთან სულ უბრალო მიკროსკოპის საშუალებითაც. პირველად ეს მოვლენა ჯერ კიდევ ას წელზე მეტი ხნის წინ აღმოაჩინა ინგლისელმა ბოტანიკოსმა ბროუნმა.

როცა მიკროსკოპით მცენარის შინაგან აგებულებას აკვირდებოდა, მან შეამჩნია, რომ მცენარის წვენში მოტივტივე ნივთიერების ძალიან მცირე ნაწილაკები განუწყვეტლივ მოძრაობდნენ ყველა მიმართულებით. ბოტანიკოსი დაინტერესდა: რა ძალა აიძულებს ნაწილაკებს იმოძრაონ? იქნებ ეს რაღაც

ცოცხალი არსებებია? სწავლულმა გადაწყვიტა მიკროსკოპით ენახა თიხის ნაწილაკები ამღვრეულ წყალში. მაგრამ არც ეს, უდავოდ არაცოცხალი ნაწილაკები აღმოჩნდა უძრავი. ისინი განუწყვეტელ ქაოსურ მოძრაობაში იყვნენ და მით უფრო სწრაფად მოძრაობდნენ, რაც უფრო მცირე იყო ნაწილაკები. დიდხანს აკვირდებოდა ბოტანიკოსი წყლის წვეთს, მაგრამ ნაწილაკების მოძრაობა არ შეწყვეტილა. მათ თითქოს განუწყვეტლივ უბიძგებდნენ რაღაც უხილავი ძალები.

ნაწილაკთა ბროუნის მოძრაობა სწორედ სითბური მოძრაობაა. სითბური მოძრაობა ახასიათებს დიდ და მცირე ნაწილაკებს, მოლეკულების ჯგუფებს, ცალკეულ მოლეკულებსა და ატომებს.

ენერგია ყოველთვის მუდმივია

ამრიგად, სამყარო მოძრავი ატომებისგან არის აგებული. ატომებს აქვთ მასა, მოძრავ ატომს აქვს კინეტიკური ენერგია. რასაკვირველია, ატომის მასა წარმოუდგენლად მცირეა, ამიტომ მისი ენერგიაც სულ ერთი ბეწო იქნება, მაგრამ ატომების რიცხვი ხომ მილიარდი მილიარდებია.

ახლა მკითხველს მოვაგონებთ, რომ თუმცა ჩვენ ენერგიის მუდმივობის კანონზე ვლაპარაკობდით, ეს არ იყო საკმარისად უნივერსალური მუდმივობის კანონი. იმპულსი და მომენტი მუდმივი იყო ცდის დროს, ხოლო ენერგია — მხოლოდ იდეალურ შემთხვევაში — როდესაც ხახუნი არ არსებობდა. სინამდვილეში ენერგია ყოველთვის მცირდებოდა.

მაგრამ წინათ ჩვენ არაფერს ვამბობდით ატომის ენერგიაზე. იბადება ბუნებრივი აზრი: იქ, სადაც ერთი შეხედვით ენერგიის შემცირებას აღვნიშნავდით, სინამდვილეში თვალისათვის შეუმჩნევლად ენერგია სხეულის ატომებს გადაეცემოდა.

ატომები მექანიკის კანონებს ემორჩილებიან. მართალია (ამას თქვენ მეორე წიგნიდან გაიგებთ), მათი მექანიკა რამდენადმე თავისებურია, მაგრამ ეს არ ცვლის საქმეს — მექანიკური ენერგიის მუდმივობის თვალსაზრისით ატომები ოდნავადაც არ განსხვავდებიან დიდი სხეულებისგან.

მაშასადამე, ენერგიის სრული მუდმივობა მხოლოდ მაშინ მჟღავნდება, როცა სხეულის მექანიკურ ენერგიასთან ერთად გათვალისწინებულია ამ სხეულისა და გარემომცველი გარემოს შინაგანი ენერგია. მხოლოდ ამ შემთხვევაში მივიღებთ უნივერსალურ კანონს.

სხეულის სრული ენერგია რისგანლა შედგება? მისი პირველი მდგენელი, არსებითად, ჩვენ უკვე დავასახელეთ — ეს ყველა ატომის კინეტიკური ენერგიის ჯამია. მაგრამ არც ის უნდა დავივიწყოთ, რომ ატომები ერთმანეთთან ურთიერთქმედებენ. ამრიგად, ემატება კიდევ ამ ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია. მაშასადამე, სხეულის სრული ენერგია ტოლია მისი ნაწილაკების კინეტიკური ენერგიების ჯამისა და მათი ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგიისა.

ადვილი გასაგებია, რომ სხეულის, როგორც მთლიანის, მექანიკური ენერგია სრული ენერგიის მხოლოდ ნაწილია. როდესაც სხეული უძრავია, მისი მოლეკულები ხომ არ ჩერდებიან და არ წყვეტენ ერთმანეთთან ურთიერთქმედებას. ნაწილაკების სითბური მოძრაობის ენერგია, რომელიც უძრავ სხეულში რჩება, და ნაწილაკთა ურთიერთქმედების ენერგია შეადგენენ სხეულის შინაგან ენერგიას. ამიტომ სხეულის სრული ენერგია მექანიკური და შინაგანი ენერგიების ჯამის ტოლია.

სხეულის როგორც მთლიანის მექანიკურ ენერგიაში შედის აგრეთვე მიზიდულობის ენერგიაც, ე. ი. სხეულის ნაწილაკთა დედამიწასთან ურთიერთქმედების პოტენციალური ენერგია.

თუ განვიხილავთ შინაგან ენერგიას, ჩვენ უკვე ვეღარ აღმოვაჩენთ ენერგიის დანაკარგს. როდესაც ბუნებას მძლავრი გამადიდებელი მინებით ვაკვირდებით, საგანგებოდ ჰარმონიული სურათი წარმოგვიდგება. მექანიკური ენერგიის არავითარი დანაკარგი არ გვხვდება, არის მხოლოდ მისი გარდაქმნა სხეულის ან გარემოს შინაგან ენერგიად. მუშაობა დაიკარგა? არა! ენერგია დაიხარჯა მოლეკულების ფარდობითი მოძრაობის სიჩქარის გაზრდაზე ან მათი ურთიერთგანლაგების შეცვლაზე.

მოლეკულები ემორჩილებიან მექანიკური ენერგიის მუდმივობის კანონს. მოლეკულების სამყაროში არ არის ხახუნის ძალები; მოლეკულების სამყაროს მართავს პოტენციალური ენერგიის კინეტიკურში გადასვლა და პირუკუ. მხოლოდ დიდი საგნების უხეშ სამყაროში, რომელიც ვერ ამჩნევს მოლეკულებს, „იკარგება ენერგია“.

თუ რომელიმე მოვლენაში მექანიკური ენერგია მთლიანად ან ნაწილობრივ იკარგება, მაშინ იმავე სიდიდით იზრდება ამ მოვლენაში მონაწილე სხეულებისა და გარემოს შინაგანი ენერგია, სხვანაირად რომ ვთქვათ, მექანიკური ენერგია ყოველგვარი დანაკარგის გარეშე გადადის მოლეკულების ან ატომების ენერგიაში.

ენერგიის მუდმივობის კანონი ფიზიკის უმკაცრესი ბუხჰალტერიაა. ნებისმიერ მოვლენაში შემოსავალი და გასავალი ზუსტად უნდა დაემთხვეს ერთმანეთს. თუ რომელიმე ცდის დროს ეს პირობა დაირღვა, გამოდის, რაღაც მნიშვნელოვანი გამოგვრჩა მხედველობიდან. ენერგიის მუდმივობის კანონი ამ შემთხვევაში გვაძლევს სიგნალს: მკვლევარო, გაიმეორე ცდა, უფრო ზუსტად გაზომე, ეძებე დანაკარგის მიზეზი! ამ გზით ფიზიკოსებს არა ერთი მნიშვნელოვანი მოვლენა აღმოუჩენიათ და კიდევ და კიდევ დარწმუნებულან ამ შესანიშნავი კანონის უმკაცრეს სისწორეში.

კალორია

ჩვენ უკვე გვაქვს ენერგიის ორი ერთეული — ერგი და კილოგრამმეტრი. თითქოს საკმარისია. მაგრამ სითბური მოვლენების შესწავლისას ტრადიციულად კიდევ მესამე ერთეულით — კალორიითაც სარგებლობენ.

მოგვიანებით ჩვენ ვნახავთ, რომ არც კალორია ამოწურავს ენერგიის აღსანიშნავად მიღებულ ერთეულთა სიას. შესაძლებელია, ყოველ ცალკეულ შემთხვევაში ენერგიის „საკუთარი“ ერთეულის ხმარება მოხერხებული და მიზანშეწონილი იყოს. მაგრამ ენერგიის ერთი სახის მეორეში გადასვლასთან დაკავშირებულ ცოტად თუ ბევრად რთულ მაგალითში ერთეულების წარმოუდგენელი არევ-დარევაა ხოლმე.

გამოთვლების გამარტივების მიზნით ერთეულთა ახალი სისტემა (SI) მუშაობის, ენერგიისა და სითბოს რაოდენობისათვის ითვალისწნებს ერთ ერთეულს — ჯოულს (იხ. გვ. 109). მაგრამ თუ მხედველობაში მივიღებთ ტრადიციის ძალას და ახალი სისტემის საყოველთაო ხმარებაში შესვლისა და მის ერთეულთა ერთადერთ სისტემად ქცევისათვის საჭირო ვადას, სასარგებლო იქნება უფრო ახლოს გავეცნოთ სითბოს რაოდენობის „წარმავალ" ერთეულს — კალორიას.

მცირე კალორია (კალ) ენერგიის ის რაოდენობაა, რომელიც უნდა მივანიჭოთ 1 გ წყალს 1°-ით გასათბობად.

სიტყვა „მცირე" საჭიროა, რადგან ხანდახან სარგებლობენ „დიდი" კალორიითაც, რომელიც ათასჯერ მეტია არჩეულ ერთეულზე (დიდი კალორია ხშირად აღინიშნება „კკალ"-ით, რაც „კილოკალორიას" ნიშნავს).

კალორიასა და მუშაობის მექანიკურ ერთეულებს — ერგსა თუ კილოგრამომეტრს შორის თანაფარდობას წყლის მექანიკური ხერხით გათბობის საშუალებით პოულობენ. ასეთი ცდები მრავალჯერ ჩატარებულა. შეიძლება, მაგალითად, წყლის ტემპერატურის მომატება თუ მას ენერგიულად მოვურევთ. წყლის გათბობისათვის დახარჯული მუშაობა საკმაოდ ზუსტად განისაზღვრება: ასეთი გაზომვის შედეგად მიიღეს:

$$1 \text{ კალ} = 0{,}427 \text{ კგმ} = 4{,}18 \text{ ჯ}.$$

რამდენადაც ენერგიისა და მუშაობის ერთეულები საერთოა, კალორიებში მუშაობის გაზომვაც შეიძლება. კილოგრამიანი საწონის ერთი მეტრის სიმაღლეზე ასატანად საჭიროა 2,35 კალორიის დახარჯვა. ეს უჩვეულოდ ჟღერს, თანაც ტვირთის ატანის შედარება წყლის გათბობასთან არ არის მოსახერხებელი. ამიტომაც მექანიკაში კალორიებით არ სარგებლობენ.

ორიოდე სიტყვა ისტორიიდან

ენერგიის მუდმივობის კანონი მხოლოდ მაშინ შეიძლებოდა ჩამოყალიბებულიყო, როდესაც წარმოდგენა სითბოს მექანიკური ბუნების შესახებ საკმაოდ მკაფიოდ გამოისახა და

ტექნიკამ დასვა პრაქტიკულად მნიშვნელოვანი საკითხი სითბოსა და მუშაობას შორის ექვივალენტზე.

პირველი ცდა სითბოსა და მუშაობას შორის რაოდენობრივი თანაფარდობის დასადგენად ჩაატარა ცნობილმა ფიზიკოსმა რუმფორდმა (1768—1814). ის მუშაობდა ქვემეხების დამამზადებელ ქარხანაში. როდესაც ქვემეხის ლულას ბურღავენ, გამოიყოფა სითბო. როგორ უნდა შეფასდეს იგი? რა უნდა მივიღოთ სითბოს საზომად? რუმფორდს აზრად მოუვიდა ბურღვის დროს შესრულებული მუშაობა წყლის ამა თუ იმ რაოდენობის გრადუსების ამა თუ იმ რიცხვით გათბობასთან დაეკავშირებინა. ამ გამოკვლევაში, შეიძლება ითქვას, პირველად არის მკაფიოდ გამოთქმული აზრი, რომ სითბოსა და მუშაობას საერთო საზომი უნდა ჰქონდეს.

შემდეგ ნაბიჯს ენერგიის მუდმივობის კანონის აღმოჩენისკენ წარმოადგენდა მნიშვნელოვანი ფაქტის დადგენა: მუშაობის მოსპობას თან ახლავს სითბოს პროპორციული რაოდენობის წარმოქმნა, სწორედ ასე იპოვეს სითბოსა და მუშაობის საერთო საზომი.

ეგრეთ წოდებული სითბოს მექანიკური ექვივალენტის პირველი განსაზღვრა მოგვცა ფრანგმა მეცნიერმა სადი კარნომ. ეს გამოჩენილი ადამიანი 36 წლის ასაკში, 1832 წელს, გარდაიცვალა და დატოვა ხელნაწერი, რომელიც მხოლოდ 50 წლის შემდეგ გამოქვეყნდა. კარნოს აღმოჩენა უცნობი დარჩა და მეცნიერების განვითარებაზე გავლენა არ მოუხდენია. ამ შრომაში კარნომ გამოითვალა, რომ 1 მ^3 წყლის 1 მ სიმაღლეზე ასატანად საჭიროა ისეთივე ენერგია, რაც 1 კგ წყლის 2,7°-ით (სწორი მნიშვნელობაა 2,3°) გასათბობად.

1842 წელს თავის პირველ შრომას აქვეყნებს ჰეილბრონელი ექიმი დოქტორი იულიუს რობერტ მაიერი. თუმცა მაიერი ჩვენთვის ნაცნობ ფიზიკურ ცნებებს სრულიად განსხვავებულ სახელწოდებებს აძლევს, მისი შრომის ყურადღებით წაკითხვას მაინც იმ დასკვნამდე მივყავართ, რომ იქ გადმოცემულია ენერგიის მუდმივობის კანონი. მაიერი განასხვავებს შინაგან („სითბურ“) ენერგიას, მიზიდულობის პოტენციალურ ენერგიას და სხეულის მოძრაობის ენერგიას. იგი ცდილობს წმინდა ლოგიკური დასკვნებიდან გამოიყვანოს სხვადა-

ჰერმან ჰელმჰოლცი (1821—1894) — სახელგანთქმული გერმანელი მეცნიერი. ჰელმჰოლცი დიდი წარმატებით მუშაობდა ფიზიკის მათემატიკისა და ფიზიოლოგიის დარგში. მან პირველმა (1947 წ.) მოგვცა ენერგიის მუდმივობის კანონის მათემატიკური განმარტება და ხაზი გაუსვა ამ კანონის საყოველთაო ხასიათს. უდიდესი მნიშვნელობის შედეგები მოიპოვა ჰელმჰოლცმა თერმოდინამიკაში; მან პირველმა გამოიყენა იგი ქიმიური პროცესების შესასწავლად. სითხეების გრიგალურ მოძრაობაზე თავისი შრომებით ჰელმჰოლცმა საფუძველი ჩაუყარა ჰიდროდინამიკასა და აეროდინამიკას. მნიშვნელოვანი გამოკვლევები ჩაატარა მან აკუსტიკისა და ელექტრომაგნიტიზმის დარგში. ჰელმჰოლცმა განავითარა მუსიკის ფიზიკური თეორია. თავის ფიზიკურ გამოკვლევებში იყენებდა მძლავრ და ორიგინალურ მათემატიკურ მეთოდებს.

სხვა გარდაქმნის დროს ენერგის მუდმივობის აუცილებლობა. იმისთვის, რომ ეს მტკიცება ცდით შემოწმდეს, ამ ენერგიების გასაზომად საჭიროა საერთო საზომი. მაიერი ანგარიშობს, რომ ერთი კილოგრამი წყლის ერთი გრადუსით გათბობა იგივეა, რაც ერთი კილოგრამის 365 მეტრზე ატანა.

სამი წლის შემდეგ გამოქვეყნებულ თავის მეორე ნაშრომში მაიერი აღნიშნავს ენერგიის მუდმივობის კანონის უნივერსალობას — ქიმიის, ბიოლოგიისა და კოსმოსური მოვლენების საკითხებისთვის მისი გამოყენების შესაძლებლობას. ენერგიების სხვადასხვა ფორმას მაიერი უმატებს მაგნიტურ, ელექტრულ და ქიმიურ ენერგიებს.

ენერგიის მუდმივობის კანონის აღმოჩენაში დიდი დამსახურება მიუძღვის შესანიშნავ ინგლისელ ფიზიკოსს (სალფორდელ მელუდეს) ჯემს პრესკოტ ჯოულს, რომელიც მაიერისაგან დამოუკიდებლად მუშაობდა.

თუ მაიერისთვის დამახასიათებელია ცოტაოდენი მიდრეკილება გაურკვეველი ფილოსოფიისადმი, ჯოულისთვის ძირითად ნიშანს წარმოადგენს განსახილველი მოვლენებისადმი მკაცრი ექსპერიმენტული მიდგომა. ჯოული ბუნების წინაშე კითხვას სვამს და პასუხს განსაკუთრებულად გულდასმით დაყენებული სპეციალური ცდების მეშვეობით ღებულობს. ეჭვგარეშეა, ჯოული თავისი ცდების მთელ სერიაში ხელმძღვანელობდა ერთი იდეით — ეპოვნა საერთო საზომი სითბური, ქიმიური, ელექტრული და მექანიკური მოქმედებების შესაფასებლად, ეჩვენებინა, რომ ყველა ამ მოვლენაში ენერგია მუდმივია. ჯოულმა თავისი აზრი ასე ჩამოაყალიბა: „სათანადო მოქმედების გარეშე ბუნებაში არ ისპობა მუშაობის გამომწვევი ძალა".

ჯოულმა პირველი შრომის შესახებ მოხსენება გააკეთა 1843 წ. 24 იანვარს, ხოლო იმავე წლის 21 აგვისტოს მან ილაპარაკა სითბოსა და მუშაობის საერთო საზომის დადგენისას მიღებულ შედეგებზე. კილოგრამი წყლის ერთი გრადუსით გათბობა იგივე აღმოჩნდა, რაც ერთი კილოგრამის 460 მეტრზე ატანა.

შემდგომ წლებში ჯოული და სხვა მკვლევარები ბევრს შრომობდნენ სითბური ექვივალენტის მნიშვნელობის დასა-

ზუსტებლად და ექვივალენტის სრული უნივერსალობის დასამტკიცებლად. ორმოციანი წლების ბოლოსთვის ცხადი გახდა, რომ როგორი გზითაც არ უნდა გადადიოდეს მუშაობა სითბოში, წარმოშობილი სითბოს რაოდენობა ყოველთვის დახარჯული მუშაობის პროპორციული იქნება. მიუხედავად იმისა, რომ ჯოულმა ცდით დაასაბუთა ენერგიის მუდმივობის კანონი, თავის შრომებში მას არ მოუცია ამ კანონის მკაფიო ფორმულირება.

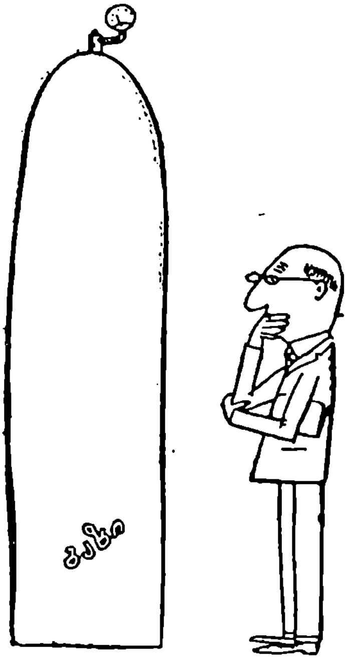
ეს დამსახურება გერმანელ ფიზიკოსს ჰელმჰოლცს ეკუთვნის. 1847 წ. 23 ივლისს ბერლინის ფიზიკური საზოგადოების სხდომაზე გერმან ჰელმჰოლცმა წაიკითხა მოხსენება ენერგიის მუდმივობის პრინციპის შესახებ. ამ შრომაში პირველად იყო მკაფიოდ გადმოცემული ენერგიის მუდმივობის კანონის მექანიკური საფუძველი. სამყარო ატომებისაგან შედგება, ატომებს აქვთ პოტენციალური და კინეტიკური ენერგია. სხეულის ან სისტემის შემადგენელი ნაწილაკების პოტენციალურ და კინეტიკურ ენერგიათა ჯამი არ შეიძლება შეიცვალოს, თუ ეს სხეული ან სისტემა გარეგან ზემოქმედებას არ განიცდის. ენერგიის მუდმივობის კანონი იმ სახით, რა სახითაც ჩვენ გაგაცანით რამდენიმე გვერდის წინ, პირველად ჰელმჰოლცმა ჩამოაყალიბა.

ჰელმჰოლცის დიდი მოხსენება შეიცავდა არა მარტო საერთო იდეების ფორმულირებას. მან დაწვრილებით განიხილა ყველა ფიზიკური მოვლენა— სითბური, ქიმიური, ელექტრომაგნიტური, უჩვენა ექვივალენტურობის პრინციპის უნივერსალობა და ჩამოაყალიბა ენერგიის გამოთვლის წესები.

ჰელმჰოლცის შრომის შემდეგ სხვა ფიზიკოსებს ენერგიის მუდმივობის პრინციპის შემოწმება და გამოყენებაღა დარჩათ. ყველა ამ გამოკვლევის წარმატების შედეგად ორმოცდაათიანი წლების ბოლოსთვის ენერგიის მუდმივობის კანონი უკვე საყოველთაოდ იყო აღიარებული როგორც ბუნებისმეტყველების ფუნდამენტალური კანონი.

უკვე XX საუკუნეში შეიმჩნეოდა მოვლენები, რომლებიც ენერგიის მუდმივობის კანონს ეჭვქვეშ აყენებდნენ. მაგრამ შემდგომში ამ საეჭვო მოვლენებმა თავისი ახსნა ჰპოვა. ენერგიის მუდმივობის კანონი დღემდე წარმატებით გადის გამოცდას.

X. ნივთიერების აგებულება



მოლეკულები

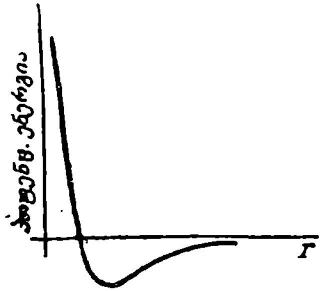
მოლეკულები ატომებისაგან შედგება. ატომები შეკავშირებულია მოლეკულებად ძალებით, რომლებსაც ქიმიურ ძალებს უწოდებენ.

არსებობს ორი, სამი, ოთხი ატომისგან შემდგარი მოლეკულები. უმსხვილესი მოლეკულები — ცილების მოლეკულები — რამდენიმე ათეული ათასი და რამდენიმე ასეული ათასი ატომისგანაც კი შედგება.

მოლეკულების სამყარო არაჩვეულებრივად მრავალფეროვანია. ამჟამად ქიმიკოსებმა თავიანთ ლაბორატორიებში

ბუნებრივი ნივთიერებებიდან გამოჰყვეს და შექმნეს სხვადასხვა მოლეკულებისგან აგებული მილიონობით ნივთიერება.

მოლეკულების თვისებები განისაზღვრება არა მარტო იმით, ამა თუ იმ სახის ატომების რა რაოდენობა იღებს მონაწილეობას მათ აგებაში, არამედ იმითაც, თუ რა წესით და როგორი კონფიგურაციით არიან ისინი შეერთებული. მოლეკულა არ არის აგურების გროვა, ის რთული არქიტექტურული ნაგებობაა, სადაც ყოველ აგურს თავისი ადგილი აქვს და სრულიად გარკვეული მეზობლები ჰყავს. ატომებისგან შექმნილი ნაგებობა — მოლეკულა შეიძლება მეტნაკლებად ხისტი იყოს. ყოველ შემთხვევაში, თვითეული ატომი ასრულებს რხევას თავისი წონასწორობის მდებარეობის მახლობლად. ხოლო ზოგიერთ შემთხვევებში მოლეკულის ცალკეულ ნაწილებს შეუძლია სხვა ნაწილების მიმართ ბრუნვა და თავისუფალი მოლეკულასთვის, მისი სითბური მოძრაობის პროცესში, სხვადასხვაგვარი და სრულიად უცნაური კონფიგურაციის მინიჭება.



ნახ. 86.

განვიხილოთ უფრო დაწვრილებით ატომების ურთიერთქმედება. ნახ. 86-ზე გამოსახულია ორატომიანი მოლეკულის პოტენციალური ენერგიის მრუდი. მას დამახასიათებელი სახე აქვს — ჯერ ქვევით ეშვება, შემდეგ იღუნება, წარმოშობს „ორმოს“ და ბოლოს, უფრო ნელა უახლოვდება ჰორიზონტალურ ღერძს, რომელზეც ატომებს შორის მანძილია გადაზომილი.

ჩვენ ვიცით, რომ მდგრადია მდგომარეობა, რომელშიც პოტენციალურ ენერგიას უმცირესი მნიშვნელობა აქვს. როდესაც ატომი მოლეკულის შემადგენლობაში შედის, ის „ზის“ პოტენციალურ ორმოში და წონასწორობის მდებარეობის მახლობლად მცირე სითბურ რხევებს ასრულებს.

ვერტიკალური ღერძიდან ორმოს ძირამდე მანძილს შეიძლება წონასწორული ვუწოდოთ. ამ მანძილზე მოთავსდე-

ბოდნენ ატომები, სითბური მოძრაობა რომ შეწყვეტილიყო.

პოტენციალური ენერგიის მრუდი გვაწვდის ცნობებს ატომებს შორის ურთიერთქმედების ყველა დეტალის შესახებ. მიიზიდებიან თუ განიზიდებიან ნაწილაკები ამა თუ იმ მანძილზე, იზრდება თუ მცირდება ურთიერთქმედების ძალა ნაწილაკების დაშორებისა თუ დაახლოებისას — ყველა ეს ცნობა შეიძლება მივიღოთ პოტენციალური ენერგიის მრუდის ანალიზის საშუალებით. წერტილები „ძირის" მარცხნივ განზიდვას შეესაბამებიან. პირიქით, მრუდის უბნები ორმოს ძირის მარჯვნივ მიზიდვას ახასიათებენ.

მნიშვნელოვან ცნობებს გვაწვდის აგრეთვე მრუდის დახრილობა: რაც უფრო მკვეთრად არის დახრილი მრუდი, მით მეტია ძალა.

ატომები დიდ მანძილზე იზიდავენ ერთმანეთს; ეს ძალა ძალიან სწრაფად მცირდება მათ შორის მანძილის გაზრდისას. დაახლოებისას მიზიდულობის ძალა იზრდება და მაქსიმალურ მნიშვნელობას აღწევს მაშინ, როცა ატომები ერთმანეთთან ძალიან ახლოს მივლენ. უფრო მეტი დაახლოებისას მიზიდულობა მცირდება და, ბოლოს, წონასწორულ მანძილზე ურთიერთქმედების ძალა ნულს უტოლდება. როცა ატომები წონასწორულ მანძილზე უფრო მეტად უახლოვდებიან ერთმანეთს, წარმოიშობა განზიდვის ძალები, რომლებიც ძალიან მკვეთრად იზრდებიან და მალე მანძილის შემდგომი შემცირება პრაქტიკულად შეუძლებელი ხდება.

ატომებს შორის წონასწორული მანძილები (ქვემოთ მოკლედ ვიტყვით ხოლმე — მანძილები) სხვადასხვა სახის ატომებისთვის სხვადასხვაა.

ატომების სხვადასხვა წყვილებისთვის განსხვავებულია არა მარტო ვერტიკალური ღერძიდან ორმოს ძირამდე მანძილი, არამედ ორმოს სიღრმეც.

ორმოს სიღრმეს უბრალო აზრი აქვს — ორმოდან ამოგდებისთვის საჭიროა სწორედ ორმოს სიღრმის ტოლი ენერგია. ამიტომ ორმოს სიღრმეს შეიძლება ნაწილაკების ბმის ენერგია ვუწოდოთ.

მოლეკულის ატომებს შორის მანძილები იმდენად მცირეა, რომ მათ გასაზომად საჭიროა შესაფერისი ერთეულების

შერჩევა, წინააღმდეგ შემთხვევაში მათი მნიშვნელობები, მაგალითად, ასეთი სახით უნდა გამოგვესახა: 0,000000012 სმ. ეს რიცხვი განკუთვნილია ჟანგბადის მოლეკულისთვის.

ატომური სამყაროს აღწერისთვის განსაკუთრებით მოხერხებულ ერთეულს ანგსტრემი ეწოდება (თუმცა, შვედი სწავლულის გვარი, რომლის მიხედვითაც ამ ერთეულების სახელწოდება შემოიღეს, სწორედ ონგსტრემად იკითხება; ამისათვის A ასოს თავზე პატარა რგოლს უკეთებენ).

$$1\mathring{A}=10^{-8}\text{ სმ},$$

ანუ სანტიმეტრის ერთ მეასმილიონედ ნაწილს.

მოლეკულების ატომებს შორის მანძილები მოთავსებულია შუალედში 1-დან 4-ანგსტრემამდე. ზემოთ დაწერილი წონასწორული მანძილი ჟანგბადისთვის 1,2 $\mathring{A}$ ტოლია.

ატომებს შორის მანძილები, როგორც ხედავთ, ძალიან მცირეა. თუ დედამიწას ეკვატორის გასწვრივ თოკს შემოვახვევთ, „ქამრის" სიგრძე იმდენჯერ მეტი იქნება თქვენი ხელისგულის სიგანეზე, რამდენჯერაც ხელისგულის სიგანე მოლეკულის ატომებს შორის მანძილს აღემატება.

ბმის ენერგიის გასაზომად, ჩვეულებრივად, კალორიებით სარგებლობენ, მაგრამ მათ იღებენ არა ერთი მოლეკულისთვის, რაც, ცხადია, უმნიშვნელო სიდიდეს მოგვცემდა, არამედ გრამ-მოლეკულისთვის, ე. ი. ფარდობითი მოლეკულური წონის ტოლი გრამების რიცხვისთვის.

ცხადია, თუ ბმის ენერგიას ერთი გრამ-მოლეკულისთვის გავყოფთ ავოგადროს რიცხვზე $N=6{,}023\cdot10^{23}$, მივიღებთ ბმის ენერგიას ერთი მოლეკულისთვის.

ატომების მოლეკულებში ბმის ენერგია, ისევე როგორც ატომებს შორის მანძილი, უმნიშვნელო ფარგლებში მერყეობს.

იგივე ჟანგბადისთვის ბმის ენერგია ტოლია 116.000 კალორიისა გრამ-მოლეკულაზე, წყალბადისთვის — 103.000 კალორიისა და ა. შ.

ჩვენ უკვე აღვნიშნეთ, რომ ატომები მოლეკულებში სრუ-

ლიად გარკვეული სახით განლაგდებიან ერთმანეთის მიმართ და ზოგ შემთხვევაში ძალიან რთულ ნაგებობებს ქმნიან.

მოვიყვანთ რამდენიმე უბრალო მაგალითს. CO_2 მოლეკულაში (ნახშირმჟავა გაზი) სამივე ატომი ერთ მწკრივად არის განლაგებული — შუაში ნახშირბადის ატომია. წყლის მოლეკულას H_2O კუთხოვანი ფორმა აქვს, კუთხის (იგი 105° ტოლია) წვეროს ჟანგბადის ატომი წარმოადგენს.

ამიაკის მოლეკულაში NH_3 აზოტის ატომი სამწახნაგა პირამიდის წვეროში იმყოფება; მეთანის CH_4 მოლეკულაში ნახშირბადის ატომი იმყოფება ოთხწახნაგა თანაბარგვერდებიანი ფიგურის ტეტრაედრის ცენტრში.

ბენზოლის C_6H_6 ნახშირბადის ატომები წესიერ ექვსკუთხედს ქმნიან. ნახშირბადის ატომების კავშირები წყალბადთან ექვსკუთხედის ყველა წვეროდან გამოდის. ყველა ატომი ერთ სიბრტყეშია განლაგებული.

ამ მოლეკულების ატომების ცენტრების განლაგების სქემები ნაჩვენებია 87-ე და 88-ე ნახატებზე. ხაზები კავშირის სიმბოლოს წარმოადგენენ.

ჩატარდა ქიმიური რეაქცია; გვქონდა ერთი სახის მოლეკულები, წარმოიშვა სხვა სახის მოლეკულები. ზოგი კავშირი დარღვეულია, სხვები ახლად არის წარმოშობილი. ატომებს შორის კავშირების დარღვევისათვის — მოიგონეთ ნახატი — ასეთივე მუშაობაა საჭირო, როგორიც ბურთულის ორმოდან ამოსაგდებად. პირიქით, ახალი კავშირების წარმოშობისას ენერგია გამოიყოფა — ბურთი ორმოში ჩაგორდება.

რა უფრო მეტია, გაწყვეტის მუშაობა თუ კავშირის შექმნისთვის საჭირო მუშაობა? ბუნებაში ჩვენ ორივე ტიპის რეაქციებს ვხვდებით.

ენერგიის ნაჭარბს ეწოდება სითბური ეფექტი, ან მოკლედ — გარდაქმნის (რეაქციის) სითბო. რეაქციის სითბური ეფექტები მოლზე გაანგარიშებისას მეტწილად რამდენიმე ათეული ათასი კალორიის რიგის სიდიდეებია. ძალიან ხშირად სითბურ ეფექტს შესაკრების სახით ჩაურთავენ ხოლმე რეაქციის ფორმულაში.

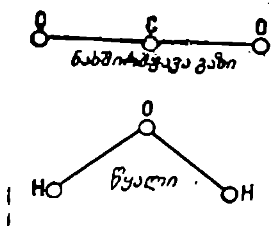
მაგალითად, გრაფიტის სახის ნახშირბადის წვის რეაქცია, ანუ მისი ჟანგბადთან შეერთების რეაქცია, ასე იწერება:

$$C + O_2 = CO_2 + 94250 \text{ კალ.}$$

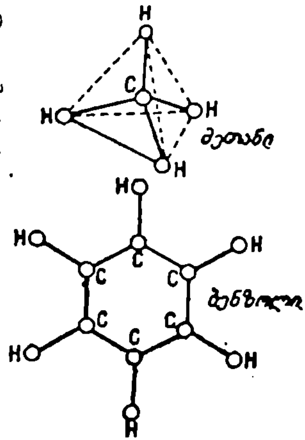
ეს იმას ნიშნავს, რომ C-ს O_2-თან შეერთებისას გამოიყოფა 94.250 კალორია ენერგია.

გრაფიტის სახის გრამატომი ნახშირბადისა და გრამ-მოლეკულა ჟანგბადის შინაგანი ენერგიების ჯამი ტოლია გრამ-მოლეკულა ნახშირმჟავა გაზის შინაგანი ენერგიის პლუს 94.250 კალორია.

ამრიგად, ასეთ ჩანაწერებს აქვთ შინაგანი ენერგიების სიდიდეებისთვის დაწერილი ალგებრული ტოლობების გარკვეული აზრი



ნახ. 87.



ნახ. 88.

ასეთი განტოლებების დახმარებით შეიძლება ვიპოვოთ გარდაქმნათა სითბური ეფექტები, რომელთათვისაც ამა თუ იმ მიზეზების გამო გაზომვის პირდაპირი ხერხები არ გამოდგება. მაგალითად, ნახშირბადი (გრაფიტი) წყალბადს რომ შევუერთოთ, წარმოიშობა აცეტილენის გაზი:

$$2C + H_2 = C_2H_2.$$

რეაქცია არ მიდის ასეთი გზით. მიუხედავად ამისა, შეიძლება ვიპოვოთ მისი სითბური ეფექტი. დავწეროთ სამი ცნობილი რეაქცია —

ნახშირბადის დაჟანგვა:

$$2C+2O_2=2CO_2+188\,000.$$

წყალბადის დაჟანგვა:

$$H_2+\frac{1}{2}O_2=H_2O+68\,000,$$

აცეტილენის დაჟანგვა:

$$C_2H_2+\frac{5}{2}O_2=2CO_2+H_2O+312\,000.$$

ყველა ეს ტოლობა შეიძლება განვიხილოთ როგორც განტოლებები მოლეკულების ბმის ენერგიებისთვის. რადგან ასეა, ამ განტოლებებით შეიძლება ვისარგებლოთ როგორც ალგებრული ტოლობებით. უკანასკნელიდან პირველი ორის გამოკლებით მივიღებთ:

$$2C+H_2=C_2H_2-56\,000.$$

მაშასადამე, ჩვენთვის საინტერესო გარდაქმნას თან ახლავს გრამ-მოლეკულაზე 56.000 კალორიის შთანთქმა.

მოლეკულების ურთიერთქმედება

მოლეკულები ერთმანეთს იზიდავენ, ამაში დაეჭვება შეუძლებელია. რომელიმე მომენტში მოლეკულებმა ერთმანეთის მიზიდვა რომ შეწყვიტონ, ყველა თხევადი და მყარი სხეული მოლეკულებად დაიშლებოდა.

მოლეკულები ერთმანეთს განიზიდავენ, ესეც უდავოა, რადგანაც სხვაგვარად სითხეები და მყარი სხეულები არაჩვეულებრივად ადვილად შეიკუმშებოდნენ.

მოლეკულებს შორის მოქმედებს ძალები, რომლებიც ბევრ რამეში ჰგვანან ატომებს შორის მოქმედ ზემოთ ნახსენებ ძალებს. ატომებისთვის ახლახან დახაზული პოტენციალური ენერგიის მრუდი სწორად გადმოგვცემს მოლეკულების ურთიერთქმედების ძირითად ნიშნებს. მაგრამ ამ ურთიერთქმედებებს შორის არსებითი განსხვავებაც არის.

შევადაროთ, მაგალითად, ერთმანეთს წონასწორული მანძილი მოლეკულის წარმომქმნელ ჟანგბადის ატომებსა და იმ მეზობელი მოლეკულების ჟანგბადის ატომებს შორის, რომლებიც წონასწორულ მდებარეობამდე არიან დაახლოებული გამყარებულ ჟანგბადში. განსხვავება ძალიან მნიშვნელოვანი იქნება: მოლეკულის შემქმნელი ჟანგბადის ატომები ერთმანეთისგან 1,2 Å მანძილზე განლაგდებიან, სხვადასხვა მოლეკულის ჟანგბადის ატომები ერთმანეთს 2,9 Å-ით უახლოვდებიან.

მსგავს შედეგს მივიღებთ სხვა ატომებისთვისაც. სხვადასხვა მოლეკულების ატომები ერთმანეთისგან უფრო შორს განლაგდებიან, ვიდრე ერთი მოლეკულის ატომები. ამიტომაც მოლეკულების დაშორება ერთმანეთისგან უფრო ადვილია, ვიდრე ატომისა მოლეკულისგან.

ამასთან, ენერგიებში განსხვავება ბევრად აღემატება მანძილებს შორის განსხვავებას. თუ მოლეკულების წარმომქმნელ ჟანგბადის ატომებს შორის კავშირის გაწყვეტისთვის საჭირო ენერგია შეადგენს 100 კკალ/მოლ, ჟანგბადის მოლეკულების ერთმანეთისგან დასაშორებლად საჭირო ენერგია 1 კკალ/მოლ-ზე ნაკლებია.

მაშასადამე, მოლეკულის პოტენციალური ენერგიის მრუდზე „ორმო" უფრო შორს არის ვერტიკალური ღერძიდან და, გარდა ამისა, „ორმოს" სიღრმე გაცილებით ნაკლებია.

მაგრამ ამით არ ამოიწურება განსხვავება მოლეკულების წარმომქმნელი ატომების ურთიერთქმედებასა და მოლეკულების ურთიერთქმედებას შორის.

ქიმიკოსებმა დაგვანახეს, რომ ატომები მოლეკულაში სხვა ატომების სრულიად განსაზღვრულ რიცხვს უკავშირდებიან. თუ წყალბადის ორმა ატომმა მოლეკულა წარმოშვა, მაშინ მესამე ატომი ამ მიზნით მათ უკვე აღარ შეუერთდება. ჟანგბადის ატომი წყალში დაკავშირებულია წყალბადის ორ ატომთან და მათთან კიდევ ერთის მიერთება შეუძლებელია.

ვერაფერს ამის მსგავსს ვერ ვხედავთ მოლეკულათა შორის ურთიერთმოქმედებაში. ერთი მეზობლის მიზიდვის შემდეგ მოლეკულა სრულიადაც არ კარგავს თავის „მიზიდუ-

ლობით ძალას“. მეზობლების შემოკრება მანამდე გრძელდება, ვიდრე ადგილი იქნება საკმარისი.

რას ნიშნავს „ადგილი იქნება საკმარისი“? განა მოლეკულები ვაშლის ან კვერცხისმაგვარი რამ არის? რასაკვირველია, გარკვეული აზრით ასეთი შედარება გამართლებულია: მოლეკულები ფიზიკური სხეულებია, რომლებსაც გარკვეული „ზომა“ და „ფორმა“ აქვთ. მოლეკულებს შორის წონასწორული მანძილია სწორედ მოლეკულის „ზომა“.

რა სახე აქვს სითბურ მოძრაობას

მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედებას მათ „ცხოვრებაში“ მეტ-ნაკლები მნიშვნელობა აქვს.

ნივთიერების სამი მდგომარეობა — გაზოვანი, თხევადი და მყარი — ერთმანეთისაგან სწორედ მოლეკულების ურთიერთქმედების გამო განსხვავდება.

სიტყვა „გაზი“ მეცნიერებმა გამოიგონეს. იგი ბერძნული სიტყვა „ქაოს“-იდან მოდის, რაც მოუწესრიგებლობას ნიშნავს.

მართლაც, ნივთიერების გაზოვანი მდგომარეობა წარმოადგენს ბუნებაში არსებული სრული, აბსოლუტური მოუწესრიგებლობის მაგალითს ნაწილაკების ურთიერთგანლაგებასა და მოძრაობაში. არ არსებობს ისეთი მიკროსკოპი, რომელიც გაზის მოლეკულების მოძრაობას დაგვანახებდა, მაგრამ, მიუხედავად ამისა, ფიზიკოსებს საკმარისად დეტალურად შეუძლიათ ამ უხილავი სამყაროს ცხოვრების აღწერა.

ჰაერის კუბურ სანტიმეტრში ნორმალურ პირობებში (ოთახის ტემპერატურა და ატმოსფერული წნევა) არის მოლეკულების უზარმაზარი რიცხვი, დახლოებით $2{,}5 \cdot 10^{19}$ (ე. ი. 25 მილიარდი მილიარდი მოლეკულა). თვითეულ მოლეკულას უჭირავს $4 \cdot 10^{-20}$ სმ^3 მოცულობა, ე. ი. კუბი, რომლის წიბო დაახლოებით $3{,}5 \cdot 10^{-7}$ სმ$=35$ Å. მაგრამ მოლეკულები ძალზე პატარებია. მაგალითად, ჰაერის ძირითადი შემადგენელი ნაწილის ჟანგბადისა და აზოტის მოლეკულების საშუალო ზომა დაახლოებით $4 A$.

ამრიგად, მოლეკულებს შორის საშუალო მანძილი 10-ჯერ მეტია მოლეკულების ზომაზე. ეს კი, თავის მხრივ, იმას ნიშნავს, რომ საშუალო მოცულობა ჰაერისა, რომელზეც ერთი მოლეკულა მოდის, დაახლოებით 1000-ჯერ მეტია თვითონ მოლეკულის მოცულობაზე.

წარმოიდგინეთ სწორი მოედანი და ზედ უწესრიგოდ მობნეული ლითონის ფულები, თანაც ისე, რომ 1 $მ^2$ ფართზე საშუალოდ ასი ფული მოდიოდეს. ეს იმას ნიშნავს, რომ იმ წიგნის ფურცელზე, რომელსაც თქვენ კითხულობთ, ერთი-ორი ფული იდოს, დაახლოებით ასეთივე სიხშირით არიან განლაგებული გაზის მოლეკულები.

გაზის ყოველი მოლეკულა განუწყვეტელი სითბური მოძრაობის მდგომარეობაშია.

თვალი გავადევნოთ ერთ მოლეკულას. აგერ ის სწრაფად მიეშურება სადღაც მარჯვნივ. გზაზე დაბრკოლებები რომ არ შეხვდეს, მოლეკულა იმავე სიჩქარით განაგრძობს თავის მოძრაობას სწორი ხაზის გასწვრივ. მაგრამ მოლეკულის გზას მისი ურიცხვი მეზობლები გადაჰკვეთენ. დაჯახება გარდუვალია, და მოლეკულებიც გაიბნევიან, როგორც ბილიარდის ორი ბურთი დაჯახების შემდეგ. რა მიმართულებით გაიტყორცნება ჩვენი მოლეკულა? შეიძენს თუ დაკარგავს ის სიჩქარეს? ყველაფერი შესაძლებელია: ვინ იცის, რა ელის წინ. დაჯახება შესაძლებელია წინიდანაც და უკნიდანაც, მარჯვნიდანაც და მარცხნიდანაც, სუსტიც და ძლიერიც. ცხადია, ასეთი მოუწესრიგებელი დაჯახების შედეგად ამ შემთხვევითი შეხვედრებისას მოლეკულა, რომელსაც ჩვენ ვაკვირდებით, ჰურჭლის ყველა მხარეს მიაწყდება.

რა გზის გავლას ახერხებენ გაზის მოლეკულები დაჯახების გარეშე?

ეს დამოკიდებულია მოლეკულების ზომასა და გაზის სიმკვრივეზე. რაც უფრო დიდია მოლეკულები და რაც უფრო მეტია მათი რიცხვი ჰურჭელში, მით უფრო ხშირად ეჯახებიან ისინი ერთმანეთს. დაჯახების გარეშე მოლეკულის მიერ გავლილი გზის სიგრძე — მას განარბენის საშუალო სიგრძე ეწოდება — ჩვეულებრივ პირობებში წყალბადის მოლე-

კულებისთვის 11 · 10^{-6} სმ = 1 100 Å უდრის და ჟანგბადის მოლეკულებისთვის $5 \cdot 10^{-6}$ სმ = 500 Å. $5 \cdot 10^{-6}$ სმ მილიმეტრის მეოციათასედი ნაწილია, ეს ძალიან მცირე მანძილია, მაგრამ მოლეკულების ზომასთან შედარებით იგი სულაც არ არის მცირე. ჟანგბადის მოლეკულის $5 \cdot 10^{-6}$ სმ განარბენი მასშტაბში იგივეა, რაც ბილიარდის ბურთის 10 მეტრზე გაგორება.

სითხის აგებულება არსებითად განსხვავდება გაზის აღნაგობისაგან, გაზის მოლეკულები შორი-შორს არიან და მხოლოდ იშვიათად ეჯახებიან ერთმანეთს. სითხეებში მოლეკულები ერთმანეთთან უშუალო სიახლოვეში იმყოფებიან. სითხის მოლეკულები ისე არიან განლაგებული, გეგონება ტომარაში კარტოფილი ყრიაო. თუმცა ერთი განსხვავებაც არის, ისინი განუწყვეტელი ქაოსური სითბური მოძრაობის მდგომარეობაში იმყოფებიან. დიდი სივიწროვის გამო სითხის მოლეკულებს არ შეუძლიათ ისე თავისუფლად გადაადგილება, როგორც გაზის მოლეკულებს. თვითეული მოლეკულა თითქმის სულ ერთსა და იმავე ადგილზე „იტკეპნება“ ერთი და იმავე მეზობლების გარემოცვაში და მხოლოდ ნელ-ნელა გადაადგილდება სითხის მიერ დაკავებულ მოცულობაში. რაც უფრო ბლანტია სითხე, მით უფრო ნელია ეს გადაადგილება. მაგრამ ისეთ „მოძრავ“ სითხეშიც კი, როგორიც წყალია, ვიდრე მოლეკულა 3 Å-ზე გადაადგილდება, გაზის მოლეკულა 700 Å გაირბენს.

მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძალები გადაჭრით უსწორებენ ანგარიშს მათ სითბურ მოძრაობას მყარ სხეულებში. მყარ სხეულებში მოლეკულები პრაქტიკულად ყოველთვის უცვლელ მდებარეობაში იმყოფებიან. სითბური მოძრაობა მხოლოდ იმით მჟღავნდება, რომ მოლეკულები განუწყვეტლივ ირხევიან წონასწორობის მდებარეობის მახლობლად. მოლეკულების სისტემატური გადაადგილების არარსებობაა სწორედ იმის მიზეზი, რასაც ჩვენ სიმაგრეს ვუწოდებთ. მართლაც, თუ მოლეკულები არ იცვლიან მეზობლებს, მით უფრო დარჩებიან ერთმანეთთან უცვლელ კავშირში სხეულის ცალკეული ნაწილები.

სხეულების კუმშვადობა

გაზის მოლეკულები ისე ეჯახებიან ჭურჭლის კედლებს, როგორც წვიმის წვეთები უკაკუნებენ ხოლმე სახურავს. ამ დაჯახებების რიცხვი უზარმაზარია და ერთად შერწყმული მათი მოქმედება ქმნის წნევას, რომელსაც შეუძლია აამოძრაოს ძრავის დგუში, გახეთქოს ყუმბარა ან გაბეროს საჰაერო ბურთი. მოლეკულების ეს სეტყვა არის ატმოსფეროს წნევა, ეს არის წნევა, რომელიც იწვევს ჩაიდანის ხუფის ხტომას დუღილის დროს, ეს არის ძალა, რომელიც იწვევს შაშხანიდან ტყვიის გამოტყორცნას.

რასთან არის დაკავშირებული გაზის წნევა? აშკარაა, წნევა მით მეტი იქნება, რაც უფრო ძლიერია ცალკეული მოლეკულის დარტყმა. არანაკლებ აშკარაა, რომ წნევა დამოკიდებულია დარტყმათა რიცხვზე წამში. რაც მეტი მოლეკულაა ჭურჭელში, მით უფრო ხშირია დარტყმაც, მით მეტია წნევა. მაშასადამე, პირველ ყოვლისა, მოცემული გაზის p წნევა მისი სიმკვრივის პროპორციულია.

თუ გაზის მასა უცვლელია, მაშინ მოცულობის შეცვლით ჩვენ სათანადო რიცხვით ვზრდით სიმკვრივეს. ამრიგად, გაზის წნევა ასეთ დახურულ ჭურჭელში მოცულობის უკუპროპორციული იქნება. ან, სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, წნევის ნამრავლი მოცულობაზე უცვლელი უნდა იყოს:

$$pV = \text{const.}$$

ეს მარტივი კანონი აღმოაჩინეს ინგლისელმა ფიზიკოსმა ბოილმა და ფრანგმა მეცნიერმა მარიოტმა. ბოილ-მარიოტის კანონი ერთ-ერთი პირველი რაოდენობრივ კანონთაგანია ფიზიკური მეცნიერების ისტორიაში. რასაკვირველია, იგი მხოლოდ მუდმივი ტემპერატურის დროს სრულდება.

გაზის შეკუმშვისას ბოილ-მარიოტის კანონი სულ უფრო და უფრო ცუდად სრულდება. მოლეკულები ერთმანეთს უახლოვდება და მათ შორის ურთიერთქმედება გავლენას ახდენს გაზის ქცევაზე.

ბოილ-მარიოტის კანონი სამართლიანია იმ შემთხვევებში, როდესაც ურთიერთქმედების ძალების ჩარევა მოლეკულების

ყოფაში სრულიად შეუმჩნეველია. ამიტომ ბოილ-მარიოტის კანონზე ამბობენ, იდეალური გაზების კანონიაო.

ზედსართავი სახელი „იდეალური“ სიტყვა „გაზის“ მიმართ ცოტა არ იყოს, უცნაურად ჟღერს... იდეალური ხომ სრულყოფილს ნიშნავს.

რაც უფრო მარტივია მოდელი ან სქემა, მით უფრო იდეალურია ის ფიზიკოსისთვის. მარტივდება გამოთვლა, ადვილდება ფიზიკური მოვლენების ახსნა. ტერმინი „იდეალური გაზი“ აღნიშნავს გაზის უმარტივეს სქემას. საკმარისად გაიშვიათებული გაზების ქცევა პრაქტიკულად არ განირჩევა იდეალური გაზების ქცევისაგან.

სითხეების კუმშვადობა გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე გაზების კუმშვადობა. სითხეში მოლეკულები უკვე „ეხებიან“ ერთმანეთს. შეკუმშვა აქ გამოიხატება მხოლოდ მოლეკულების „წყობის“ გაუმჯობესებით, ხოლო ძალიან დიდი წნევებისას — თვით მოლეკულის დაწნეხვით. თუ როგორ აძნელებენ განზიდვის ძალები სითხის შეკუმშვას, შემდეგი რიცხვებიდან ჩანს. წნევის გაზრდა ერთიდან ორ ატმოსფერომდე იწვევს გაზის მოცულობის შემცირებას ორჯერ, იმ დროს, როცა წყლის მოცულობა იცვლება 1/20 000-ით, ხოლო ვერცხლისწყლისა — სულ 1/250 000-ით.

უზარმაზარი წნევაც კი ვერ კუმშავს ოკეანის სიღრმეში წყალს რამდენადმე შესამჩნევად. მართლაც, ერთ ატმოსფერო წნევას ქმნის ათმეტრიანი წყლის სვეტი. წყლის 10-კილომეტრიანი ფენის ქვეშ წნევა 1000 ატმოსფეროს ტოლია. წყლის მოცულობა მცირდება 1000/20 000, ანუ 1/20 ნაწილით.

მყარი სხეულის კუმშვადობა მცირედ განსხვავდება სითხეების კუმშვადობისაგან. ეს გასაგებიც არის — ორივე შემთხვევაში მოლეკულები უკვე ეხებიან ერთმანეთს და შეკუმშვა შეიძლება მხოლოდ ძლიერად ურთიერთგანმზიდავი მოლეკულების შემდგომი დაახლოების ხარჯზე განხორციელდეს. ზემაღალი, 50—100 ათასი ატმოსფეროს ტოლი წნევით ხერხდება ფოლადის შეკუმშვა მოცულობის 1/1000 ნაწილით, ტყვიისა — 1/7 ნაწილით.

ამ მაგალითებიდან ჩანს, რომ დედამიწის პირობებში არ ხერხდება მყარი სხეულის რამდენადმე მნიშვნელოვნად შეკუმშვა.

მაგრამ სამყაროში არის სხეულები, რომლებშიაც ნივთიერება შეუდარებლად უფრო ძლიერად არის შეკუმშული. ასტრონომებმა აღმოაჩინეს ვარსკვლავები, რომლებშიაც ნივთიერების სიმკვრივე 10^6 გ/სმ^3 აღწევს. ამიტომ ამ ვარსკვლავებს შიგნით უზარმაზარი წნევა უნდა იყოს. მათ თეთრ ჯუჯა ვარსკვლავებს უწოდებენ („თეთრს" — ნათების ხასიათის მიხედვით, „ჯუჯას" — შედარებით მცირე ზომის გამო).

წნევის ცვლილება სიმაღლის მიხედვით

სიმაღლის მატებასთან ერთად წნევა ეცემა. პირველად ეს 1648 წ. გამოარკვია ფრანგმა პერიემ პასკალის დავალებით. მთა პიუ დე დომი, რომლის მახლობლადაც პერიე ცხოვრობდა, 975 მ სიმაღლის იყო. გაზომვების შედეგად აღმოჩნდა, რომ ვერცხლისწყალი ტორიჩელის მილში მთაზე ასვლისას 8 მმ-ით ეცემოდა.

სავსებით ბუნებრივია ჰაერის წნევის დაცემა სიმაღლის ზრდასთან ერთად. ზემოთ ხელსაწყოს ხომ უკვე ჰაერის უფრო მცირე სვეტი აწვება.

თუ თვითმფრინავით გიფრენიათ, შეამჩნევდით კაბინის წინა კედელზე მოთავსებულ ხელსაწყოს, იგი რამდენიმე ათეული მეტრის სიზუსტით აჩვენებს თვითმფრინავის ფრენის სიმაღლეს. ეს ხელსაწყო ჩვეულებრივი ბარომეტრია, ოღონდ ზედ ზღვის დონიდან სიმაღლის მნიშვნელობებია აღნიშნული.

სიმაღლის ზრდასთან ერთად წნევა ეცემა, ვიპოვოთ ამ დამოკიდებულების ფორმულა. გამოვყოთ h_1 და h_2 სიმაღლეებს შორის მოთავსებული ჰაერის მცირე ფენა, რომლის ფართია 1 სმ^2. თუ ფენა ძალიან დიდი არ არის, სიმაღლის მიხედვით სიმკვრივის მცირე ცვლილება შეიმჩნევა. ამიტომ გამოყოფილი მოცულობის (ეს არის მცირე ცილინდრი, რომლის სიმაღლეა $h_2—h_1$, ხოლო ფუძის ფართი 1 სმ^2) ჰაერის

წონა იქნება $mg=\varrho(h_2-h_1)g$. სწორედ ეს წონა იძლევა წნევის დაცემას h_1 სიმაღლიდან h_2 სიმაღლეზე ასვლისას, ანუ

$$\frac{p_1-p_2}{\varrho}=g(h_2-h_1).$$

მაგრამ ბოილ-მარიოტის კანონის მიხედვით გაზის სიმკვრივე წნევის პროპორციულია. ამიტომ

$$\frac{p_1-p_2}{p}\backsim(h_2-h_1).$$

მარცხნივ არის ნაწილი, რომლითაც გაიზარდა წნევა h_2 სიმაღლიდან h_1 სიმაღლეზე ჩამოსვლისას. მაშასადამე, სიმაღლის ერთნაირ h_2-h_1 შემცირებას შეესაბამება წნევის მატება ერთი და იმავე პროცენტით.

გაზომვა და გამოთვლა სრული თანხვდენით გვიჩვენებს, რომ ზღვის დონიდან ყოველი კილომეტრით ზევით ასვლისას წნევა 0,1 ნაწილით მცირდება. ასევეა ღრმა შახტებში ჩაშვებისას ზღვის დონის ქვევით — ყოველ კილომეტრზე წნევა 0,1 ნაწილით იზრდება.

აქ ლაპარაკია წინა სიმაღლეზე არსებული მნიშვნელობის 0,1 ნაწილით შეცვლის შესახებ. ეს ნიშნავს, რომ ერთი კილომეტრით მაღლა ასვლის შედეგად წნევა შემცირდება ზღვის დონეზე წნევის მნიშვნელობის 0,9-მდე, შემდეგი კილომეტრით ზევით ასვლის შედეგად იგი ტოლი გახდება ზღვის დონეზე წნევის მნიშვნელობის 0,9-ის 0,9-ისა; სამი კილომეტრის სიმაღლეზე წნევა ტოლი იქნება ზღვის დონეზე წნევის მნიშვნელობის 0,9-ის 0,9-ის 0,9-ისა, ანუ ზღვის დონეზე წნევის $(0,9)^3$-ისა. ძნელი არ არის ამ მსჯელობის შემდგომი განგრძობა.

თუ ზღვის დონეზე წნევას P_0 ავღნიშნავთ, მაშინ h სიმაღლეზე (რომელიც კილომეტრებში უნდა იყოს გამოხატული) წნევა ასე შეიძლება გამოვსახოთ:

$$p=p_0(0,87)^h=p_0\cdot 10^{-0{,}06h}.$$

ფრჩხილებში უფრო ზუსტი რიცხვი წერია: 0,9 დამრგვალებული მნიშვნელობაა. ფორმულა გულისხმობს, რომ ტემპერა-

ტურა ყველა სიმაღლეზე ერთნაირია. სინამდვილეში კი ატმოსფეროს ტემპერატურა სიმაღლის მიხედვით იცვლება და ამასთან საკმაოდ რთულ კანონსაც ექვემდებარება. მიუხედავად ამისა ფორმულა საკმაოდ კარგ შედეგს იძლევა და ასი კილომეტრის სიმაღლემდე ამ ფორმულით სარგებლობა შეიძლება.

ძნელი არ არის ამ ფორმულის დახმარებით განვსაზღვროთ, რომ იალბუზის სიმაღლეზე — დაახლოებით, 5,6 კმ — წნევა თითქმის ორჯერ შემცირდება, ხოლო 22 კმ-ზე (ადამიანის სტრატოსტატით ასვლის რეკორდული სიმაღლე) წნევა 50 მმ Hg-მდე დაეცემა.

როდესაც ვამბობთ, რომ 760 მმ Hg წნევა ნორმალურია, არ უნდა დაგვავიწყდეს დავამატოთ: „ზღვის დონეზე“. 5,6 კმ სიმაღლეზე ნორმალური წნევა იქნება არა 760, არამედ 380 მმ Hg.

ამავე კანონით წნევასთან ერთად სიმაღლის ზრდისას ჰაერის სიმკვრივეც კლებულობს. 160 კმ სიმაღლეზე ჰაერი უკვე ცოტა რჩება.

მართლაც,

$$(0{,}87)^{160} = 10^{-10}$$

დედამიწის ზედაპირთან ჰაერის სიმკვრივე დაახლოებით 1000 გ/მ^3 ტოლია, ე. ი. 160 კმ სიმაღლეზე ერთ კუბურ მეტრზე ჩვენი ფორმულის მიხედვით უნდა მოდიოდეს 10^{-7} გ ჰაერი. სინამდვილეში კი, როგორც რაკეტებით გაზომვის შედეგად გამოირკვა, ჰაერის სიმკვრივე ამ სიმაღლეზე დაახლოებით ათჯერ მეტია.

ჭეშმარიტ მნიშვნელობებთან შედარებით კიდევ უფრო მეტად შემცირებულ მნიშვნელობებს იძლევა ჩვენი ფორმულა რამდენიმე ასეული კილომეტრის ტოლი სიმაღლეებისთვის. დიდ სიმაღლეზე ფორმულის უვარგისობას იწვევს ტემპერატურის ცვლილება სიმაღლის მიხედვით და ერთი განსაკუთრებული მოვლენა — ჰაერის მოლეკულების დაშლა მზის გამოსხივების გავლენით. აქ ჩვენ ამაზე არ შევჩერდებით.

ვაკუუმი

ტექნიკური თვალსაზრისით ცარიელი ჭურჭელი მოლეკულების ჯერ კიდევ უამრავ რაოდენობას შეიცავს.

ბევრ ფიზიკურ ხელსაწყოში გაზის მოლეკულები არსებით დაბრკოლებას წარმოადგენენ. რადიომილაკებს, რენტგენის მილაკებს, ელემენტარული ნაწილაკების ამჩქარებლებს — ყველა ამ ხელსაწყოს ვაკუუმი[1], ე. ი. გაზის მოლეკულებისაგან თავისუფალი სივრცე ესაჭიროება. ვაკუუმი ჩვეულებრივ ელექტრონათურაშიც უნდა იყოს. თუ ნათურაში ჰაერი დარჩა, ნათურის ძაფი დაიჟანგება და მაშინვე გადაიწვება.

საუკეთესო ვაკუუმის ხელსაწყოებში არის 10^{-8} მმ Hg რიგის ვაკუუმი. თითქოს სრულიად უმნიშვნელო წნევაა: წნევის ასეთი სიდიდით შეცვლისას ვერცხლისწყლის სვეტი მილიმეტრის მეასმილიონედი ნაწილით გადაინაცვლებდა მანომეტრში.

მაგრამ ამ უმნიშვნელო წნევისას 1 სმ^3-ში ჯერ კიდევ არის რამდენიმე ასეული მილიონი მოლეკულა.

საინტერესოა ასეთ ვაკუუმს შევადაროთ ვარსკვლავთშორისი სივრცის ვაკუუმი — იქ რამდენიმე კუბურ სანტიმეტრზე საშუალოდ ნივთიერების ერთი ელემენტარული ნაწილაკი მოდის.

ვაკუუმის მისაღებად სპეციალურ ტუმბოებს იყენებენ. ჩვეულებრივ ტუმბოს, რომელსაც დგუშის მოძრაობით გამოჰყავს ჭურჭლიდან გაზი, შეუძლია შექმნას ვაკუუმი არა უმეტეს 0,01 მმ Hg. კარგ, ან, როგორც ამბობენ, მაღალ ვაკუუმს იღებენ ეგრეთ წოდებული დიფუზიური ტუმბოების საშუალებით. ისინი ვერცხლისწყლით ან ზეთით მუშაობენ და გაზის მოლეკულები ვერცხლისწყლის ან ზეთის ორთქლის ნაკადით გამოჰყავთ.

ვერცხლისწყლიანი ტუმბოები, რომლებიც მათი გამომგონებლის ლენგმიურის სახელს ატარებენ, მუშაობას იწყებენ

---

[1] სიტყვა „ვაკუუმი" ლათინურია; „vacuum" ქართულად სიცარიელეს ნიშნავს.

მხოლოდ 0,1 მმ Hg წნევამდე წინასწარი ამოტუმბვის შემდეგ; ასეთ წინასწარ გაიშვიათებას ფორვაკუუმი ეწოდება.

მოქმედების პრინციპი შემდეგია: მინის მცირე მოცულობა უერთდება ვერცხლისწყლიან ჭურჭელს, ამოსატუმბავ სივრცეს და ფორვაკუუმის ტუმბოს. ვერცხლისწყალი თბება და ფორვაკუუმის ტუმბოს მიაქვს მისი ორთქლი. გზადაგზა ვერცხლისწყლის ორთქლს თან მიაქვს გაზის მოლეკულები და მათ ფორვაკუუმის ტუმბოსთან მიიყვანს. ვერცხლისწყლის ატომები სითხედ კონდენსირდება (გათვალისწინებულია გამდინარი წყლით გაცივება) და იმავე ჭურჭელში ჩაედინება, საიდანაც ვერცხლისწყალმა დაიწყო მოგზაურობა.

ლაბორატორიულ პირობებში მიღებული ვაკუუმი, როგორც ზემოთ იყო ნათქვამი, ჯერ კიდევ არ არის სიცარიელე სიტყვის აბსოლუტური მნიშვნელობით. ვაკუუმი ძლიერ გაიშვიათებული გაზია. ამ გაზის თვისებები შეიძლება არსებითად განსხვავდებოდეს ჩვეულებრივი გაზის თვისებებისგან.

„ვაკუუმის შემქმნელი“ მოლეკულების მოძრაობა ხასიათს იცვლის, როდესაც მოლეკულის თავისუფალი განარბენის სიგრძე იმ ჭურჭლის ზომას აღემატება, რომელშიც გაზია მოთავსებული. მაშინ მოლეკულები იშვიათად ეჯახებიან ერთმანეთს, სწორი ზიგზაგებით მოგზაურობენ და ჭურჭლის ხან ერთ, ხან მეორე კედელს ეჯახებიან.

გამოვითვალოთ, როგორი წნევის პირობებში მივიღებთ ასეთ სურათს. ზემოთ ნათქვამი იყო, რომ ჰაერში ატმოსფერული წნევისას განარბენის სიგრძე $5 \cdot 10^{-6}$ სმ ტოლია. თუ მას 10^{7}-ჯერ გავზრდით, მაშინ იგი 50 სმ შეადგენს, ე. ი. შესამჩნევად გადაამეტებს საშუალო სიდიდის ჭურჭლის ზომას. რამდენადაც განარბენის სიგრძე სიმკვრივისა და, მაშასადამე, წნევის უკუპროპორციულია, ამიტომ წნევამ ამისთვის ატმოსფერულის 10^{-7} ნაწილი ან, დაახლოებით, 10^{-4} მმ Hg უნდა შეადგინოს.

პლანეტათშორისი სივრცეც კი არ არის მთლად ცარიელი. მაგრამ ნივთიერების სიმკვრივე იქ $5 \cdot 10^{-24}$ გ/სმ^3 შეადგენს. პლანეტათშორისი ნივთიერების ძირითადი ნაწილი ატომური წყალბადია. ამჟამად ითვლება, რომ კოსმოსში 1 სმ^3-ზე წყალბადის რამდენიმე ატომი მოდის. მოლეკულა რომ მუხუდოს

მარცვლის ზომამდე გავადიდოთ, და შემდეგ იგი მოსკოვში მოვათავსოთ, მისი უახლოესი „კოსმოსური მეზობელი“ ტულაში აღმოჩნდება.

კრისტალები

ბევრს ჰგონია, რომ კრისტალები ლამაზი, იშვიათი ქვებია. მათ სხვადასხვა ფერი აქვთ, ჩვეულებრივ, გამჭვირვალენი არიან და, რაც ყველაზე შესანიშნავია, ლამაზი სწორი ფორმა აქვთ. უფრო ხშირად კრისტალები მრავალწახნაგებს წარმოადგენენ, მათი გვერდები (წახნაგები) იდეალურად ბრტყელია, წიბოები — მკაცრად სწორხაზოვანი. ისინი თვალს ახარებენ წახნაგებში სინათლის საუცხოო თამაშით, აგებულების საოცარი სისწორით.

მათ შორის არის ქვამარილის — ბუნებრივი ქლოროვანი ნატრიუმის, ანუ ჩვეულებრივი სუფრის მარილის უბრალო კრისტალები. ბუნებაში ისინი სწორკუთხა პარალელეპიპედებისა და კუბების სახით გვხვდება. კალციტის კრისტალებიც მარტივი ფორმისაა — გამჭვირვალე ირიბკუთხა პარალელეპიპედებია. გაცილებით რთულია კვარცის კრისტალები. თვითეულ მცირე კრისტალს სხვადასხვა ფორმის მრავალი წახნაგი აქვს, რომლებიც სხვადასხვა სიგრძის წიბოებზე იკვეთებიან.

მაგრამ კრისტალები სულაც არ წარმოადგენენ სამუზეუმო იშვიათობას. კრისტალები ჩვენ ირგვლივ ყველგან არის. მყარი სხეულები, რომლებისგანაც ვაშენებთ სახლებსა და დაზგებს, ნივთიერებები, რომლებსაც ყოფაცხოვრებაში ვხმარობთ, თითქმის უკლებლივ კრისტალებს მიეკუთვნება. მაშ რატომ არ ვხედავთ ჩვენ ამას? საქმე ისაა, რომ ბუნებაში იშვიათად გვხვდება სხეულები ცალკეული კრისტალების (ან, როგორც ამბობენ, მონოკრისტალების) სახით. უფრო ხშირად ნივთიერებები მყარად შეწებებული კრისტალური მარცვლებია, რომელთა ზომები მილიმეტრის მეთასედ ნაწილზე ნაკლებია. ასეთი სტრუქტურის დანახვა კი მხოლოდ მიკროსკოპში შეიძლება.

კრისტალური მარცვლებისგან შემდგარ სხეულებს წვრილ-კრისტალურს ანუ პოლიკრისტალურს უწოდებენ („პოლი" ბერძნულად „მრავალს" ნიშნავს).

რასაკვირველია, კრისტალებს წვრილკრისტალური სხეულებიც უნდა მივაკუთვნოთ. მაშინ აღმოჩნდება, რომ თითქმის ყველა ჩვენი გარემომცველი სხეული კრისტალია. ქვიშა და გრანიტი, სპილენძი და რკინა, სალოლი, რომელიც აფთიაქში იყიდება, და საღებავებიც სულ კრისტალებია.

არის გამონაკლისებიც; მინა და პლასტმასები კრისტალებისაგან არ შედგებიან. ასეთ მყარ სხეულებს ამორფულს უწოდებენ.

ამრიგად, კრისტალების შესწავლა ნიშნავს თითქმის მთელი ჩვენი გარემომცველი სხეულების შესწავლას. გასაგებია, რაოდენ მნიშვნელოვანია ეს.

ცალკეული კრისტალების ცნობა ერთი შეხედვით შეიძლება სწორი ფორმების მიხედვით. ბრტყელი წახნაგები და სწორი წიბოები კრისტალის დამახასიათებელი თვისებებია; ფორმების სისწორე უთუოდ დაკავშირებულია კრისტალების შინაგანი აღნაგობის სისწორესთან. თუ კრისტალი რომელიმე მიმართულებით განსაკუთრებით წაგრძელებულია, ეს იმას ნიშნავს, რომ კრისტალის აგებულებაც ამ მიმართულებით რაღაც განსაკუთრებულია.

მაგრამ წარმოიდგინეთ, დიდი ზომის კრისტალისგან დაზგაზე დამზადებული სფერო. შევძლებთ იმის გამოცნობას, რომ ხელში კრისტალი გვიჭირავს და განვასხვავებთ მას მინის სფეროსგან? კრისტალის ბუნებრივი ფორმა გვიჩვენებს, რომ კრისტალი განსხვავებულია სხვადასხვა მიმართულებით. თუკი ეს განსხვავება ფორმის მიმართ მჟღავნდება, იგი სხვა თვისებების მიმართაც უნდა არსებობდეს. კრისტალის სიმტკიცე, მისი ელექტრული თვისებები, სითბოს გამტარობა — ყველა თვისება შეიძლება განსხვავებული იყოს სხვადასხვა მიმართულებით. კრისტალის ამ თავისებურებას მისი თვისებების ანიზოტროპია ეწოდება. ანიზოტროპული ნიშნავს სხვადასხვა მიმართულებით განსხვავებულს.

კრისტალები ანიზოტროპულია. პირიქით, ამორფული სხეულები, სითხეები და გაზები — იზოტროპული, ე. ი. მათ

ერთნაირი თვისებები აქვთ სხვადასხვა მიმართულებით („იზო“ ბერძნულად „ერთნაირი“, „ტროპოს“ — მიმართულება).

სწორედ თვისებათა ანიზოტროპულობა გვაძლევს საშუალებას გავიგოთ გამჭვირვალე უფორმო ნივთიერების ნაჭერი კრისტალია თუ არა.

კრისტალების აღნაგობა

რატომ აქვს კრისტალს ასე ლამაზი და სწორი ფორმა? მის პრიალა და სწორ წახნაგებს ისეთი სახე აქვს, გეგონებათ კარგი ოსტატის ნახელავიაო. კრისტალის ცალკეული ნაწილები ერთმანეთს იმეორებენ და ლამაზ სიმეტრიულ ფიგურას ჰქმნიან

დასმულ კითხვაზე მხოლოდ ერთი პასუხი არსებობს — გარეგან სილამაზეს შინაგანი სისწორე უნდა შეესაბამებოდეს. ეს სისწორე მდგომარეობს ერთი და იმავე ძირითადი ნაწილების მრავალჯერად განმეორებაში.

წარმოიდგინეთ აქა-იქ უწესრიგოდ ჩარჭობილი სხვადასხვა სიგრძის ღეროები. ბაღის ასეთი მესერი ულამაზო სანახავია. კარგ მესერს, თანმიმდევრობით ერთმანეთისგან ტოლ მანძილებზე განლაგებულს, ერთნაირი ღეროებისგან აგებენ.

ასეთივე პერიოდული გამეორების სურათს ვხედავთ ჩვენ შპალერებზე. აქ ნახატის ელემენტი, ვთქვათ, ბურთიანი გოგონა, ბაღის მესერის მსგავსად, ერთი მიმართულებით კი არ მეორდება, არამედ მთელ სიბრტყეს ავსებს.

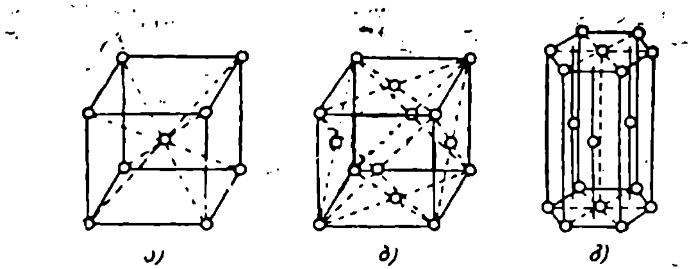
მაგრამ რა დამოკიდებულება აქვს ბაღის მესერს და შპალერს კრისტალთან? ბაღის მესერი შედგება ნაწილებისგან, რომლებიც ხაზის გასწვრივ მეორდებიან, შპალერები — ნახატებისგან, რომლებიც სიბრტყეზე მეორდებიან, ხოლო კრისტალი — ატომების ჯგუფებისგან, რომლებიც სივრცეში მეორდებიან. სწორედ ამიტომ ამბობენ, რომ კრისტალის ატომები ქმნიან სივრცულ (ან კრისტალურ) მესერს.

ამჟამად მრავალი ასეული კრისტალის აგებულებაა ცნობილი. ჩვენ გიამბობთ უმარტივესი კრისტალების აგებულე-

ბის შესახებ და პირველ რიგში კი ისეთი კრისტალებისა, რომლებიც ერთნაირი ატომებისგან შედგება.

ყველაზე უფრო გავრცელებულია მესერის სამი ტიპი. ისინი ნახ. 89-ზეა ნაჩვენები. წერტილებით ატომების ცენტრებია აღნიშნული; წერტილების შემაერთებელ ხაზებს არა აქვთ რაიმე რეალური აზრი. ისინი მხოლოდ იმიტომ არის გავლებული, რომ მკითხველმა უფრო ნათლად დაინახოს ატომების სივრცული განლაგება.

ნახ. 89, ა და 89, ბ კუბურ მესერებს გამოხატავენ. ამ მესერების უფრო ცხადად წამროსადგენად, დავუშვათ, რომ



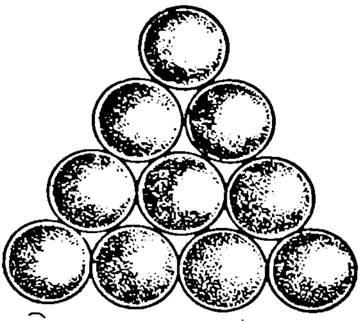
ნახ. 89.

სათამაშო კუბები უმარტივესი სახით დავალაგეთ — წიბო წიბოსთან, წახნაგი წახნაგთან.

თუ ახლა წარმოსახვით განვალაგებთ წერტილებს კუბების წვეროებსა და მათი მოცულობების ცენტრებში, მივიღებთ მარცხენა ნახატზე გამოსახულ კუბურ მესერს. ასეთ სტრუქტურას კუბური მოცულობაცენტრირებული ეწოდება. თუ წერტილებს კუბების წვეროებზე და მათი წახნაგების ცენტრებში მოვათავსებთ, წარმოიშობა შუა ნახატზე გამოსახული კუბური მესერი. მას კუბური წახნაგცენტრირებული ეწოდება.

მესამე მესერს (ნახ. 89, გ) ეწოდება უმჭიდროესი ჰექსაგონალური (ე. ი. ექვსკუთხოვანი). რომ გავიგოთ, თუ საიდან წარმოიშვა ეს ტერმინი და უფრო ნათლად წარმოვიდგინოთ ატომების განლაგება აღნიშნულ მესერში, უნდა ავიღოთ ბილიარდის ბურთები და რაც შეიძლება მჭიდროდ მოვუწყოთ

ერთმანეთს. უპირველეს ყოვლისა, შევადგინოთ მჭიდრო ფენა — მას ისეთი სახე უნდა ჰქონდეს, როგორიც თამაშის წინ „სამკუთხედად" დალაგებულ ბილიარდის ბურთებს (ნახ. 90). ყურადღება მივაქციოთ იმას, რომ სამკუთხედის შიგნით ბურთს ექვსი მეზობელი ეხება, და ეს ექვსი მეზობელი ექვსკუთხედსა ქმნის. განვაგრძოთ დალაგება და ფენები ერთმანეთზე დავაწყოთ. თუ შემდეგი ფენის ბურთებს უშუალოდ პირველი ფენის ბურთებს ზემოთ მოვათავსებთ, ასეთი წყობა არ იქნება მჭიდრო. თუ შევეცდებით განსაზღვრულ მოცულობაში მოვათავსოთ ბურთების რაც შეიძლება მეტი რაოდენობა, მეორე ფენის ბურთები პირველი ფენის ღრმულებში უნდა ჩავაწყოთ, მესამე ფენისა — მეორის ღრმულებში და ა. შ. ჰექსაგონალურ უმჭიდროეს წყობაში მესამე ფენის ბურთები ისეა განლაგებული, რომ ამ ბურთების ცენტრები პირველი ფენის ბურთების ცენტრების ზემოთ მოდის.



ნახ. 90.

ატომის ცენტრები ჰექსაგონალურ უმჭიდროეს მესერში ისეა განლაგებული, როგორც ზემოთ აღწერილი წესით მჭიდროდ დალაგებული ბურთების ცენტრები.

აღწერილ სამ მესერში კრისტალდება მრავალი ელემენტი:

ჰექსაგონალური უმჭიდროესი
წყობა . . . . Be, Co, Hf, Ti, Zn, Zr.
კუბური წახნაგცენტრირებული Al, Cu, Co, Fe, Au, Ge, Ni, Ti.
კუბური მოცულობაცენტრირებული . . . . Cr, Fe, Li, Mo, Ta, Ti, U, V.

სხვა სტრუქტურებიდან მხოლოდ ზოგიერთს მოვიხსენიებთ. ნახ. 91-ზე ალმასის სტრუქტურაა გამოხატული. ამ

სტრუქტურის თავისებურება ის არის, რომ ალმასის ნახშირბადის ატომს ოთხი უახლოესი მეზობელი ჰყავს. შევადაროთ ეს რიცხვი სათანადო რიცხვებს ზემოთ აღწერილი სამი ყველაზე გავრცელებული სტრუქტურისთვის. როგორც ნახატებიდან ჩანს, უმჭიდროეს ჰექსაგონალურ წყობაში თვითეულ ატომს 12 უახლოესი მეზობელი ჰყავს, ამდენივე მეზობელი ჰყავთ ატომებს, რომლებიც წახნაგცენტრირებულ კუბურ მესერს ქმნიან; მოცულობაცენტრირებულ მესერში ყოველ ატომს რვა მეზობელი ჰყავს.

ორიოდე სიტყვით მოვიხსენიებთ გრაფიტსაც, რომლის აგებულებაც ნახ. 92-ზეა ნაჩვენები. ამ სტრუქტურის თავისებურება თვალში გეცემათ. გრაფიტი შედგება ატომების ფენებისგან, ამასთან, ერთი ფენის ატომები ერთმანეთთან უფრო მჭიდროდ არიან დაკავშირებული, ვიდრე მეზობელი ფენების ატომები. ეს ატომთშორის მანძილებით არის გაპირობებული: მეზობლებს შორის მანძილი ერთ ფენაში 2,5-ჯერ ნაკლებია ფენებს შორის უმოკლეს მანძილზე.

სუსტად დაკავშირებული ატომური ფენების არსებობა იწვევს გრაფიტის კრისტალის ადვილად გახლეჩას ამ ფენების გასწვრივ. ამიტომ მყარი გრაფიტი შეიძლება საპოხ მასალად გამოვიყენოთ იმ შემთხვევებში, როდესაც შეუძლებელია შეზეთვა, მაგალითად, ძალიან დაბალი ან ძალიან მაღალი ტემპერატურის პირობებში. გრაფიტი მყარი საპოხი მასალაა.

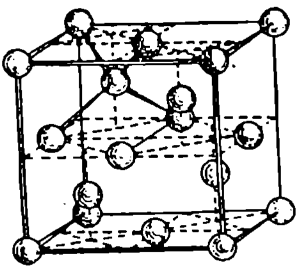
ორ სხეულს შორის ხახუნი, უხეშად რომ ითქვას, არის ერთი სხეულის შვერილების მეორის ჩაღრმავებებში მოხვედრა. გრაფიტის მიკროსკოპული კრისტალის გახლეჩისათვის საკმარისი ძალვა ხახუნის ძალებზე ბევრად ნაკლებია, ამიტომ გრაფიტის საპოხი მნიშვნელოვნად აადვილებს ერთი სხეულის მეორეზე სრიალს.

უსასრულოდ ნაირგვარია ქიმიურ შენაერთთა კრისტალების სტრუქტურა. განსხვავებათა თვალსაზრისით უკიდურეს შემთხვევებად შეიძლება ავიღოთ ქვამარილისა და ნახშირორჟანგის სტრუქტურები, რომლებიც 93-ე და 94-ე ნახატებზეა გამოსახული.

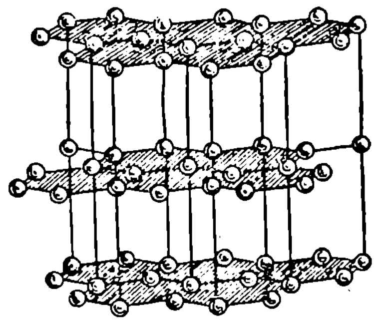
ქვამარილის კრისტალები (ნახ. 93) შედგება კუბების ღერძების გასწვრივ ერთმანეთის მონაცვლე ნატრიუმის (მცირე

მუქი ბურთულები) და ქლორის (დიდი ღია ფერის ბურთულები) ატომებისგან.

ნატრიუმის ყოველ ატომს მისგან განსხვავებული სახის ექვსი თანაბრად დაშორებული მეზობელი ჰყავს. ასევეა ქლორიც. მაგრამ სადღაა ქლოროვანი ნატრიუმის მოლეკულა? იგი არ არის; კრისტალში არ არის არამცთუ ნატრიუმის ერთი ატომისა და ქლორის ერთი ატომისგან შემდგარი ჯგუფი, არამედ, საერთოდ, ატომების არავითარი ჯგუფი არ გამოირჩევა დანარჩენებისგან თავისი სიახლოვით.



ნახ. 91.



ნახ. 92.

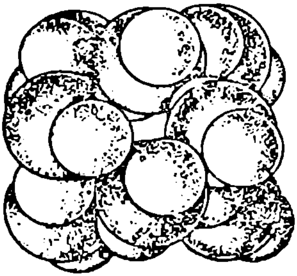
ქიმიური ფორმულა NaCl არ გვაძლევს საფუძველს ვთქვათ, რომ „ნივთიერება NaCl-ის მოლეკულებისგან არის აგებული“. იგი მხოლოდ იმას გვიჩვენებს, რომ ნივთიერება ნატრიუმისა და ქლორის ატომების ერთნაირ რიცხვს შეიცავს.

საკითხს ნივთიერებაში მოლეკულების არსებობის შესახებ სტრუქტურა წყვეტს. თუ მასში არ გამოიყოფა დაახლოებული ატომების ჯგუფი, მაშინ მოლეკულა არ არსებობს. კრისტალებს, რომლებშიც მოლეკულები არ არის, ატომური კრისტალები ეწოდება.

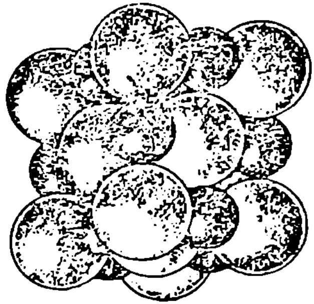
ნახშირორჟანგის CO_2 კრისტალები (მყარი ყინული, რომელიც ნაყინის გამყიდველებს აქვთ ხოლმე ყუთებში) — მოლეკულური კრისტალის მაგალითს წარმოადგენს (ნახ. 94).

მოლეკულის ჟანგბადისა და ნახშირბადის ატომების ცენტრები სწორი ხაზის გასწვრივ არის განლაგებული. მანძილი

C—O 1,3 Å ტოლია. ხოლო მეზობელი მოლეკულების ქანგბადის ატომებს შორის მანძილი დაახლოებით 3 Å. გასაგებია, რომ ამ პირობებში ჩვენ მაშინვე „ვცნობთ“ კრისტალში მოლეკულას.



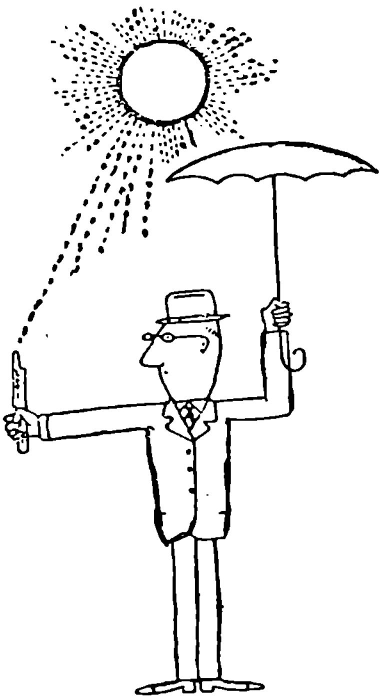
ნახ. 93.



ნახ. 94.

მოლეკულური კრისტალები წარმოადგენენ მოლეკულების მჭიდრო წყობას. ამის დასანახავად საჭიროა მოლეკულების კონტურების შემოხაზვა, რაც ნახ. 94-ზეა გაკეთებული.

XI. ტემპერატურა



თერმომეტრი

თუ ორ სხვადასხვაგვარად გამთბარ სხეულს ერთმანეთს შევახებთ, მეტად გამთბარი გაცივებას დაიწყებს, ხოლო ცივი კი შედარებით გათბება. ასეთ სხეულებზე ამბობენ, რომ ისინი ერთმანეთს სითბოს უცვლიან; რასაკვირველია, ცხოვრებაში ჩვენ არ ვუწოდებთ გაცვლას ისეთ შემთხვევას, როდესაც ერთი ადამიანი მეორეს ას მანეთს აძლევს, მეორე კი იღებს ამ ფულს, მაგრამ ფიზიკაში ასეთი ტერმინოლოგია მიღებულია.

როგორც ვთქვით, სითბოს გაცვლა ენერგიის გადასვლის სახეა. უფრო ცხელს იმ სხეულს ვუწოდებთ, რომელიც გასცემს ენერგიას. ჩვენ ვგრძნობთ, რომ სხეული ცხელია, თუ ის ათბობს ხელს, ანუ მას ენერგიას გადასცემს. პირიქით, როცა ვგრძნობთ, რომ სხეული ცივია, ეს იმას ნიშნავს, რომ იგი ართმევს ენერგიას ჩვენს სხეულს.

სხეულზე, რომელიც გასცემს სითბოს (ანუ სითბოს გაცვლის გზით გასცემს ენერგიას), ჩვენ ვამბობთ, რომ მისი ტემპერატურა ამ სითბოს მიმღები სხეულის ტემპერატურაზე მეტია.

საკმარისია დავუკვირდეთ, ცივდება თუ თბება ჩვენთვის საინტერესო სხეული ამა თუ იმ სხეულის გვერდით, და ამ სხეულს მოვუნახავთ „თავის ადგილს" გამთბარი სხეულების რიგში. ტემპერატურა თავისებური ნიშანია, რომელიც გვიჩვენებს, რომელ სხეულებს აწვდის ჩვენი საგანი სითბოს და, პირიქით, რომლებისგან იღებს თვითონ.

ტემპერატურას თერმომეტრით ზომავენ.

თერმომეტრების საფუძვლად შეიძლება გამოვიყენოთ სითბოსადმი მგრძნობიარე სხეულთა სხვადასხვა თვისება. უფრო ხშირად სარგებლობენ სხეულების გაფართოების თვისებით ტემპერატურის მატებისას.

თუ სხვადასხვა სხეულებთან შეხებისას თერმომეტრის სხეული თავის მოცულობას შეიცვლის, ეს იმის ნიშანი იქნება, რომ სხეულებს სხვადასხვა ტემპერატურა ექნებათ. როდესაც თერმომეტრის სხეულის მოცულობა იზრდება, მაშინ გასაზომი სხეულის ტემპერატურა უფრო მაღალია; ხოლო როცა თერმომეტრის სხეულის მოცულობა მცირდება, გასაზომი სხეულის ტემპერატურა ნაკლებია.

თერმომეტრებად შეიძლება სრულიად სხვადასხვა სხეულები გამოვიყენოთ: თხევადიც, როგორიც ვერცხლისწყალი და სპირტია, მყარიც — ლითონები — და გაზისებურებიც. მაგრამ სხვადასხვა სხეული სხვადასხვაგვარად ფართოვდება და ამიტომ ვერცხლისწყლის, სპირტის, გაზებისა და სხვათა გრადუსები ერთმანეთს არ ემთხვევა. რასაკვირველია, ყოველთვის შეიძლება ყველა თერმომეტრზე აღვნიშნოთ ორი ძირითადი წერტილი — ყინულის დნობისა და წყლის დუღილის

ტემპერატურა. ამიტომ ცელსიუსის 0 და 100 გრადუსს ყველა თერმომეტრი ერთნაირად გვიჩვენებს. მაგრამ 0 და 100 გრადუსებს შორის სხეულების გაფართოება ერთნაირი არ იქნება. ერთი სხეული სწრაფად ფართოვდება ვერცხლისწყლის თერმომეტრის 0 და 50 გრადუსებს შორის და უფრო ნელა — ამ ინტერვალის მეორე ნაწილში, სხვა სხეული კი — პირუკუ.

თუ თერმომეტრებს სხვადასხვა გაფართოებად სხეულებისგან დავამზადებთ, მათ ჩვენებაში მნიშვნელოვან განსხვავებას აღმოვაჩენთ, მიუხედავად იმისა, რომ ძირითად წერტილებში ჩვენებები ერთმანეთს ემთხვევა. უფრო მეტიც, წყლის თერმომეტრი ასეთ აღმოჩენამდე მიგვიყვანდა: ნულამდე გაცივებული სხეული რომ ელექტროქურაზე დავდოთ, მისი „წყლის ტემპერატურა" ჯერ შემცირდება, ხოლო შემდეგ გაიზრდება. ეს იმიტომ, რომ წყალი გათბობისას ჯერ მცირდება მოცულობაში და მხოლოდ შემდეგ იქცევა „ნორმალურად", ე. ი. ფართოვდება გათბობისას.

ჩვენ ვხედავთ, რომ თერმომეტრისთვის ნივთიერების მოუფიქრებელმა შერჩევამ შეიძლება ჩიხში მოგვამწყვდიოს.

მაშ რით ვიხელმძღვანელოთ „სწორი" თერმომეტრის შერჩევის დროს? რომელი სხეულია იდეალური ამ მიზნისთვის?

ასეთ იდეალურ სხეულებზე ჩვენ უკვე ვისაუბრეთ. ეს გახლავთ იდეალური გაზები. იდეალური გაზის ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედება არ არსებობს და მისი გაფართოების დროს ჩვენ ვსწავლობთ, თუ როგორ იცვლება ამ გაზის მოლეკულების მოძრაობა. სწორედ ამიტომ წარმოადგენს იდეალური გაზი იდეალურ სხეულს თერმომეტრისთვის.

მართლაც, მაშინვე გვეცემა თვალში, რომ თუ წყალი სპირტისაგან განსხვავებულად ფართოვდება, სპირტი მინისაგან განსხვავებულად, მინა კი რკინისაგან განსხვავებულად, წყალბადი, ჟანგბადი, აზოტი ან ნებისმიერი სხვა გაზი ისეთ გაიშვიათებულ მდგომარეობაში, რომელიც საკმარისია მათთვის იდეალურის სახელწოდების მისანიჭებლად, გათბობისას ზუსტად ერთნაირად ფართოვდება.

ამრიგად, ფიზიკაში ტემპერატურის განსაზღვრის საფუძველს წარმოადგენს იდეალური გაზის გარკვეული რაოდენო-

ბის მოცულობის შეცვლა. რასაკვირველია, გაზების ძლიერი კუმშვადობის გამო განსაკუთრებული გულისყურით უნდა ვადევნოთ თვალი, რომ გაზი მუდმივი წნევის ქვეშ იმყოფებოდეს.

გაზიანი თერმომეტრის დასაგრადუირებლად აღებული გაზის მოცულობა უნდა გაიზომოს 0°-ზე და 100°-ზე. V_{100} და V_0 მოცულობების სხვაობას 100 ტოლ ნაწილად დავყოფთ. სხვანაირად რომ ვთქვათ, გაზის მოცულობის $\frac{1}{100}$ $(V_{100}-V_0)$-ით შეცვლა შეესაბამება სწორედ ცელსიუსის ერთ გრადუსს (1°C).

ახლა, ვთქვათ, ჩვენი თერმომეტრი V მოცულობას გვიჩვენებს. რა ტემპერატურა t°C შეესაბამება ამ მოცულობას? ძნელი მოსაფიქრებელი არ არის, რომ

$$t°C=\frac{V-V_0}{Y_{100}-V_0}\cdot 100,$$

ანუ

$$\frac{t°C}{100}=\frac{V-V_0}{V_{100}-V_0}.$$

ამ ტოლობით ყოველ V მოცულობას t ტემპერატურას ვუკავშირებთ და ვღებულობთ იმ ტემპერატურულ სკალას [1], რომლითაც ფიზიკოსები სარგებლობენ.

---

[1] ცელსიუსის სკალა, რომელშიც 0°C-ად მიღებულია მდნობარი ყინულის ტემპერატურა, ხოლო 100°C-ად — წყლის დუღილის ტემპერატურა (ორივე ნორმალური წნევის — 760 მმ Hg-ის პირობებში), ძალიან მოსახერხებელია. მიუხედავად ამისა, ინგლისელები და ამერიკელები აქამდე სარგებლობდნენ ისეთი ტემპერატურული სკალით, რომელიც ჩვენ ძალიან უცნაური გვეჩვენება. როგორ გავიგოთ, მაგალითად, ასეთი ფრაზა ინგლისური რომანიდან: „გრილი ზაფხული იდგა, ტემპერატურა 60—70 გრადუსი იყო". კორექტურული შეცდომაა? არა, ეს ფარენგეიტის სკალითაა (°F) გაზომილი ტემპერატურა.

ინგლისში ტემპერატურა იშვიათად ეცემა — 20°C-ზე ქვევით. ფარენგეიტმა შეარჩია ყინულისა და მარილის ისეთი ნარევი, რომელსაც დაახლოებით ასეთი ტემპერატურა აქვს, და ეს ტემპერატურა ნულად მიიღო. 100°-ად ამ სკალაში, ავტორის სიტყვით, ადამიანის სხეულის ნორმალური ტემპერატურა მიიღეს, მაგრამ ამ წერტილის დადგენის დროს

ტემპერატურის ზრდისას გაზის მოცულობა განუსაზღვრელად იზრდება — ტემპერატურის ზრდას არავითარი საზღვარი არა აქვს. პირიქით, დაბალ (ცელსიუსის სკალით უარყოფით) ტემპერატურას აქვს საზღვარი.

მართლაც, რა მოხდება ტემპერატურის შემცირებისას? რეალური გაზი ბოლოს და ბოლოს სითხედ იქცევა, ხოლო კიდევ უფრო მეტი შემცირებისას გამყარდება. გაზის მოლეკულები მცირე მოცულობაში მოიყრიან თავს. მაგრამ რისი ტოლი იქნება ეს მოცულობა იდეალური გაზით შევსებული ჩვენი თერმომეტრისთვის? მისი მოლეკულები არ ურთიერთქმედებენ ერთმანეთთან და არა აქვთ საკუთარი მოცულობა. მაშასადამე, ტემპერატურის დაწევა იდეალურ გაზს ნულოვან მოცულობამდე დაიყვანს. ნებისმიერი მიახლოება იდეალური გაზისთვის დამახასიათებელ ქცევასთან, ამ შემთხვევაში მოცულობის ნულოვან მნიშვნელობასთან, პრაქტიკულად სავსებით შესაძლებელია. ამისთვის გაზიანი თერმომეტრი სულ უფრო და უფრო გაიშვიათებული გაზით უნდა შევავსოთ. ამიტომ არ შევცოდავთ ჭეშმარიტების წინაშე, თუ გაზის ზღვრულ მოცულობას ნულის ტოლად ჩავთვლით.

ჩვენი ფორმულის თანახმად, ნულის ტოლ მოცულობას ყველაზე დაბალი შესაძლო ტემპერატურა შეესაბამება. სწორედ ამ ტემპერატურას ეწოდება ტემპერატურის აბსოლუტური ნული.

ცელსიუსის სკალაზე აბსოლუტური ნულის მდებარეობის განსაზღვრისათვის ტემპერატურის ფორმულაში უნდა ჩავსვათ მოცულობის ნულის ტოლი მნიშვნელობა $V=O$. ამრიგად, აბსოლუტური ნულის ტემპერატურა ტოლია — $\frac{V_0 \cdot 100}{V_{100}-V_0}$.

ირკვევა, რომ ეს ღირსშესანიშნავი წერტილი შეესაბამება დაახლოებით—273° ტემპერატურას (უფრო ზუსტად—273,15°).

ფარენგეიტი ალბათ ცხელებიანი ადამიანის დახმარებით სარგებლობდა. ადამიანის სხეულის საშუალო ნორმალურ ტემპერატურას ფარენგეიტის სკალაზე 98°F შეესაბამება. ამ სკალის მიხედვით წყალი იყინება +32°F-ზე, ხოლო დუღს 212°F-ზე. გადასვლის ფორმულას ასეთი სახე ექნება:

$$t°C=\frac{5}{9}(t-32)°F.$$

ამრიგად, არ არსებობს ტემპერატურა აბსოლუტური ნულის ქვევით; ასეთი ტემპერატურა ხომ გაზის უარყოფით მოცულობას შეესაბამება. უფრო დაბალ ტემპერატურაზე ლაპარაკი შეუძლებელია. აბსოლუტურ ნულზე დაბალი ტემპერატურის მიღება ისეთივე უაზრობაა, როგორც ნულზე ნაკლები დიამეტრის მავთულის დამზადება.

აბსოლუტურ ნულამდე გაცივებული სხეულის გაცივება აღარ შეიძლება, ე. ი. არ შეიძლება მისთვის ენერგიის წართმევა. სხვანაირად რომ ვთქვათ, აბსოლუტურ ნულზე სხეულებს და მათ შემადგენელ ნაწილაკებს უმცირესი შესაძლებელი ენერგია აქვთ. ეს იმას ნიშნავს, რომ აბსოლუტურ ნულზე კინეტიკური ენერგია ნულის ტოლია, ხოლო პოტენციალურ ენერგიას აქვს უმცირესი შესაძლო მნიშვნელობა.

რამდენადაც აბსოლუტური ნული ყველაზე დაბალი ტემპერატურაა, ბუნებრივია, ფიზიკაში, განსაკუთრებით კი მის ისეთ დარგებში, სადაც დაბალ ტემპერატურასთან გვაქვს საქმე, ტემპერატურის აბსოლუტური სკალით სარგებლობენ. ასეთ სკალაზე ათვლა აბსოლუტური ნულიდან იწყება. ცხადია $T_{აბ} = (t+273)°C$. ოთახის ტემპერატურა აბსოლუტურ სკალაზე 300°-ის მახლობლად მდებარეობს. ტემპერატურის აბსოლუტურ სკალას უწოდებენ აგრეთვე კელვინის სკალას — XIX საუკუნის ცნობილი ინგლისელი სწავლულის გვარის მიხედვით, და $T_{აბ}$ აღნიშვნის ნაცვლად ხმარობენ $T°K$ აღნიშვნას.

გაზიანი თერმომეტრის ფორმულა, რომელიც T ტემპერატურას განსაზღვრავს, აბსოლუტური ტემპერატურისთვის ასეთი სახით შეიძლება დაიწეროს:

$$T = 100 \cdot \frac{V - V_0}{V_{100} - V_0} + 273.$$

თუ ვისარგებლებთ ტოლობით $\frac{100 \cdot V_0}{V_{100} - V_0} = 273$, მივიღებთ მარტივ შედეგს:

$$\frac{T}{273} = \frac{V}{V_0}.$$

აქრიგად, აბსოლუტური ტემპერატურა უბრალოდ იდეალური გაზის მოცულობის პროპორციულია.

ტემპერატურის ზუსტი გაზომვა ფიზიკოსისგან სხვადასხვა სპეციალური ხერხების გამოყენებას მოითხოვს. ტემპერატურათა საკმაოდ ფართო ინტერვალში ვერცხლისწყლის, სპირტის (არქტიკისთვის) და სხვა თერმომეტრები გაზიანი თერმომეტრით გრადუირდება. მაგრამ ისიც აღარ არის გამოსადეგი აბსოლუტური ნულის საკმაოდ ახლო ტემპერატურისთვის (10,7°K-ზე ქვევით), როდესაც გაზი თხევადდება, და აგრეთვე 600°C-ზე მეტი ტემპერატურისთვის, როდესაც გაზები მინაში ჟონავენ. მაღალი და ძალიან დაბალი ტემპერატურის დროს, ტემპერატურის გაზომვის სხვა პრინციპებით სარგებლობენ.

რაც შეეხება ტემპერატურის გაზომვის პრაქტიკულ ხერხს, ასეთი ხერხი მრავალია. დიდი მნიშვნელობა აქვს ელექტრულ მოვლენებზე დაფუძნებულ ხელსაწყოებს. ამჟამად მხოლოდ ერთი რამ უნდა დავიხსომოთ — ტემპერატურის ნებისმიერი გაზომვისას დარწმუნებული უნდა ვიყოთ, რომ გაზომილი სიდიდე სავსებით ემთხვევა იმას, რასაც გაიშვიათებული გაზის გაფართოების გაზომვა მოგვცემდა.

მაღალი ტემპერატურა მიიღება ღუმელებსა და სანთურებში. საშაქარლამო ღუმელებში ტემპერატურა 220—280°C აღწევს. უფრო მაღალ ტემპერატურას იყენებენ მეტალურგიაში — 900—1000° იძლევა საწრთობი ღუმელები, 1400—1500° — სამჭედლო ღუმელები. ფოლადის სადნობ ღუმელებში ტემპერატურა 2000° აღწევს.

სარეკორდო მაღალ ტემპერატურას ღებულობენ ღუმელებში ელექტრული რკალის დახმარებით (დახლოებით 5000°). რკალის ალი ყველაზე ძნელდნობადი ლითონების „მორჯულების" შესაძლებლობას იძლევა.

როგორია გაზის სანთურის ალის ტემპერატურა? ალის შიგნითა მოცისფრო კონუსის ტემპერატურა სულ 300°, გარეთა კონუსის ტემპერატურა კი 1800° აღწევს.

შეუდარებლად უფრო მაღალი ტემპერატურა მიიღება ატომური ყუმბარის აფეთქებისას. არაპირდაპირი შეფასებით,

აფეთქების ცენტრში ტემპერატურა მრავალ მილიონ გრადუსს აღწევს.

უკანასკნელ ხანებში ჩატარდა ცდები ზემაღალი ტემპერატურის მისაღებად ჩვენში და საზღვარგარეთ დამზადებულ სპეციალურ ლაბორატორიულ დანადგარებში (ოგრა, ზეტა). დროის უმოკლეს მონაკვეთში მოხერხდა ორ მილიონ გრადუსამდე ტემპერატურის მიღწევა.

ზემაღალი ტემპერატურა ბუნებაშიც არსებობს, მაგრამ არა დედამიწაზე, არამედ სამყაროს სხვა სხეულებზე. ვარსკვლავებისა და, კერძოდ, მზის ცენტრში ტემპერატურა რამდენიმე ათეულ მილიონ გრადუსს აღწევს.

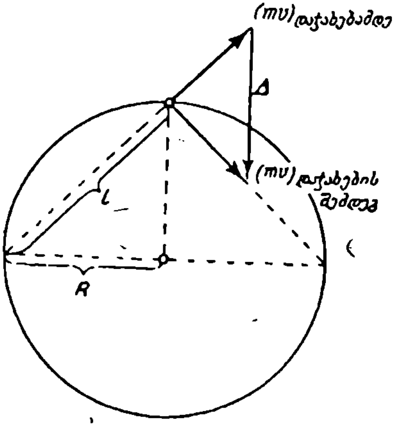
ვარსკვლავების ზედაპირულ უბნებს გაცილებით დაბალი ტემპერატურა აქვს, იგი 20.000° არ აღემატება. მზის ზედაპირი 6000°-მდეა გახურებული.

იდეალური გაზის თეორია

ტემპერატურის განმსაზღვრელი იდეალური გაზის თვისებები მეტად მარტივია. მუდმივი ტემპერატურის დროს ძალაშია ბოილ-მარიოტის კანონი: pV ნამრავლი მოცულობისა ან წნევის ცვლილებისას მუდმივი რჩება. თუ წნევა უცვლელია, როგორც არ უნდა იცვლებოდეს მოცულობა და ტემპერატურა, V/T ფარდობა მუდმივი რჩება. ეს ორი კანონი ადვილად შეიძლება გაერთიანდეს. ცხადია, pV/T გამოსახულება უცვლელი რჩება, როგორც მუდმივი ტემპერატურისა, მაგრამ ცვალებადი V და p შემთხვევაში, ისე მუდმივი წნევისა, მაგრამ ცვალებადი V და T პირობებში. pV/T გამოსახულება მუდმივი რჩება არა მარტო ნებისმიერი წყვილის, არამედ სამივე სიდიდის — p, V და T ცვალებადობის დროსაც. კანონი $\frac{pV}{T} = \mathrm{const}$, როგორც ამბობენ, იდეალური გაზის მდგომარეობის განტოლებას განსაზღვრავს.

იდეალური გაზი იმიტომ აირჩიეს თერმომეტრად, რომ მხოლოდ მისი თვისებებია დაკავშირებული მოლეკულების მარტოოდენ მოძრაობასთან (და არა მათ ურთიერთქმედებასთან).

რა კავშირია მოლეკულების მოძრაობასა და ტემპერატურას შორის? ამ კითხვაზე პასუხის გასაცემად საჭიროა ვიპოვოთ კავშირი გაზის წნევასა და მასში მოლეკულების მოძრაობას შორის.



ნახ. 95.

სფერული ფორმის R რადიუსის მქონე ჭურჭლის შიგნით მოთავსებულია გაზის N მოლეკულა (ნახ. 95). თვალი ვადევნოთ რომელიმე მოლეკულას, მაგალითად, იმას, რომელიც აღებულ მომენტში მარცხნიდან მარჯვნივ მოძრაობს l სიგრძის მქონე ქორდის გასწვრივ. მოლეკულების დაჯახებას ყურადღებას ნუ მიაქცევთ: ასეთი შეხვედრები წნევაზე გავლენას არ ახდენს. როცა მოლეკულა ჭურჭლის კედელს მიაღწევს, დაეჯახება მას და იმავე სიჩქარით (დაჯახება დრეკადია) გაეშურება უკვე სხვა მიმართულებით. იდეალურ შემთხვევაში ასეთი მოგზაურობა ჭურჭლის შიგნით შეიძლება უსასრულოდ გაგრძელდეს. თუ v მოლეკულის სიჩქარეა, ყოველი დაჯახება l/v წამის შემდეგ მოხდება, ანუ თვითეული მოლეკულა წამში v/l-ჯერ დაეჯახება კედელს. N მოლეკულის დაჯახებათა უწყვეტი სეტყვა წნევის ერთიან ძალად შეირწყმის.

ნიუტონის კანონის მიხედვით ძალა უდრის იმპულსის ცვლილებას დროის ერთეულში. იმპულსის ცვლილება ყოველი დაჯახების შედეგად Δ-თი აღვნიშნოთ. ეს ცვლილება წამში v/l-ჯერ გამეორდება. მაშასადამე, ცალკეული მოლეკულის წვლილი ძალის სიდიდეში იქნება $\frac{\Delta}{l}v$.

ნახ. 95-ზე აგებულია იმპულსის ვექტორები დაჯახებამდე და დაჯახების შემდეგ, აგრეთვე იმპულსის ნაზრდის Δ ვექტორი. აგების შედეგად წარმოქმნილი სამკუთხედების მსგავ-

სებიდან გამომდინარეობს: $\frac{\Delta}{l}=\frac{mv}{R}$. ერთი მოლეკულის მიერ ძალის სიდიდეში შეტანილი წვლილი ასეთ სახეს მიიღებს:

$$\frac{mv^2}{R}$$

რადგანაც ქორდის სიგრძე ფორმულაში არ შევიდა, ცხადია, ნებისმიერი ქორდის გასწვრივ მოძრავ მოლეკულებს ძალის სიდიდეში ერთნაირი წვლილი შეაქვთ. რასაკვირველია, ირიბი დაჯახების შემთხვევაში იმპულსის ცვლილება ნაკლები იქნება, მაგრამ, სამაგიეროდ, ამ შემთხვევაში დაჯახება გახშირდება. გამოთვლამ გვიჩვენა, რომ ეს ორი ეფექტი ზუსტად აკომპენსირებს ერთმანეთს.

რადგანაც სფეროს შიგნით N მოლეკულაა, ამიტომ ჯამური ძალა ტოლი იქნება:

$$\frac{Nmv^2_{\text{საშ}}}{R},$$

სადაც $v^2_{\text{საშ}}$ მოლეკულების საშუალო სიჩქარეა.

გაზის p წნევა, რომელიც უდრის ძალის ფარდობას სფეროს $4\pi R^2$ ფართთან, იქნება:

$$p=\frac{Nmv^2_{\text{საშ}}}{R\cdot 4\pi R^2}=\frac{\frac{1}{3}Nmv^2_{\text{საშ}}}{\frac{4}{3}\pi R^3}=\frac{Nmv^2_{\text{საშ}}}{3V},$$

სადაც V სფეროს მოცულობაა.

ამრიგად,

$$pV=\frac{1}{3}Nmv^2_{\text{საშ}}.$$

ეს განტოლება პირველად დანიელ ბერნულიმ გამოიყვანა 1738 წელს [1].

იდეალური გაზის მდგომარეობის განტოლებიდან გამომდინარეობდა: $pV = \mathrm{const} \cdot T$; ამ განტოლებიდან ვხედავთ, რომ pV პროპორციულია $v^2_{საშ}$. მაშასადამე,

$$T \backsim v^2_{საშ}. \text{ ანუ } v_{საშ} \backsim \sqrt{T},$$

ე. ი. იდეალური გაზის მოლეკულის სიჩქარე პროპორციულია აბსოლუტური ტემპერატურიდან კვადრატული ფესვისა.

ავოგადროს კანონი

ვთქვათ, ნივთიერება სხვადასხვა მოლეკულების ნარევს წარმოადგენს. ხომ არ არსებობს მოძრაობის დამახასიათებელი ისეთი ფიზიკური სიდიდე, რომ ერთნაირი ტემპერატურის პირობებში მყოფი ყველა მოლეკულისთვის, მაგალითად, წყალბადისა და ჟანგბადის მოლეკულებისთვის, ერთნაირი იყოს?

ამ კითხვაზე მექანიკა გვაძლევს პასუხს. შეიძლება დავამტკიცოთ, რომ ყველა მოლეკულისთვის ერთნაირი იქნება გადატანითი მოძრაობის საშუალო კინეტიკური ენერგიები $\frac{mv^2_{საშ}}{2}$.

ეს იმას ნიშნავს, რომ მოცემული ტემპერატურისას მოლეკულების სიჩქარის საშუალო კვადრატები ნაწილაკის მასის უკუპროპორციული იქნება:

$$v_{საშ} \backsim \frac{1}{\sqrt{m}}.$$

დავუბრუნდეთ ახლა $pV = \frac{1}{3} Nmv^2_{საშ}$ განტოლებას. რადგანაც მოცემულ ტემპერატურაზე $mv^2_{საშ}$ სიდიდეები ყველა

[1] წარმოშობით შვეიცარიელი დ. ბერნული მუშაობდა და ცხოვრობდა რუსეთში; იგი პეტერბურგელი აკადემიკოსი იყო. არანაკლებ ცნობილია ჟან ბერნულისა და იაკობ (ჟაკ) ბერნულის მოღვაწეობა. სამივე მეცნიერი ძმები იყვნენ.

გაზისთვის ერთნაირია, ამიტომ განსაზღვრული წნევისა და ტემპერატურის პირობებში მოცემული მოცულობის შიგნით მოთავსებული მოლეკულების N რიცხვიც ყველა გაზისთვის ერთნაირი იქნება. ეს შესანიშნავი კანონი პირველად ავოგადრომ ჩამოაყალიბა.

რამდენი მოლეკულა მოდის 1 სმ^3-ზე? ირკვევა, რომ 1 სმ^3-ში 0°C და 760 მმ Hg პირობებში არის $2{,}7 \cdot 10^{19}$ მოლეკულა. ეს უზარმაზარი რიცხვია. იმისთვის, რომ იგრძნოთ, თუ რამდენად დიდია იგი, ასეთ მაგალითს მოვიყვანთ. წარმოვიდგინოთ, რომ 1 სმ^3 მოცულობის მქონე მცირე ჭურჭლიდან გაზი ისეთი სიჩქარით გამოდის, რომ ყოველ წამში მოლეკულების რიცხვი ჭურჭელში მილიონით მცირდება. ადვილია გამოანგარიშება, რომ ჭურჭელი მხოლოდ მილიონი წლის შემდეგ განთავისუფლდება გაზისგან მთლიანად!

ავოგადროს კანონი გვიჩვენებს, რომ განსაზღვრული წნევისა და ტემპერატურის პირობებში მოლეკულების რიცხვის ფარდობა მოცულობასთან, რომელშიც ისინია მოთავსებული, N/v ყველა გაზისთვის ერთნაირ სიდიდეს წარმოადგენს.

რადგანაც გაზის სიმკვრივე $\rho = \frac{N}{v} m$, გაზების სიმკვრივეების ფარდობა მათი მოლეკულური წონების ფარდობის ტოლია:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{m_1}{m_2}.$$

ამიტომ მოლეკულების ფარდობითი წონა გაზოვან ნივთიერებათა უბრალო აწონვით შეიძლება განისაზღვროს. გაზომვის ასეთმა ხერხმა თავის დროზე დიდი როლი შეასრულა ქიმიის განვითარებაში. მას არც ახლა დაუკარგავს მნიშვნელობა, როდესაც ახალი სინთეზირებული ნივთიერების მოლეკულური წონაა საპოვნელი. ამისათვის საჭიროა მისი გაზოვან მდგომარეობაში გადაყვანა ისე, რომ არ გაფუჭდეს. ჰაერი გაზების ნარევს წარმოადგენს და მისი სიმკვრივის შესადარებლად სხვა გაზების სიმკვრივეებთან მოსახერხებელია ჰაერის საშუალო მოლეკულური წონის შემოღება. მისი მნიშვნელობა 28,8 ტოლი გამოდის. ამ მნიშვნელობის გამო-

ყენებით ადვილია სხვადასხვა გაზის სიმკვრივის განსაზღვრა ჰაერის მიმართ. მაგალითად, წყლის ორთქლს, რომლის მოლეკულური წონა 18, ჰაერის მიმართ $\frac{18}{28,8}=0,62$ ტოლი სიმკვრივე აქვს.

მოლეკულათა სიჩქარეები

თეორია გვიჩვენებს, რომ ერთი ტემპერატურისას მოლეკულების საშუალო კინეტიკური ენერგიები $\frac{mv^2_{საშ}}{2}$ ერთნაირია. ტემპერატურის ჩვენი განსაზღვრის მიხედვით გაზის მოლეკულების გადატანითი მოძრაობის ეს საშუალო კინეტიკური ენერგია აბსოლუტური ტემპერატურის პროპორციულია. ტოლობის სახით ეს უმნიშვნელოვანესი კანონი ასე იწერება:

$$\left(\frac{mv^2}{2}\right)_{საშ}=2,1\cdot 10^{-16}\,T,$$

სადაც ენერგია ერგებში იზომება.

ჩვენ უკვე ვიცით, რომ ტემპერატურა სითბური მოძრაობის ინტენსივობის რაღაც საზომს წარმოადგენს. ახლა კი ვხედავთ, რომ იდეალური გაზით სავსე თერმომეტრით ტემპერატურის გაზომვა, ამ საზომს მეტისმეტად მარტივ აზრს ანიჭებს. ტემპერატურა მოლეკულების გადატანითი მოძრაობის საშუალო ენერგიის პროპორციულია.

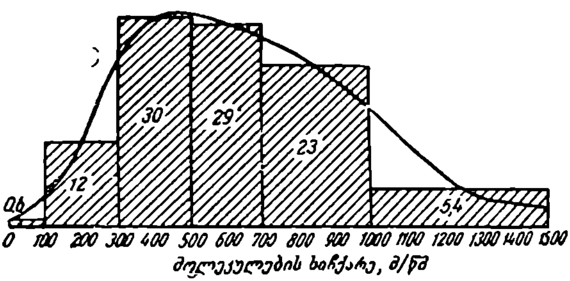
განვსაზღვროთ ჟანგბადის მოლეკულების საშუალო სიჩქარე ოთახის ტემპერატურის პირობებში და ეს ტემპერატურა დამრგვალებული ანგარიშისათვის 27°C=300°K ტოლად მივიღოთ. ჟანგბადის მოლეკულური წონა 32, ასე რომ, ერთი მოლეკულის წონა $32/6\cdot 10^{23}$ ტოლი იქნება. მარტივი გამოთვლა გვაძლევს $v_{საშ}=4,8\cdot 10^4$ სმ/წმ, ანუ დაახლოებით 500 მ/წმ. გაცილებით სწრაფად მოძრაობენ წყალბადის მოლეკულები. მათი მასა 16-ჯერ უფრო მცირეა და სიჩქარე $\sqrt{16}=4$-ჯერ მეტი, ანუ ოთახის ტემპერატურაზე დაახლოებით 2 კმ/წმ

შეადგენს. ვიანგარიშოთ, რა სითბური სიჩქარით მოძრაობს მცირე ნაწილაკი, რომელიც მიკროსკოპში ჩანს. ჩვეულებრივი მიკროსკოპი საშუალებას გვაძლევს დავინახოთ მტვრის ნაწილაკი, რომლის დიამეტრი 1 მიკრონია (10^{-4} სმ). ასეთი ნაწილაკის მასა, თუ სიმკვრივე დაახლოებით ერთის ტოლია, $5 \cdot 10^{-13}$ გ შეადგენს. მისი სიჩქარისთვის მივიღებთ 0,5 სმ/წმ მახლობელ მნიშვნელობას. საკვირველი არ არის, რომ ასეთი მოძრაობა სავსებით შესამჩნევი იყოს.

0,1 გ მასის მარცვლისთვის ბროუნის მოძრაობის სიჩქარე მხოლოდ 10^{-6} სმ/წმ იქნება. ამიტომ, სულაც არ არის საკვირველი, რომ ვერ ვხედავთ ასეთი ნაწილაკების ბროუნის მოძრაობას.

ჩვენ ვლაპარაკობდით ნაწილაკების მოძრაობის საშუალო სიჩქარეზე. მაგრამ ყველა მოლეკულა ხომ ერთნაირი სიჩქარით არ მოძრაობს, მოლეკულების რაღაც ნაწილი უფრო სწრაფად მოძრაობს, რაღაც ნაწილი კი უფრო ნელა. ყველაფერი ეს თურმე შეიძლება გამოვიანგარიშოთ. მოვიყვანთ მხოლოდ შედეგებს.

მაგალითად, 15°C ტემპერატურის პირობებში აზოტის მოლეკულების საშუალო სიჩქარე 500 მ/წმ ტოლია; 300-დან 700 მ/წმ-დე სიჩქარით მოძრაობს მოლეკულების 59%. მცი-



ნახ. 96.

რე სიჩქარით — 0-დან 100 მ/წმ-დე მოლეკულების მხოლოდ 0,6%. სწრაფი მოლეკულები, რომელთა სიჩქარე გაზში 1000 მ/წმ აღემატება, მხოლოდ 5,4% (ნახ. 96).

შეიძლება გამოვიანგარიშოთ აგრეთვე მოლეკულების განაწილება მოძრაობის გადატანითი ენერგიის სხვადასხვა მნიშვნელობების მიხედვით.

მოლეკულების რიცხვი, რომელთა ენერგია საშუალოზე ორჯერ მეტია, უკვე 10%-ზე ნაკლებია. კიდევ უფრო „ენერგიული" მოლეკულების წილი სულ უფრო მზარდი ხარისხით დნება. მაგალითად, მოლეკულების რიცხვი, რომელთა ენერგიები 4-ჯერ აღემატება საშუალოს, — სულ 0,7%-ია, საშუალოზე 8-ჯერ მეტის — $0{,}06 \cdot 10^{-4}$%, საშუალოზე 16-ჯერ მეტის — $2 \cdot 10^{-8}$%.

11 კმ/წმ სიჩქარით მოძრავი ჟანგბადის მოლეკულის ენერგია $32 \cdot 10^{-12}$ ერგის ტოლია. მოლეკულის საშუალო ენერგია ოთახის ტემპერატურაზე მხოლოდ $6 \cdot 10^{-14}$ ერგის ტოლია. ამრიგად, „თერთმეტკილომეტრიანი მოლეკულის" ენერგია სულ ცოტა 500-ჯერ მეტია საშუალო სიჩქარის მქონე მოლეკულის ენერგიაზე. გასაკვირი არ არის, რომ 11 კმ/წმ მეტი სიჩქარის მქონე მოლეკულების ნაწილი წარმოუდგენლად მცირე — 10^{-300} რიგის რიცხვის ტოლია.

მაგრამ რატომ დავინტერესდით 11 კმ/წმ სიჩქარით? 192-ე გვერდზე ჩვენ ვთქვით, რომ დედამიწას მხოლოდ ისეთი სხეულები შეიძლება მოსწყდნენ, რომლებსაც ეს სიჩქარე აქვთ. მაშასადამე, დიდ სიმაღლეზე ასულ მოლეკულებს შეუძლიათ დაკარგონ კავშირი დედამიწასთან და შორეულ პლანეტათშორის მოგზაურობაში გაეშურონ, მაგრამ ამისთვის მათ უნდა ჰქონდეთ 11 კმ/წმ სიჩქარე. ასეთი სწრაფი მოლეკულების რაოდენობა, როგორც ვხედავთ, იმდენად უმნიშვნელოა, რომ დედამიწას მილიარდი წლების შემდეგაც კი არ მოელის ატმოსფეროს დაკარგვის საშიშროება.

ატმოსფეროს გაბნევის სიჩქარე დიდად არის დამოკიდებული გრავიტაციულ ენერგიაზე $\gamma \frac{Mm}{r}$. თუ მოლეკულის საშუალო კინეტიკური ენერგია მრავალჯერ ნაკლებია გრავიტაციულ ენერგიაზე, მაშინ მოლეკულების მოწყვეტა პრაქტიკულად შეუძლებელია. მთვარის ზედაპირზე გრავიტაციული ენერგია 20-ჯერ ნაკლებია, რაც ჟანგბადის მოლეკულის „გაქცევის" ენერგიისათვის $1.5 \cdot 10^{-12}$ ერგის ტოლ მნიშვნელო-

ბას იძლევა. ეს მნიშვნელობა მოლეკულის საშუალო კინეტიკურ ენერგიას მხოლოდ 20—25-ჯერ აღემატება. მოლეკულების ნაწილი, რომლებსაც შეუძლიათ მთვარეს მოსწყდნენ, ტოლია 10^{-17}. ეს უკვე სულაც არ არის 10^{-300}, და გამოთვლა გვიჩვენებს, რომ ჰაერი საკმაოდ სწრაფად წავა პლანეტათშორის სივრცეში. გასაკვირი არ არის, რომ მთვარეზე არ არსებობს ატმოსფერო.

სითბური გაფართოება

თუ სხეულს გავათბობთ, მაშინ ატომები (მოლეკულები) უფრო ინტენსიურად ამოძრავდებიან. ისინი უბიძგებენ ერთმანეთს და მეტ ადგილს დაიკავებენ. სწორედ ამით აიხსნება კარგად ცნობილი ფაქტი: გათბობისას მყარი, თხევადი და გაზისებური სხეულები ფართოვდებიან.

გაზების სითბური გაფართოების შესახებ ბევრს აღარ ვილაპარაკებთ: ტემპერატურის პროპორციულობა გაზის მოცულობისადმი ხომ ჩვენი ტემპერატურული სკალის საფუძვლად მივიღეთ.

$V = \frac{v_0}{273} \cdot T$ ფორმულიდან ვხედავთ, რომ გაზის მოცულობა მუდმივი წნევის პირობებში 1°C-ით გათბობისას იზრდება იმ მოცულობის 1/273 ნაწილით (ანუ 0,0037-ით), რომელიც მის: 0°C-ზე ეკავა (ამ დებულებას ხანდახან გეი-ლუსაკის კანონს უწოდებენ).

ჩვეულებრივ პირობებში, ე. ი. ოთახის ტემპერატურაზე და ნორმალური ატმოსფერული წნევისას, სითხეთა უმრავლესობის გაფართოება გაზების გაფართოებაზე დაახლოებით ორჯერ-სამჯერ ნაკლებია.

ჩვენ უკვე არაერთხელ გვქონდა ლაპარაკი წყლის გაფართოების თავისებურებაზე. გაფართოების პროცესში 0°-დან 4°C-მდე წყლის მოცულობა მცირდება. წყლის გაფართოების ეს თავისებურება უზარმაზარ როლს ასრულებს დედამიწაზე სიცოცხლის განვითარებაში. შემოდგომით წყლის გაცივებასთან ერთად ზედა გაცივებული ფენები უფრო მკვრივდება და

ძირს ჩადის. მათ ადგილს იკავებს ქვემოდან ამოსული უფრო თბილი წყალი. მაგრამ ასეთი შერევა მხოლოდ მანამდე გრძელდება, ვიდრე წყლის ტემპერატურა 4°C-მდე არ დაეცემა. ტემპერატურის შემდგომი დაცემის გამო ზედა ფენები უკვე აღარ შეიკუმშება, მაშასადამე, აღარც დამძიმდება და ძირზეც აღარ დაეშვება. ამ ტემპერატურიდან დაწყებული, ზემოთა ფენა თანდათანობით ცივდება, აღწევს ნულ გრადუსს და იყინება.

წყლის მხოლოდ ეს თავისებურება აფერხებს მდინარეების ფსკერამდე გაყინვას. წყალმა რომ უეცრად დაკარგოს თავისი შესანიშნავი თავისებურება, ღარიბი ფანტაზიაც კი საკმარისია იმის წარმოსადგენად, რა სავალალო შედეგებს მივიღებთ.

მყარი სხეულების გაფართოება მნიშვნელოვნად ნაკლებია სითხეების სითბურ გაფართოებაზე და ასეულ და ათასეულჯერ ნაკლები — გაზების გაფართოებაზე.

ხშირად სითბური გაფართოება ხელისშემშლელი და არასასურველი მოვლენაა. მაგალითად, საათის მექანიზმის მოძრავი ნაწილების ზომების შეცვლა ტემპერატურის ცვლისას საათის სვლას შეცვლიდა, ამ ფაქიზი დეტალებისათვის სპეციალურ შენადნობს — ინვარს რომ არ იყენებდნენ (ინვარიანტული ქართულად ნიშნავს უცვლელს, აქედან გასაგებია სახელწოდებაც „ინვარი“). ინვარი ფოლადია, რომელიც დიდი რაოდენობით შეიცავს ნიკელს. მას ფართოდ იყენებენ ხელსაწყოთმშენებლობაში. ინვარის ღერო თავისი სიგრძით მხოლოდ ერთი მემილიონედი ნაწილით გრძელდება ტემპერატურის 1°C-ით შეცვლისას.

მყარი სხეულების ერთი შეხედვით უმნიშვნელო გაფართოებას სერიოზული შედეგების გამოწვევა შეუძლია. საქმე ისაა, რომ ძნელია ხელი შეუშალო მყარი სხეულების სითბურ გაფართოებას მათი მცირე კუმშვადობის გამო.

ფოლადის ღეროს 1°C-ით გათბობის შედეგად მისი სიგრძე სულ ერთი მეათასედით, ე. ი. თვალით შეუმჩნეველი სიდიდით იზრდება. მაგრამ გაფართოებისთვის წინააღმდეგობის გასაწევად და ღეროს ერთი მეათასედით შესაკუმშად საჭიროა 20 კგ-ძალა 1 სმ^2-ზე. და ეს მხოლოდ იმისთვის, რომ

გავაბათილოთ ტემპერატურის მხოლოდ 1°C-ით გაზრდის მოქმედება!

სითბური გაფართოების გამო წარმოშობილ განმბრჯენ ძალებს, თუ მათ ანგარიშს არ გავუწევთ, შეუძლიათ გამოიწვიონ მსხვრევა და კატასტროფები. მაგალითად, ასეთი ძალების მოქმედების თავიდან ასაცილებლად რკინიგზაზე რელსებს ღრეჩოს უტოვებენ. ამ ძალების არსებობა უნდა გვახსოვდეს მინის ჭურჭლის ხმარებისას, რადგან იგი ადვილად სკდება არათანაბარი გათბობის შედეგად. ამის გამო ლაბორატორიულ პრაქტიკაში იხმარება აღნიშნული ნაკლისაგან დაზღვეული კვარცის მინისაგან დამზადებული ჭურჭელი (გამდნარი კვარცი წარმოადგენს კაჟბადის ჟანგს ამორფულ მდგომარეობაში). ერთნაირი გათბობის შედეგად სპილენძის ძელაკი მილიმეტრით დაგრძელდება, ხოლო კვარცის მინის ასეთივე ძელაკი თვალისათვის შეუმჩნეველი სიდიდით — 30—40 მიკრონით შეიცვლის სიგრძეს. კვარცის გაფართოება იმდენად უმნიშვნელოა, რომ კვარცის ჭურჭელი შეიძლება რამდენიმე ასეულ გრადუსზე გავახუროთ და შემდეგ სიფრთხილის გარეშე ჩავაგდოთ წყალში.

სითბოტევადობა

სხეულის შინაგანი ენერგია, ცხადია, ტემპერატურაზეა დამოკიდებული. რაც უფრო მეტად გვსურს სხეულის გათბობა, მით მეტი სითბოა ამისათვის საჭირო. სხეულის T_1-დან T_2-მდე გასათბობად მას უნდა გადაეცეს სითბოს სახით Q ენერგია, რომელიც ტოლია

$$Q = C(T_2 - T_1).$$

აქ C არის პროპორციულობის კოეფიციენტი, რომელსაც სხეულის სითბოტევადობა ეწოდება. ფორმულიდან გამომდინარეობს სითბოტევადობის ცნების განსაზღვრა: C არის სითბოს რაოდენობა, რომელიც საჭიროა ტემპერატურა 1°C-ით ასაწევად. სითბოტევადობა თვითონაც ტემპერატურაზეა დამოკიდე-

ბული: გათბობას 0-დან 1°C-მდე, ან 100-დან 101°C-მდე, სითბოს რამდენადმე განსხვავებული რაოდენობა ესაჭიროება.

სიდიდეებს ჩვეულებრივად ერთ გრამს უფარდებენ და ხვედრით სითბოტევადობას უწოდებენ. მაშინ მათ ნუსხური c ასოებით აღნიშნავენ ხოლმე.

m მასის მქონე სხეულის გათბობაზე დახარჯული სითბოს რაოდენობა ჩაიწერება ფორმულით:

$$Q=mc(T_2-T_1).$$

მომავალში ჩვენ ვისარგებლებთ ხვედრითი სითბოტევადობის ცნებით, მაგრამ სიმოკლისათვის ვიტყვით ხოლმე „სხეულის სითბოტევადობა". დამატებითი ორიენტირის როლს ყოველთვის სიდიდის განზომილება შეასრულებს.

სითბოტევადობათა მნიშვნელობები საკმაოდ ფართო ფარგლებში იცვლება. ცხადია, წყლის სითბოტევადობა კალორიებში გრადუსზე განსაზღვრის მიხედვით 1 ტოლია.

სხეულთა უმრავლესობის სითბოტევადობა წყლისაზე ნაკლებია. მაგალითად, ზეთების, სპირტებისა და სხვა სითხეების უმრავლესობისთვის სითბოტევადობა 0,5 კალ/გ.გრად უახლოვდება. კვარცის, მინის, ქვიშის სითბოტევადობები 0,2 რიგისაა. რკინისა და სპილენძის სითბოტევადობა დაახლოებით 0,1 კალ/გ.გრად ტოლია. აი, ზოგიერთი გაზის სითბოტევადობათა მნიშვნელობები: წყალბადი — 3,4 კალ/გ. გრად, ჰაერი — 0.24 კალ/გ. გრად.

ყველა სხეულის სითბოტევადობა, როგორც წესი, ტემპერატურის კლებისას მცირდება და აბსოლუტურ ნულთან მიახლოებული ტემპერატურისას სხეულთა უმრავლესობისათვის მეტად მცირე მნიშვნელობას იძენს. მაგალითად, სპილენძის სითბოტევადობა 20°K ტემპერატურაზე მხოლოდ 0,0035 ტოლია; ეს ოცდაათხჯერ ნაკლებია მის სითბოტევადობაზე ოთახის ტემპერატურისას.

სითბოტევადობათა მნიშვნელობების ცოდნა შეიძლება გამოგვადგეს სხეულთა შორის სითბოს განაწილებაზე სხვადასხვა ამოცანების გადაწყვეტისას.

წყლისა და ნიადაგის სითბოტევადობათა სხვადასხვაობა წარმოადგენს ზღვისა და კონტინენტის ჰაებს შორის განსხვავების განმსაზღვრელ ერთ-ერთ მიზეზს. წყალს ნიადაგთან შედარებით ხუთჯერ მეტი სითბოტევადობა აქვს, ამიტომ იგი ნელა თბება და ასევე ნელა ცივდება.

ზაფხულობით ზღვისპირა რაიონებში წყალი ხმელეთზე ნელა თბება და ჰაერს აგრილებს, ზამთრობით კი თბილი ზღვა თანდათანობით ცივდება, სითბოს ჰაერს აძლევს და ყინვას არბილებს. ადვილი გამოსათვლელია, რომ 1 $მ^3$ ზღვის წყალი 1°C-ით გაცივებისას 1°C-ით გაათბობს 3000 $მ^3$ ჰაერს. ამის გამო ზღვისპირა რაიონებში ტემპერატურის რყევა და ზამთრისა და ზაფხულის ტემპერატურას შორის განსხვავება ნაკლებ მნიშვნელოვანია, ვიდრე კონტინენტალურ რაიონებში.

სითბოგამტარობა

ყოველ სხეულს შეუძლია შეასრულოს იმ „ხიდის“ როლი, რომლითაც სითბო მეტად გამთბარი სხეულიდან ნაკლებად გამთბარ სხეულში გადავა.

ასეთ ხიდს წარმოადგენს, მაგალითად, ჩაის კოვზი ცხელ ჩაიში. ლითონის სხეულები ძალიან კარგად ატარებენ სითბოს. ჭიქაში ჩაშვებული კოვზის ბოლო ერთი წამის შემდეგ უკვე გამთბარია.

როცა საჭიროა რაიმე ცხელი ნარევის მორევა, სარეველას სახელური ხისგან ან პლასტმასისგან უნდა გაკეთდეს. ეს მყარი სხეულები სითბოს 1000-ჯერ უფრო ცუდად ატარებენ, ვიდრე ლითონები. ჩვენ ვამბობთ, სითბოს ატარებენო, მაგრამ ასეთივე უფლებით შეიძლებოდა გვეთქვა, სიცივეს ატარებენ. რასაკვირველია, სხეულის თვისებები არ იცვლება იმისგან, თუ რა მიმართულებით მიედინება შიგ სითბოს ნაკადი. ყინვიან დღეებში ჩვენ ვერიდებით და შიშველი ხელით არ ვეხებით გარეთ ლითონებს, მაგრამ ყოველგვარი სიფრთხილის გარეშე ვკიდებთ ხელს ხის სახელურს.

სითბოს ცუდ გამტარებს — მათ სითბოს იზოლატორებსაც უწოდებენ — განეკუთვნება ხე, აგური, მინა, პლასტმასები.

ამ მასალებისაგან აკეთებენ სახლების, ღუმელებისა და მაცივრების კედლებს.

სითბოს კარგ გამტარებს მიეკუთვნება ყველა ლითონი. საუკეთესო გამტარებს წარმოადგენენ სპილენძი და ვერცხლი — ისინი სითბოს რკინაზე ორჯერ უფრო უკეთ ატარებენ.

ცხადია, სითბოს გადასასვლელ „ხიდად" შეიძლება გამოდგეს არა მარტო მყარი სხეული. სითხეებიც ატარებენ სითბოს, მაგრამ ლითონებზე გაცილებით უარესად. თბოგამტარობის მიხედვით ლითონები რამდენიმე ასეულჯერ სჯობნიან არალითონურ მყარ და თხევად სხეულებს.

წყლის ცუდი თბოგამტარობის საჩვენებლად ასეთ ცდას ატარებენ. წყლიანი სინჯარის ძირზე ამაგრებენ ყინულის ნაჭერს, ხოლო სინჯარის ზედა ნაწილს გაზის სანთურზე ათბობენ — წყალი დუღილს იწყებს, ხოლო ყინული არც კი ფიქრობს გადნობას. სინჯარაში რომ წყალი არ ყოფილიყო და იგი ლითონისგან დაემზადებინათ, მაშინ ყინულის ნაჭერი თითქმის მაშინვე დაიწყებდა დნობას. წყალი სპილენძთან შედარებით დაახლოებით ორასჯერ უფრო ცუდად ატარებს სითბოს.

გაზები სითბოს რამდენიმე ათეულჯერ უარესად ატარებენ, ვიდრე კონდენსირებული არალითონური სხეულები. ჰაერის თბოგამტარობა სპილენძისაზე 20.000-ჯერ ნაკლებია.

გაზების ცუდი თბოგამტარობა საშუალებას გვაძლევს ხელში ავიღოთ მშრალი ყინულის ნაჭერი, რომლის ტემპერატურა — 78°C, და ხელისგულზე დავიჭიროთ თხევადი აზოტის წვეთიც კი, რომლის ტემპერატურა — 196°C. თუ ამ ცივ სხეულებს თითებს არ მოვუჭერთ, ხელი არ „დაგვეწვება". საქმე ისაა, რომ ძალიან ენერგიული დუღილისას სითხის წვეთი ან მყარი სხეულის ნაჭერი „ორთქლის პერანგით" იფარგლება და წარმოქმნილი გაზის ფენა თბოიზოლატორის როლს ასრულებს.

სითხის სფეროიდული მდგომარეობა — ასე უწოდებენ მდგომარეობას, როდესაც წვეთები ორთქლით არის შემობურული, — იმ შემთხვევაში წარმოიშობა, თუ წყლას ძალიან ცხელ ტაფაზე დავასხამთ. ხელისგულზე დაცემული მდუღარე წყლის წვეთი ძლიერად წვავს ხელს, თუმცა მდუ-

ღარე წყლისა და ადამიანის სხეულის ტემპერატურათა შორის სხვაობა ნაკლებია ხელისა და თხევადი ჰაერის ტემპერატურებს შორის სხვაობაზე. ხელი მდუღარე წყლის წვეთზე ცივია, სითბო გადადის წვეთიდან, დუღილი წყდება და ორთქლის პერანგი აღარ წარმოიშობა.

ადვილი გასაგებია, რომ სითბოს საუკეთესო იზოლატორია ვაკუუმი — სიცარიელე. სიცარიელეში არ არიან სითბოს გადამტანები და სითბოგამტარობაც უმცირესია.

მაშასადამე, თუ ჩვენ გვსურს სითბური დაცვის შექმნა, გვინდა დავიცვათ თბილი ცივისაგან და ცივი თბილისაგან, უმჯობესი იქნება, დავამზადოთ ორმაგკედლებიანი გარსი და კედლებს შუა სივრციდან ჰაერი გამოვტუმბოთ. ამ დროს ჩვენ შემდეგ საინტერესო გარემოებას ვხვდებით. თუ გაზის გაიშვიათების პროცესში მის თბოგამტარობას დავაკვირდებით, ვნახავთ, რომ იმ მომენტამდე, ვიდრე წნევა ვერცხლისწყლის სვეტის რამდენიმე მილიმეტრის ტოლი არ გახდება, თბოგამტარობა პრაქტიკულად არ შეიცვლება და მხოლოდ უფრო მაღალ ვაკუუმზე გადასვლისას გამართლდება ჩვენი იმედები — თბოგამტარობა მკვეთრად დაეცემა.

რატომ ხდება ასე?

ამ მოვლენაში გასარკვევად ვცადოთ თვალსაჩინოდ წარმოვიდგინოთ, თუ რაში მდგომარეობს სითბოს გადატანის მოვლენა გზაში.

გამთბარი ადგილიდან ცივ ადგილზე სითბოს გადაცემა ერთი მოლეკულიდან მისი მეზობელი მოლეკულისთვის ენერგიის გადაცემის გზით ხორციელდება. გასაგებია, რომ სწრაფი მოლეკულების ნელ მოლეკულებთან შეჯახების შედეგია ნელი მოლეკულების აჩქარება და სწრაფი მოლეკულების შენელება. სწორედ ეს იწვევს, ცხელი ადგილის გაცივებასა და ცივის გათბობას.

როგორ გავლენას ახდენს წნევის შემცირება სითბოს გადაცემაზე? იმის გამო, რომ წნევის შემცირებას სიმკვრივის კლება მოსდევს, შემცირდება აგრეთვე სწრაფი მოლეკულების ნელ მოლეკულებთან შეხვედრათა რიცხვიც, რის დრო-

საც ენერგია გადაიცემა. ეს თბოგამტარობას შეამცირებს. მაგრამ, მეორე მხრივ, წნევის შემცირება იწვევს მოლეკულების თავისუფალი განარბენის ზრდას და, ამრიგად, სითბოც უფრო მეტ მანძილზე გადადის, ეს კი ხელს უწყობს თბოგამტარობის გადიდებას. გამოთვლა გვიჩვენებს, რომ ორივე ეფექტი ერთმანეთს აწონასწორებს და სითბოს გადაცემის უნარი ჰაერის ამოტუმბვის პროცესში ერთ ხანს არ იცვლება.

ასე იქნება მანამ, ვიდრე ვაკუუმი იმდენად მნიშვნელოვანი არ გახდება, რომ თავისუფალი განარბენის სიგრძე ჭურჭლის კედლებს შორის მანძილს გაუტოლდეს. ამის შემდეგ წნევის შემდგომ შემცირებას უკვე აღარ შეუძლია თავისუფალი განარბენის სიგრძის შეცვლა იმ მოლეკულებისათვის, რომლებიც კედლებს შორის „ირყევიან", სიმკვრივის კლება აღარ „წონასწორდება", თბოგამტარობა სწრაფად ეცემა წნევის პროპორციულად და სულ უმნიშვნელო სიდიდეს აღწევს მაღალი ვაკუუმის პირობებში. სწორედ ვაკუუმის გამოყენებას ემყარება თერმოსის მოწყობილობა. თერმოსები ფართოდ არის გავრცელებული, მათ იყენებენ არა მარტო ცხელი და ცივი საჭმლის შესანახად, არამედ მეცნიერებასა და ტექნიკაშიც. ამ შემთხვევაში, გამომგონებლის პატივსაცემად, მათ დიუარის ჭურჭლებს უწოდებენ. ასეთი ჭურჭლით (ხანდახან მას პირდაპირ დიუარს უწოდებენ) გადააქვთ თხევადი ჰაერი, აზოტი, ჟანგბადი. მოგვიანებით ჩვენ გიამბობთ, როგორ იღებენ ამ გაზებს თხევად მდგომარეობაში [1].

---

[1] ვისაც თერმოსის ბალონები გინახავთ, შეამჩნევდით, რომ მათ ყოველთვის მოვერცხლილი კედლები აქვთ. რისთვის? საქმე ისაა, რომ თბოგამტარობა სითბოს გადაცემის ერთადერთ საშუალებას არ წარმოადგენს. არსებობს გადაცემის კიდევ სხვა საშუალებაც, რომლის შესახებ სხვა წიგნში ვილაპარაკებთ. ეს გახლავთ ეგრეთ წოდებული გამოსხივება. ჩვეულებრივ პირობებში იგი ბევრად უფრო სუსტია, ვიდრე თბოგამტარობა, მაგრამ მაინც სავსებით შესამჩნევია. სწორედ გამოსხივების გავლენის შესასუსტებლად არის თერმოსის კედლები მოვერცხლილი.

კონვექცია

თუ წყალი სითბოს ასეთი ცუდი გამტარია, მაშ როგორღა თბება ჩაიდანში? ჰაერი კიდევ უფრო ცუდად ატარებს სითბოს; მაშინ გაუგებარია რატომ არის, რომ ზამთარში ოთახის ყველა ნაწილი ერთნაირად თბება?

წყალი ჩაიდანში სწრაფად დუღდება დედამიწის მიზიდულობის გამო. წყლის ქვედა ფენები გათბობის შედეგად ფართოვდება, მსუბუქდება და ზევით ამოდის, მათ ადგილს კი ცივი წყალი იკავებს. სწრაფი გათბობა მხოლოდ კონვექციის წყალობით ხდება (ეს ლათინური სიტყვაა და „შერევას" ნიშნავს). საპლანეტათშორისო რაკეტაში ჩაიდნით წყლის გათბობა არც ისე ადვილი იქნება.

წყლის კონვექციის ერთ შემთხვევაზე ჩვენ ცოტა ადრეც ვილაპარაკეთ, ამ სიტყვის დაუსახელებლად, როდესაც ავხსენით, თუ რატომ არ იყინება მდინარეები ფსკერამდე. რატომ არის, რომ ცენტრალური გათბობის ბატარეებს ყოველთვის იატაკთან ათავსებენ, საჰაერო სარკმელს კი ფანჯრის ზედა ნაწილში? ამ სარკმლის გაღება ხომ ქვევით უფრო მოსახერხებელი იქნებოდა, ხოლო ჭერქვეშ მოთავსებული ბატარეები ხელს არაფერში შეგვიშლიდა.

ასეთი რჩევის მიღებისას ძალიან მალე აღმოვაჩენდით, რომ ოთახი ბატარეებით არ თბება და არც სარკმლით ნიავდება.

ოთახის ჰაერში იგივე პროცესი მიმდინარეობს, რაც ჩაიდანში ჩასხმულ წყალში. როდესაც ცენტრალური გათბობის ბატარეა ჩაირთვება, იწყება ოთახის ქვედა ფენების ჰაერის გათბობა. იგი ფართოვდება, მსუბუქდება და ზევით, ჭერისკენ ადის. მის ადგილს უფრო მძიმე ჰაერის ცივი ფენები იკავებს. გათბობის შემდეგ ისინიც ჭერისკენ მიემართებიან. ამრიგად, ოთახში წარმოიშობა ჰაერის განუწყვეტელი დინება — თბილისა ქვევიდან ზევით და ცივისა ზევიდან ქვევით. როდესაც ზამთარში სარკმელს ვაღებთ, ოთახში ცივი ჰაერის ნაკადი შემოდის. იგი ოთახის ჰაერზე მძიმეა და ქვევით ეშვება, სდევნის თბილ ჰაერს, რომელიც ზევით მიემართება და სარკმლიდან გადის.

ნავთის ლამპა მხოლოდ მაშინ ანთია კარგად, როდესაც ზედ მაღალი შუშა ახურავს. ნუ გგონიათ, რომ შუშა მხოლოდ ნიავისგან ალის დასაცავად არის საჭირო. სრულიად წყნარ ამინდშიც სინათლის სიკაშკაშე მყისვე მატულობს, როგორც კი ლამპას შუშას დავახურავთ. შუშის დანიშნულება გააძლიეროს ჰაერის მოდენა ცეცხლის ალთან — შექმნას ჰაერის წევა. ეს იმიტომ ხდება, რომ შუშის შიგნით წვისთვის დახარჯული ჟანგბადით გაღარიბებული ჰაერი სწრაფად თბება და ზევით მიდის, ხოლო მის ადგილს იკავებს სუფთა ცივი ჰაერი, რომელიც ლამპის სანთურაში გაკეთებული ნასვრეტებიდან შედის.

რაც უფრო მაღალია შუშა, მით უკეთ ანთია ლამპა. მართლაც, ჰაერის ცივი ნაკადის შედენის სისწრაფე დამოკიდებულია ლამპის შიგნით ჰაერის გამთბარი სვეტისა და ლამპის გარეთ მყოფი ცივი ჰაერის წონათა სხვაობაზე. რაც უფრო მაღალია ჰაერის სვეტი, მით მეტი იქნება წონათა ეს სხვაობა, და მასთან ერთად შერევის სისწრაფეც.

სწორედ ამიტომ უკეთებენ ქარხნებს მაღალ მილებს. ქარხნების საცეცხლისათვის ჰაერის განსაკუთრებით ძლიერი მოდენა და კარგი წევაა საჭირო, რაც სწორედ მაღალი მილების მეშვეობით მიიღება.

რაკეტაში, სადაც სიმძიმე არ არსებობს, არც კონვექცია არსებობს და ამიტომ შეუძლებელია ასანთის, ლამპებისა და გაზის სანთურების გამოყენება: წვის პროდუქტები დაახრჩობენ ცეცხლის ალს.

ჰაერი ცუდი გამტარია; მისი დახმარებით ჩვენ შეგვიძლია შევინარჩუნოთ სითბო, მაგრამ ერთი პირობით: თუ თავიდან ავიცილებთ კონვექციას — თბილი და ცივი ჰაერის შერევას, რაც აბათილებს ჰაერის თბოიზოლაციურ თვისებებს.

კონვექციის თავიდან აცილება შეიძლება სხვადასხვაგვარი ფოროვანი და ბოჭკოვანი სხეულების საშუალებით. ასეთი სხეულების შიგნით ჰაერს უჭირს მოძრაობა. ყველა სხეული კარგია როგორც თბოიზოლატორი მხოლოდ და მხოლოდ თავისი უნარის გამო დააკავოს ჰაერის ფენა. თვით ბოჭკოს ან კედლების ნივთიერების სითბოგამტარობა კი შეიძლება არც ძალიან მცირე იყოს.

კარგია სქელი ბეწვის ქურქი, უამრავ ბოჭკოს რომ შეიცავს; სუსხურის გერმა საშუალებას იძლევა დავამზადოთ თბილი საძილე ტომრები, რომელთა წონაც ბოჭკოს განსაკუთრებული სიწმინდის წყალობით ნახევარ კილოგრამზე ნაკლებია. ამ ბუმბულის ნახევარ კილოგრამს შეუძლია იმდენივე ჰაერი „დააკავოს", რამდენსაც ათი კილოგრამი ვატინი აკავებს.

კონვექციის შესამცირებლად ორმაგ ჩარჩოებს აკეთებენ. მინებს შორის მოთავსებული ჰაერი არ მონაწილეობს ოთახის ჰაერის მასების შერევაში.

პირიქით, ჰაერის ყოველგვარი მოძრაობა აძლიერებს შერევასაც და სითბოს გადაცემასაც. სწორედ ამიტომ, როდესაც გვსურს, სითბო სწრაფად მოვიცილოთ, მარაოს ვინიავებთ ან ვენტილიატორს ვრთავთ. ამიტომ არის, რომ სიცივე ქარში უფრო საგრძნობია. მაგრამ თუ ჰაერის ტემპერატურა ჩვენი სხეულის ტემპერატურაზე უფრო მაღალია, შერევა საწინააღმდეგო შედეგს მოგვცემს და ქარს ისე შევიგრძნობთ, როგორც ცხელ სუნთქვას.

ორთქლის ქვაბის დანიშნულებაა რაც შეიძლება სწრაფად მოგვცეს საჭირო ტემპერატურამდე გაცხელებული ორთქლი. ბუნებრივი კონვექცია სიმძიმის ველში ამისათვის სრულიად არ არის საკმარისი. ამიტომაც წყლისა და ორთქლის ინტენსიური ცირკულაციის შექმნა, რაც ცხელი და ცივი ფენების შერევას იწვევს, ქვაბების კონსტრუირების დროს ერთ-ერთ ძირითად ამოცანას წარმოადგენს.

XII. ნივთიერებების მდგომარეობები

რკინის ორთქლი და მყარი ჰაერი

სიტყვების უცნაური შეხამებაა, ხომ მართალია? მაგრამ ეს სულაც არ არის უაზრობა: ბუნებაში რკინის ორთქლიც არსებობს და მყარი ჰაერიც, მაგრამ, რასაკვირველია, არა ჩვეულებრივ პირობებში.

რა პირობები იგულისხმება აქ? ნივთიერების მდგომარეობა ორი გარემოებით განისაზღვრება: ტემპერატურით და წნევით.

ჩვენი ცხოვრება შედარებით ნაკლებ ცვალებად პირობებში მიმდინარეობს. ჰაერის წნევა ერთი ატმოსფეროს (1 კგ-ძალა/სმ²) მახლობლად მერყეობს რამდენიმე პროცენტის ფარგლებში; ჰაერის ტემპერატურა, ვთქვათ, მოსკოვის რაიონში არ სცილდება —30°-დან +30°-მდე ინტერ-

ვალს; ხოლო ტემპერატურების აბსოლუტური სკალით, რომელშიც ნულად მიღებულია ყველაზე დაბალი შესაძლო ტემპერატურა (—273°), ეს ინტერვალი ნაკლებ მნიშვნელოვანი ჩანს: 240—300°K, რაც აგრეთვე საშუალო მნიშვნელობის მხოლოდ ±10% შეადგენს.

სავსებით ბუნებრივია, რომ ჩვენ შევეჩვიეთ ამ ჩვეულებრივ პირობებს და ამიტომ როდესაც ვამბობთ ისეთ უბრალო ჭეშმარიტებებს, როგორიცაა, მაგალითად: „რკინა მყარი სხეულია, ჰაერი გაზია“ და ა. შ., გვავიწყდება დავუმატოთ: „ნორმალურ პირობებში“.

რკინა რომ გავახუროთ, იგი ჯერ გადნება, ხოლო შემდეგ აორთქლდება. ჰაერი რომ გავაცივოთ, ჯერ სითხედ იქცევა, შემდეგ კი გამყარდება.

თუნდაც მკითხველს არასოდეს არ ენახოს რკინის ორთქლი და მყარი ჰაერი, ის, ალბათ, ადვილად დაიჯერებს, რომ ნებისმიერი ნივთიერება ტემპერატურის ცვლით შეიძლება მივიღოთ როგორც მყარ, ისე თხევად და გაზობრივ მდგომარეობაში, ან, როგორც კიდევ ამბობენ, მყარ, თხევად ან გაზოვან ფაზაში.

ამის დაჯერება იმიტომ არის ადვილი, რომ ერთი ნივთიერება, ურომლისოდაც დედამიწაზე სიცოცხლე შეუძლებელი იქნებოდა, ყველას უნახავს როგორც გაზის, ისე სითხის და მყარი სხეულის სახითაც. რასაკვირველია, აქ წყალზეა ლაპარაკი.

რა პირობებში ხორციელდება ნივთიერების გარდაქმნა ერთი მდგომარეობიდან მეორეში?

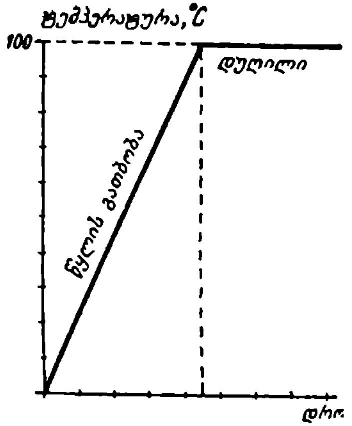
დუღილი

თერმომეტრი რომ ჩაიდანში ჩასხმულ წყალში ჩავუშვათ, ჩავრთოთ ელექტროქურა და თერმომეტრის სინდიყს თვალი ვადევნოთ, დავინახავთ შემდეგს: თითქმის მყისვე სინდიყის დონე ზევით აიწევს. აი უკვე 90—95°-ია, ბოლოს 100°. წყალი დუღილს იწყებს და ერთდროულად წყდება სინდიყის ზევით აწევა. უკვე რამდენიმე წუთია წყალი დუღს, მაგრამ

სინდიყის დონე არ იცვლება. ვიდრე მთელი წყალი არ ამოშრება, ტემპერატურა უცვლელი დარჩება (ნახ. 97).

მაშ რაზე იხარჯება სითბო, თუ წყლის ტემპერატურა არ იცვლება? პასუხი აშკარაა. ენერგია საჭიროა წყლის ორთქლად ქცევისათვის.

შევადაროთ ერთი გრამი წყლისა და მისგან წარმოქმნილი ერთი გრამი ორთქლის ენერგიები. ორთქლის მოლეკულები ერთმანეთისგან უფრო მეტად არიან დაშორებული, ვიდრე წყლის მოლეკულები. ამის გამო, ბუნებრივია, წყლის პოტენციალური ენერგია განსხვავებული იქნება ორთქლის პოტენციალური ენერგიისაგან.



ნახ. 97.

ურთიერთმიმზიდველ ნაწილაკთა პოტენციალური ენერგია მათი დაახლოების შედეგად მცირდება. ამიტომაც ორთქლის ენერგია წყლის ენერგიაზე მეტია და წყლის ორთქლად ქცევას ენერგია ესაჭიროება. ენერგიის სწორედ ამ ნაჭარბს აწვდის ელექტროქურა წყალს, რომელიც ჩაიდანში დუღს.

წყლის ორთქლად ქცევისათვის საჭირო ენერგიას აორთქლების სითბო ეწოდება. 1 გ წყლის ორთქლად ქცევისათვის საჭიროა 539 კალ (ეს არის მნიშვნელობა 100°C-თვის).

თუ ერთი გრამისათვის საჭიროა 539 კალ, მაშინ ერთ გრამ-მოლეკულა წყალზე დაიხარჯება 18.539 = 9700 კალ. სითბოს ასეთი რაოდენობა უნდა დაიხარჯოს მოლეკულათა შორის კავშირის დასარღვევად.

ეს მნიშვნელობა შეიძლება შევადაროთ იმ მუშაობის სიდიდეს, რომელიც საჭიროა მოლეკულისშიგა კავშირების დასარღვევად. იმისათვის, რომ ერთი გრამ-მოლეკულა წყლის ორთქლი ატომებად დაიშალოს, საჭიროა დაახლოებით

220.000 კალ, ანუ 25-ჯერ მეტი ენერგია. ეს უშუალოდ გვიჩვენებს თუ რამდენად სუსტია მოლეკულების ერთმანეთთან დამაკავშირებელი ძალები, ატომების მოლეკულებად დამაკავშირებელ ძალებთან შედარებით.

დუღილის ტემპერატურის დამოკიდებულება წნევისაგან

წყლის დუღილის ტემპერატურა 100°C-ის ტოლია; შეიძლება ვიფიქროთ, რომ ეს წყლის განუშორებელი თვისებაა და რა პირობებშიც არ უნდა იმყოფებოდეს იგი, ყოველთვის 100°C-ზე ადუღდება.

მაგრამ სინამდვილეში ასე არ არის და ეს ძალიან კარგად იციან მაღალმთიანი სოფლების მცხოვრებლებმა.

იალბუზის მწვერვალის მახლობლად არის პატარა სახლი ტურისტებისათვის და სამეცნიერო სადგური. ახალბედებს ხშირად უკვირთ, „რა ძნელია მდუღარე წყალში კვერცხის მოხარშვა", ან „რატომ არა გვწვავსო მდუღარე წყალი". ასეთ შემთხვევებში მათ უხსნიან, რომ იალბუზის მწვერვალზე წყალი 82°C-ზე დუღს.

რატომ? რომელი ფიზიკური ფაქტორი ერევა დუღილის მოვლენაში? რა მნიშვნელობა აქვს ზღვის დონიდან სიმაღლეს?

ამ ფიზიკურ ფაქტორს წარმოადგენს სითხის ზედაპირზე მოქმედი წნევა. საჭირო არ არის მთის წვერზე ასვლა, რომ ნათქვამის სამართლიანობა შევამოწმოთ.

თუ წყალს ზარხუფს დავახურავთ და იქიდან ჰაერს გამოვტუმბავთ, ან, პირიქით, შიგ ჩავტუმბავთ, დავრწმუნდებით, რომ დუღილის ტემპერატურა იზრდება წნევის ზრდასთან ერთად და ეცემა მისი შემცირებისას.

წყალი დუღს 100°C-ზე მხოლოდ გარკვეული წნევის — 760 მმ Hg პირობებში.

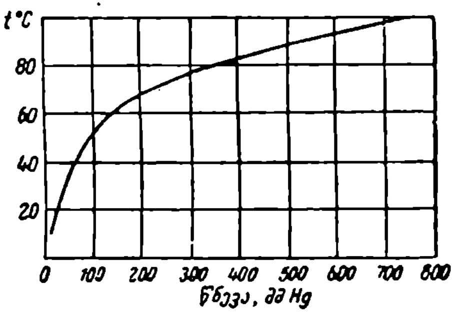
წნევისგან დუღილის ტემპერატურის დამოკიდებულების მრუდი ნაჩვენებია 98-ე ნახაზზე. იალბუზის მწვერვალზე

წნევა 0,5 ატმ ტოლია, სწორედ ამ წნევას შეესაბამება დუღილის ტემპერატურა 82°C.

წყლით, რომელიც 10—15 მმ Hg პირობებში დუღს, შეიძლება ცხელ ამინდში გაგრილება. ასეთი წნევის პირობებში დუღილის ტემპერატურა 10—15°C-მდე დაეცემა.

შეიძლება ისეთი „მდუღარე წყალიც“ კი მივიღოთ, რომელსაც წყლის გაყინვის ტემპერატურა ექნება. ამისათვის საჭიროა წნევის 4,6 მმ Hg-მდე დაწევა.

საინტერესო სურათს მივიღებთ, თუ წყლიან ღია ჭურჭელს ზარხუფის ქვეშ მოვათავსებთ და იქიდან ჰაერის ამოტუმბვას დავიწყებთ. ამოტუმბვის შედეგად წყალი ადუღდება, მაგრამ დუღილისათვის ხომ სითბოა საჭირო. სითბოს მიღება კი



ნახ. 98.

არსაიდან არ შეიძლება და წყალიც იძულებული იქნება გასცეს თავისი ენერგია. მდუღარე წყლის ტემპერატურა კლებას დაიწყებს, მაგრამ რადგანაც ამოტუმბვა გრძელდება, წნევაც თანდათან დაიკლებს. ამიტომ დუღილი არ შეწყდება, წყალი განაგრძობს გაცივებას და, ბოლოს და ბოლოს, გაიყინება.

ცივი წყალი მარტო ჰაერის ამოტუმბვის დროს როდი დუღს ასე. მაგალითად, ხომალდის სანავე ხრახნის ბრუნვისას ლითონის სწრაფად მოძრავი ზედაპირის მახლობელ წყლის ფენაში წნევა ძლიერ ეცემა და წყალი ამ ფენაში დუღილს

იწყებს, ე. ი. მასში ჩნდება ორთქლით სავსე მრავალი ბუშტულა. ამ მოვლენას კავიტაცია ეწოდება (ლათინური სიტყვიდან cavitas — სიღრუე).

წნევის დაწევით ჩვენ ვამცირებთ დუღილის ტემპერატურას. მაგრამ რომ გავზარდოთ იგი? ამ კითხვაზე ჩვენი გრაფიკის მსგავსი გრაფიკი იძლევა პასუხს. 15 ატმ ტოლ წნევას შეუძლია დააყოვნოს დუღილის დაწყება 200°C-მდე, ხოლო 80 ატმ წნევა წყალს აიძულებს მხოლოდ 300°C-ზე ადუღდეს.

ამრიგად, გარკვეულ გარეგან წნევას დუღილის გარკვეული ტემპერატურა შეესაბამება. მაგრამ ეს მტკიცება შეიძლება აგრეთვე „შევაბრუნოთ", თუ ვიტყვით, რომ წყლის დუღილის ყოველ ტემპერატურას თავისი გარკვეული წნევა შეესაბამება, ამ წნევას ორთქლის დრეკადობა ეწოდება.

მრუდი, რომელიც გამოსახავს დუღილის ტემპერატურის დამოკიდებულებას წნევისაგან, იმავე დროს წარმოადგენს ტემპერატურისაგან ორთქლის დრეკადობის დამოკიდებულების მრუდსაც.

დუღილის ტემპერატურის (ან ორთქლის დრეკადობის) მრუდებზე აღნიშნული ციფრები გვიჩვენებენ, რომ ორთქლის დრეკადობა ტემპერატურის ცვლისას ძალიან მკვეთრად იცვლება. 0°C-ზე (ე. ი. 273°K-ზე) ორთქლის დრეკადობა 4,6 მმ Hg ტოლია, 100°C-ზე (373°K) იგი უდრის 760 მმ, ე. ი. 165-ჯერ იზრდება. ტემპერატურის ორჯერ გადიდებისას (0°C-დან, ე. ი. 273°K-დან 273°C-მდე, ე. ი. 546°K-მდე), ორთქლის დრეკადობა 4,6 მმ Hg-დან თითქმის 60 ატმ-მდე იზრდება, ე. ი. დაახლოებით 10.000-ჯერ.

ამიტომაც დუღილის ტემპერატურა, პირიქით, წნევის ცვლისას საკმაოდ ნელა იცვლება. წნევის ორჯერ შეცვლისას — 0,5 ატმ-დან 1 ატმ-მდე, დუღილის ტემპერატურა იზრდება 82°C-დან (ე. ი. 355°K-დან) 100°C-მდე (ე. ი. 373°K-მდე) და ორჯერ შეცვლისას 1ატმ-დან — 2 ატმ-მდე — 100°C-დან (ე. ი. 373°K-დან) 120°C-მდე (ე. ი. 393°K-მდე).

იგივე მრუდი, რომელსაც ჩვენ ახლა ვიხილავთ, განსაზღვრავს ორთქლის წყლად კონდენსირების (შესქელების) პროცესსაც.

ორთქლი შეიძლება შეკუმშვის ან გაცივების შედეგად წყლად იქცეს.

როგორც დუღილის დროს, ასევე კონდენსაციის პროცესშიც წერტილი არ გადაინაცვლებს მრუდზე, ვიდრე ორთქლის წყლად ქცევის ან წყლის ორთქლად ქცევის პროცესი სავსებით არ დამთავრდება. ეს შეიძლება კიდევ შემდეგნაირად ჩამოვაყალიბოთ: მხოლოდ ჩვენი მრუდის პირობებშია შესაძლებელი სითხისა და ორთქლის თანაარსებობა. თუ ამ დროს ნივთიერებას არ გადავცემთ და არც წავართმევთ სითბოს, მაშინ ორთქლისა და სითხის რაოდენობა დახურულ ჭურჭელში უცვლელი დარჩება. ასეთი ორთქლისა და სითბოს შესახებ ამბობენ, რომ ისინი წონასწორობაში იმყოფებიან. ორთქლს, რომელიც წონასწორობაში იმყოფება თავის სითხესთან, ნაჯერ ორთქლს უწოდებენ.

დუღილისა და კონდენსაციის მრუდს, როგორც ვხედავთ, კიდევ ერთი აზრი აქვს — ეს არის სითხისა და ორთქლის წონასწორობის მრუდი. წონასწორობის მრუდი დიაგრამის არეს ორ ნაწილად ყოფს. მარცხნივ და ზემოთ (მეტი ტემპერატურისა და ნაკლები წნევების მხარეს) ორთქლის მდგრადი მდგომარეობის არეა, მარჯვნივ და ქვემოთ — სითხის მდგრადი მდგომარეობის არე.

მრუდი წონასწორობისა ორთქლი — სითხე, ე. ი. წნევისაგან დუღილის ტემპერატურის დამოკიდებულების, ანუ, რაც იგივეა, ტემპერატურისაგან ორთქლის დრეკადობის დამოკიდებულების მრუდი, ყველა სითხისათვის დაახლოებით ერთნაირია. ზოგ შემთხვევაში ცვლილება შეიძლება რამდენადმე უფრო მკვეთრი იყოს, სხვა შემთხვევებში — რამდენადმე უფრო ნელი, მაგრამ ორთქლის დრეკადობა ყოველთვის სწრაფად იზრდება ტემპერატურის ზრდასთან ერთად.

ჩვენ უკვე მრავალჯერ ვისარგებლეთ სიტყვებით „გაზი“ და „ორთქლი“. ეს ორი სიტყვა საკმაოდ თანასწორუფლებიანია. შეიძლება ვთქვათ: წყლის გაზი არის წყლის ორთქლი, გაზი ჟანგბადი არის ჟანგბადის სითხის ორთქლი. მაინც ამ ორი სიტყვის ხმარებისას გარკვეული ჩვევა გამოგვიმუშავდა. იმის გამო, რომ მიჩვეული ვართ ტემპერატურის გარკვეულ,

შედარებით მცირე ინტერვალს, ამიტომ სიტყვა „გაზს“ ჩვეულებრივად ისეთი ნივთიერებებისათვის ვხმარობთ, რომელთა ორთქლის დრეკადობაც ჩვეულებრივი ტემპერატურის პირობებში ატმოსფერულ წნევაზე მეტია. პირიქით, ორთქლის შესახებ მაშინ ვლაპარაკობთ, როდესაც ოთახის ტემპერატურის პირობებში და ატმოსფეროს წნევისას ნივთიერება სითხის სახით უფრო მდგრადია.

აორთქლება

დუღილი სწრაფი პროცესია, მდუღარე წყლისგან მოკლე დროში კვალიც კი აღარ რჩება, იგი ორთქლად იქცევა.

მაგრამ არსებობს სხვა მოვლენაც წყლის ან სხვა სითხის ორთქლად ქცევისა — ეს აორთქლებაა. აორთქლებას ნებისმიერ ტემპერატურაზე ვხვდებით წნევისაგან დამოუკიდებლად. წნევა ჩვეულებრივ პირობებში ყოველთვის 760 მმ Hg უახლოვდება. აორთქლება, დუღილისაგან განსხვავებით ძალიან ნელი პროცესია. თუ ოდეკოლონის ფლაკონი თავღია დაგვრჩა, იგი მხოლოდ რამდენიმე დღის შემდეგ დაცარიელდება; უფრო მეტ ხანს იდგება წყლიანი ლამბაქი, მაგრამ ადრე თუ გვიან ისიც ამოშრება.

აორთქლების პროცესში დიდ როლს ასრულებს ჰაერი. თავისთავად იგი წყალს ხელს არ უშლის აორთქლებაში. როგორც კი სითხის ზედაპირს გავხსნით, წყლის მოლეკულები მაშინვე ჰაერის უახლოეს ფენაში გადავლენ. ორთქლის სიმკვრივე ამ ფენაში სწრაფად იწყებს ზრდას; ცოტა ხანში ორთქლის წნევა გარემოს ტემპერატურისათვის დამახასიათებელ დრეკადობას გაუტოლდება. ამასთან, ორთქლის დრეკადობა ზუსტად ისეთივე იქნება, როგორც ჰაერის არარსებობის შემთხვევაში.

ჰაერში ორთქლის გადასვლა, რასაკვირველია, არ ნიშნავს წნევის ზრდას. საერთო წნევა სივრცეში წყლის ზედაპირის ზემოდან არ იზრდება, იზრდება მხოლოდ ამ წნევის წილი, რომელსაც ორთქლი იღებს საკუთარ თავზე და შესაბამისად მცირდება ორთქლის მიერ გამოდევნილი ჰაერის წილი.

წყლის ზემოთ ჰაერთან შერეული ორთქლია. უფრო ზემოთ კი—ჰაერის ფენები ორთქლის გარეშე. ისინი აუცილებლად შეერევა ერთმანეთს. წყლის ორთქლი განუწყვეტლივ გადადის უფრო მაღალ ფენებში, ხოლო მის ადგილს ქვედა ფენაში იჭერს ჰაერი, რომელიც წყლის მოლეკულებს არ შეიცავს. ამიტომ წყალთან უახლოეს ფენაში ყოველთვის თავისუფლდება ადგილი წყლის ახალი მოლეკულებისათვის. წყალი განუწყვეტლივ ორთქლდება და ზედაპირის მახლობლად წნევის მნიშვნელობისა და დრეკადობის ტოლობას იცავს. პროცესი იმდენ ხანს გრძელდება, ვიდრე წყალი მთლიანად არ აორთქლდება.

ჩვენ პირველად ოდეკალონი და წყალი ვახსენეთ. კარგად არის ცნობილი, რომ ისინი სხვადასხვა სისწრაფით ორთქლდებიან. განსაკუთრებით სწრაფად ქროლდება ეთერი, საკმაოდ სწრაფად — სპირტი და ბევრად უფრო ნელა — წყალი. ჩვენ უცებ მივხვდებით, რატომ არის ასე, თუ ცნობარში ვიპოვით ამ სითხეთა ორთქლის დრეკადობის მნიშვნელობებს, ვთქვათ, ოთახის ტემპერატურისათვის. აი, ეს მნიშვნელობები: ეთერი — 437 მმ, სპირტი — 44,5 მმ და წყალი — 17,5 მმ Hg.

რაც მეტია დრეკადობა, მით მეტია ორთქლი ჰაერის უახლოეს ფენაში და მით უფრო სწრაფად ორთქლდება სითხე. ჩვენ ვიცით, რომ ორთქლის დრეკადობა ტემპერატურის მატებასთან ერთად მატულობს. გასაგებია, რატომ მატულობს აორთქლების სიჩქარე ტემპერატურის მომატებასთან ერთად.

აორთქლების სიჩქარეზე სხვა ხერხითაც შეიძლება ვიმოქმედოთ. თუ გვსურს ხელი შევუწყოთ აორთქლებას, ორთქლი სითხეს უფრო სწრაფად უნდა მოვაცილოთ, ანუ დავაჩქაროთ ჰაერის არევა. სწორედ ამის გამო ჩქარდება აორთქლება, როცა სითხეს უბერავენ. წყალი, თუმცა მას ორთქლის შედარებით მცირე დრეკადობა აქვს, საკმაოდ სწრაფად აორთქლდება, თუ ლამბაქს ნიავზე დავდგამთ.

ამიტომ გასაგებია, რატომ სცივა ქარიან ამინდში წყლიდან ამოსულ მოცურავეს. ქარი აჩქარებს ჰაერისა და ორთქლის შერევას და, მაშასადამე, აორთქლებასაც, ხოლო

ადამიანის სხეული იძულებულია აორთქლებისათვის საჭირო სითბო გასცეს.

ადამიანის გუნებაგანწყობილება დამოკიდებულია ჰაერში წყლის ორთქლის რაოდენობაზე. როგორც მშრალი, ისე ნესტიანი ჰაერი არასასიამოვნოა. სინოტივე ნორმალურად ითვლება, როდესაც იგი 60% ტოლია. ეს ნიშნავს, რომ წყლის ორთქლის სიმკვრივე ნაჯერი წყლის ორთქლის იმ სიმკვრივის 60% შეადგენს, რომელიც იმავე ტემპერატურას შეესაბამება.

ნესტიანი ჰაერი რომ გავაციოთ, წყლის ორთქლის წნევა მასში, ბოლოს და ბოლოს, გაუტოლდება ორთქლის დრეკადობას ამ ტემპერატურაზე. ორთქლი ნაჯერი გახდება და ტემპერატურის შემდგომი შემცირებისას წყლად კონდენსირებას დაიწყებს. დილის ნამი ბალახსა და ფოთლებზე სწორედ ასეთი მოვლენის წყალობით ჩნდება.

20°C-ზე წყლის ნაჯერი ორთქლის სიმკვრივე დაახლოებით 0,00002 გ/სმ^3 ტოლია. თავს კარგად ვიგრძნობთ, თუ წყლის ორთქლი ჰაერში ამ რაოდენობის 60% შეადგენს, ე. ი. 1 სმ^3-ში მხოლოდ გრამის ერთ მეასიათასედ ნაწილზე ცოტათი მეტს.

თუმცა ეს სიდიდე მცირეა, მაგრამ ოთახისათვის წყლის საკმაოდ დიდ რაოდენობას შეიცავს. ადვილად გამოვიანგარიშებთ, რომ საშუალო ზომის ოთახში, რომლის ფართია 12 მ^2 და სიმაღლე 3 მ, ნაჯერი ორთქლის სახით შეიძლება „დაეტიოს" დაახლოებით ერთი კილოგრამი წყალი.

ასეთი ოთახი რომ კარგად დავხუროთ და შიგ თავახდილი წყლიანი კასრი დავდგათ, ერთი ლიტრი წყალი აორთქლდება, როგორიც არ უნდა იყოს კასრის ტევადობა.

საინტერესოა შევადაროთ ეს შედეგი სინდიყის სათანადო მნიშვნელობებს. იგივე 20°C ტემპერატურისას სინდიყის ნაჯერი ორთქლის წნევა 10^{-8} გ/სმ^3 ტოლია. ოთახში, რომელზედაც ზემოთ გვქონდა ლაპარაკი, 1 გ. სინდიყზე მეტი არ დაეტევა.

უნდა აღინიშნოს, რომ ვერცხლისწყლის ორთქლი ძალზე შხამიანია და 1 გ სინდიყის ორთქლმა შეიძლება სერიოზული ზიანი მიაყენოს ადამიანის ჯანმრთელობას. ვერცხლისწყლით მუშაობისას უნდა ვეცადოთ, მისი სულ უმცირესი წვეთიც კი არ დაიღვაროს.

კრიტიკული ტემპერატურა

როგორ ვაქციოთ გაზი სითხედ? ამ კითხვაზე დუღილის გრაფიკი იძლევა პასუხს. გაზის სითხედ გარდაქმნა შეიძლება ან ტემპერატურის შემცირებით, ან წნევის გადიდებით.

XIX საუკუნეში წნევის გაზრდა უფრო ადვილ ამოცანად მიაჩნდათ, ვიდრე ტემპერატურის შემცირება. ამ საუკუნის დასაწყისში დიდმა ინგლისელმა ფიზიკოსმა მიხეილ ფარადეიმ შეძლო გაზების შეკუმშვა ნაჯერი ორთქლის დრეკადობის მნიშვნელობამდე და, ამრიგად, მრავალი გაზი სითხედ აქცია (ქლორი, ნახშირმჟავა გაზი და სხვ.).

მაგრამ ზოგიერთი გაზის — წყალბადის, აზოტის, ჟანგბადის — გათხევადება ვერაფრით ვერ მოხერხდა. როგორც არ უნდა გაეზარდათ წნევა, ისინი არ გადიოდნენ თხევად მდგომარეობაში. ისეთი შთაბეჭდილება რჩებოდა, რომ ჟანგბადი და სხვა გაზები არ შეიძლებოდა თხევად მდგომარეობაში ყოფილიყვნენ. ამიტომ ისინი ჭეშმარიტ, ანუ მუდმივ გაზებს მიაკუთვნეს.

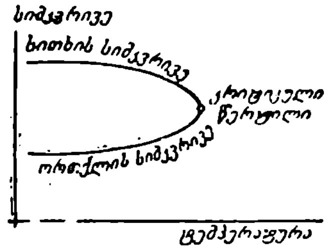
სინამდვილეში კი წარუმატებლობის მიზეზი იყო ერთი გამოუცნობი მნიშვნელოვანი გარემოება.

განვიხილოთ წონასწორობაში მყოფი სითხე და ორთქლი, და მოვიფიქროთ, რა მოუვათ მათ დუღილის ტემპერატურისა და, ცხადია, წნევის სათანადო ზრდისას. სხვანაირად რომ ვთქვათ, წარმოვიდგინოთ, რომ წერტილი დუღილის მრუდზე ზევით მოძრაობს. ჩვენ ვიცით, რომ ტემპერატურის ზრდისას სითხე ფართოვდება და მისი სიმკვრივე მცირდება. ხოლო რაც შეეხება ორთქლს, დუღილის ტემპერატურის ზრდა ხელს უწყობს მის გაფართოებას, მაგრამ, როგორც უკვე ითქვა, ნაჯერი ორთქლის წნევა გაცილებით უფრო სწრაფად იზრდება, ვიდრე დუღილის ტემპერატურა. ამიტომაც ორთქლის სიმკვრივე კი არ მცირდება, პირიქით, სწრაფად იზრდება დუღილის ტემპერატურის ზრდასთან ერთად.

რადგანაც სითხის სიმკვრივე მცირდება, ხოლო ორთქლის სიმკვრივე მატულობს, ამიტომ თუ დუღილის მრუდის გასწვრივ „ზევით“ გადავინაცვლებთ, უსათუოდ მივაღწევთ

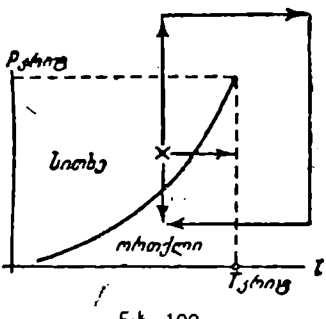
ისეთ წერტილს, რომელშიც სითხისა და ორთქლის სიმკვრივეები გათანაბრდება (ნახ. 99).

ამ შესანიშნავ წერტილში, რომელსაც კრიტიკული ეწოდება, დუღილის მრუდი წყდება. რადგანაც გაზსა და სითხეს შორის ყველა განსხვავება სიმკვრივის განსხვავებასთან არის დაკავშირებული, ამიტომ კრიტიკულ წერტილში სითხისა და გაზის თვისებები ერთნაირდება. ყოველ ნივთიერებას აქვს თავისი კრიტიკული ტემპერატურა და თავისი კრიტიკული წნევა. მაგალითად, წყლისთვის კრიტიკული წერტილი 374°C ტემპერატურას და 218,5 ატმ წნევას შეესაბამება.



ნახ. 99.

თუ დავიწყებთ გაზის შეკუმშვას, რომლის ტემპერატურა კრიტიკულზე დაბალია, მაშინ მისი შეკუმშვის პროცესი გამოისახება ისრით, რომელიც დუღილის მრუდს კვეთს (ნახ. 100). ეს იმას ნიშნავს, რომ იმ მომენტში, როდესაც ორთქლის დრეკადობის ტოლ წნევას მიაღწევს (დუღილის მრუდთან ისრის გადაკვეთის წერტილი), გაზი დაიწყებს სითხედ კონდენსირებას. ჩვენი ჭურჭელი რომ გამჭვირვალე იყოს, ჭურჭლის ფსკერზე დავინახავდით სითხის ფენის წარმოქმნის დასაწყისს. უცვლელი წნევის პირობებში სითხის ფენა დაიწყებს ზრდას, ვიდრე საბოლოოდ მთელი გაზი სითხედ არ გადაიქცევა.



ნახ. 100.

სულ სხვაგვარად არის საქმე ისეთი გაზის შეკუმშვის დროს, რომლის ტემპერატურა კრიტიკულზე მაღალია. შეკუმშვის პროცესი კვლავ შეიძლება გამოვსახოთ ქვევიდან ზე-

ვით მიმართული ისრის სახით. მაგრამ ეს ისარი ახლა უკვე აღარ გადაკვეთს დუღილის მრუდს. მაშასადამე, შეკუმშვისას ორთქლი კონდენსირების ნაცვლად მხოლოდ განუწყვეტლივ გამკვრივებას განიცდის.

კრიტიკულზე მაღალი ტემპერატურის პირობებში შეუძლებელია გამყოფი საზღვრით განცალკევებული სითხისა და გაზის არსებობა. ნებისმიერ სიმკვრივემდე შეკუმშვისას დგუშის ქვეშ იქნება ერთგვაროვანი ნივთიერება და ძნელი სათქმელია, როდის შეიძლება ვუწოდოთ მას გაზი და როდის — სითხე.

კრიტიკული წერტილის არსებობა გვიჩვენებს, რომ თხევად და გაზობრივ მდგომარეობას შორის პრინციპული განსხვავება არ არსებობს. ერთი შეხედვით შეიძლებოდა გვეფიქრა, რომ ასეთ პრინციპულ განსხვავებას მხოლოდ იმ შემთხვევაში არ ვხვდებით, როდესაც ლაპარაკია კრიტიკულზე უფრო მაღალ ტემპერატურაზე. მაგრამ ეს ასე არ არის. კრიტიკული წერტილის არსებობა შესაძლებლობას გვაძლევს სითხე — ნამდვილი სითხე, რომელიც შეიძლება ჭიქაში ჩავასხათ — დუღილის მსგავსი ყოველგვარი მოვლენის გარეშე გადავიყვანოთ გაზოვან მდგომარეობაში.

გარდაქმნის ასეთი გზა ნაჩვენებია ნახ. 100-ზე. ჯვრით აღნიშნულია აშკარად ნამდვილი სითხე. თუ წნევას ცოტათი შევამცირებთ (ისარი ქვემოთკენ), იგი ადუღდება. სითხე იმ შემთხვევაშიც ადუღდება, თუ ტემპერატურას ცოტათი გავადიდებთ (ისარი მარჯვნისკენ). მაგრამ ჩვენ სულ სხვაგვარად მოვიქცევით. შევკუმშოთ სითხე საკმაოდ ძლიერად, კრიტიკულზე უფრო მაღალ წნევამდე. სითხის მდგომარეობის გამომსახველი წერტილი ვერტიკალურად ზევით წავა. შემდეგ გავათბოთ სითხე — ეს პროცესი ჰორიზონტალური ხაზით გამოისახება. ახლა, როდესაც კრიტიკული ტემპერატურის მარჯვენა მხარეზე აღმოვჩნდით, წნევა საწყის მნიშვნელობამდე შევამციროთ. თუ ტემპერატურას შევამცირებთ, შეიძლება მივიღოთ ნამდვილი ორთქლი, რომლის მიღებაც ამ სითხიდან უფრო მარტივი და მოკლე გზით შეიძლებოდა.

ამრიგად, ყოველთვის შესაძლებელია კრიტიკული წერტილის გვერდის ავლით შევცვალოთ წნევა და ტემპერატურა და

სითხისაგან ორთქლი მივიღოთ და ორთქლისაგან — სითხე. ასეთი უწყვეტი გადასვლა არ მოითხოვს დუღილს ან კონდენსაციას.

ისეთი გაზების გათხევადების ადრეულ ცდებს, როგორიცაა ჟანგბადი, აზოტი და წყალბადი იმიტომ არ მოჰყოლია წარმატება, რომ ცნობილი არ იყო კრიტიკული ტემპერატურის არსებობა. ამ გაზების კრიტიკული ტემპერატურა ძალიან დაბალია: აზოტისათვის — 147°C, ჟანგბადისათვის — 119°C, წყალბადისათვის — 240°C, ან 33°K. რეკორდსმენია ჰელიუმი, მისი კრიტიკული ტემპერატურა 4,3°K ტოლია. ამ გაზების სითხედ გარდაქმნა მხოლოდ ერთი საშუალებით შეიძლება — მათი ტემპერატურა აღნიშნულზე დაბლა უნდა ჩამოვიყვანოთ.

დაბალი ტემპერატურის მიღება

ტემპერატურის არსებით შემცირებას სხვადასხვა საშუალებით აღწევენ. მაგრამ ყველა საშუალების იდეა ერთი და იგივეა: სხეული, რომლის გაცივებაც გვსურს, უნდა ვაიძულოთ, დახარჯოს თავისი შინაგანი ენერგია.

როგორ უნდა გაკეთდეს ეს? ერთ-ერთი საშუალებაა, ვაიძულოთ სითხე იდუღოს, გარედან სითბოს მიღების გარეშე. ამისათვის, როგორც ვიცით, უნდა შევამციროთ წნევა — დავიყვანოთ იგი ორთქლის დრეკადობის მნიშვნელობამდე. დუღილისათვის საჭირო სითბო სითხისგან მიიღება. ამიტომ სითხისა და ორთქლის ტემპერატურა, აგრეთვე ორთქლის დრეკადობაც, შემცირდება. იმისათვის, რომ დუღილი არ შეწყდეს და სწრაფიც იყოს, სითხიანი ჭურჭლიდან განუწყვეტლივ უნდა ამოიტუმბოს ჰაერი.

მაგრამ ტემპერატურის შემცირებას ამ პროცესის დროს ზღვარი ედება: ორთქლის დრეკადობა, ბოლოს და ბოლოს, სულ უმნიშვნელო ხდება და საჭირო წნევას ყველაზე მძლავრი ამომტუმბავი ტუმბოებიც კი ველარ ქმნიან.

იმისათვის, რომ განვაგრძოთ ტემპერატურის შემცირება, შეიძლება მიღებული სითხით გავაცივოთ გაზი და ისიც

უფრო დაბალი დუღილის ტემპერატურის მქონე სითხედ ვაქციოთ. ახლა ამოტუმბვის პროცესი შეიძლება გავიმეოროთ მეორე ნივთიერებისთვის და ასეთი გზით მივიღოთ უფრო დაბალი ტემპერატურა. აუცილებლობის შემთხვევაში დაბალი ტემპერატურის მიღების ასეთი „კასკადური“ მეთოდი შეიძლება განვაგრძოთ.

სწორედ ასე იქცეოდნენ წარსული საუკუნის ბოლოს; გაზს საფეხურებად ათხევადებდნენ: მიმდევრობით აქცევდნენ სითხედ ეთილენს, ჟანგბადს, აზოტს, წყალბადს — ნივთიერებებს, რომელთა დუღილის ტემპერატურებია —103°, —183°, —196° და — 253°C. როცა თხევადი წყალბადი გვაქვს, ყველაზე დაბალი დუღილის ტემპერატურის (—269°C) მქონე სითხე — ჰელიუმიც შეიძლება მივიღოთ. „მარცხენა“ მეზობელი გვეხმარებოდა მიგვეღო „მარჯვენა“ მეზობელი.

გაციების კასკადური მეთოდი თითქმის ასი წლისაა. 1877 წ. ამ მეთოდით მიიღეს თხევადი ჰაერი, 1884—1885 წწ. კი პირველად — თხევადი წყალბადი. ბოლოს, კიდევ ოცი წლის შემდეგ უკანასკნელი სიმაგრეც აიღეს. 1908 წ. კამერლინგონესმა ჰოლანდიის ქალაქ ლეიდენში სითხედ აქცია ჰელიუმი — ნივთიერება, რომელსაც ყველაზე დაბალი კრიტიკული ტემპერატურა აქვს. ამ მნიშვნელოვანი მეცნიერული მიღწევის 50 წლისთავი ახლახან აღინიშნა.

დიდი ხნის განმავლობაში ლეიდენის ლაბორატორია ერთადერთი „დაბალტემპერატურიანი“ ლაბორატორია იყო. ახლა კი ყველა ქვეყანაში არსებობს ათობით ასეთი ლაბორატორია, რომ არაფერი ვთქვათ ქარხნებზე, რომლებიც თხევად ჰაერს ტექნიკური მიზნებისათვის ამზადებენ.

დაბალი ტემპერატურის მიღების კასკადურ მეთოდს ახლა იშვიათად იყენებენ. ტემპერატურის შესამცირებელ ტექნიკურ დანადგარებში გაზის შინაგანი ენერგიის შემცირების სხვა მეთოდს მიმართავენ: გაზს აიძულებენ სწრაფად გაფართოვდეს და შინაგანი ენერგიის ხარჯზე შეასრულოს მუშაობა.

თუ, მაგალითად, რამდენიმე ატმოსფერომდე შეკუმშულ ჰაერს საფართოებელში შევუშვებთ, მაშინ დგუშის გადაადგილების ან ტურბინის ბრუნვისას ჰაერი ისე მკვეთრად გაცივდება, რომ სითხედ გადაიქცევა. ნახშირმჟავა გაზი ბალო-

ნიდან სწრაფად რომ გამოვუშვათ, ისე მკვეთრად გაცივდება, რომ ჰაერშივე „ყინულად“ იქცევა.

თხევად გაზებს ფართოდ იყენებენ ტექნიკაში. თხევად ჟანგბადს — აფეთქების ტექნიკაში; როგორც რეაქტიული ძრავების სათბობი ნარევის კომპონენტს.

ჰაერის გათხევადებას ტექნიკაში ჰაერის შემადგენელი გაზების განსაცალკევებლად მიმართავენ, რაზეც ქვემოთ გვექნება ლაპარაკი.

თხევადი ჰაერის ტემპერატურას ფართო გამოყენება აქვს ტექნიკის სხვადასხვა დარგში. მაგრამ მრავალი ფიზიკური კვლევისათვის ეს ტემპერატურა არ არის საკმარისად დაბალი. მართლაც, ცელსიუსის გრადუსები აბსოლუტურ სკალაზე რომ გადავიყვანოთ, დავინახავთ, რომ თხევადი ჰაერის ტემპერატურა დაახლოებით ოთახის ტემპერატურის $^1/_3$-ა, ფიზიკისათვის ბევრად უფრო საინტერესოა „წყალბადის“ ტემპერატურები, ე. ი. 14—20°K რიგის ტემპერატურები, და განსაკუთრებით კი „ჰელიუმის“ ტემპერატურები. ყველაზე დაბალი ტემპერატურა, რომელიც ჰელიუმის ამოტუმბვის დროს მიიღება, არის 0,7°K.

ფიზიკოსებმა აბსოლუტურ ნულთან კიდევ უფრო მეტად მიახლოებაც შეძლეს. ამჟამად მიღებულია ტემპერატურები, რომლებიც აბსოლუტურ ნულს გრადუსის მხოლოდ რამდენიმე მეთასედი ნაწილით აღემატება. მაგრამ ეს ზედაბალი ტემპერატურები ისეთი ხერხებით მიიღება, რომლებიც არ ჰგვანან ჩვენს მიერ ზემოთ აღწერილ მეთოდებს.

გადაცივებული ორთქლი და გადახურებული სითხე

დუღილის ტემპერატურის გავლისას ორთქლმა კონდენსირება უნდა იწყოს, სითხედ უნდა გადაიქცეს. მაგრამ, ირკვევა, რომ თუ ეს ორთქლი ძალიან სუფთაა და არ ეხება სითხეს, მაშინ შესაძლებელი ხდება გადაცივებული, ანუ გადაჯერებული ორთქლის მიღება. ეს ისეთი ორთქლია, რომელიც უკვე კარგა ხნით ადრე უნდა ქცეულიყო სითხედ.

გადაჯერებული ორთქლი მეტად არამდგრადია. ხანდახან საკმარისია ბიძგი ან ორთქლის სივრცეში შეგდებული მარცვალი, რომ მყისვე დაიწყოს დაყოვნებული კონდენსაცია.

ცდა გვიჩვენებს, რომ ორთქლის მოლეკულების შემჭიდროება ძლიერ ადვილდება ორთქლში წვრილი გარეშე ნაწილაკების შეტანით. მტვრიან ჰაერში წყლის ორთქლის გადაჯერება არ ხდება. კონდენსაციის გამოწვევა კვამლის ბოლქვებითაც შეიძლება. კვამლი ხომ წვრილი მყარი ნაწილაკებისგან შედგება. ორთქლში მოხვედრის შემდეგ ეს ნაწილაკები თავის ირგვლივ კრებენ მოლეკულებს და კონდენსაციის ცენტრებად იქცევიან.

ამრიგად, თუმც არამდგრადად, ორთქლს მაინც შეუძლია არსებობა სითხის „ცხოვრებისთვის“ გამოსადეგ ტემპერატურულ არეში.

სითხესაც შეუძლია „იცხოვროს“ იმავე პირობებში ორთქლის არეში? სხვანაირად რომ ვთქვათ, შეიძლება თუ არა სითხის გადახურება?

თურმე შეიძლება. ამისათვის სითხის მოლეკულები არ უნდა სწყდებოდნენ საკუთარ ზედაპირს. რადიკალური საშუალებაა თავისუფალი ზედაპირის ლიკვიდირება, ე. ი. სითხის მოთავსება ისეთ ჭურჭელში, სადაც ის ყოველი მხრიდან მყარი კედლებით იქნება შემოზღუდული. ასეთი გზით შეიძლება მივიღოთ რამდენიმე გრადუსით გადახურება, ანუ თხევადი მდგომარეობის გამომსახველი წერტილის მარჯვნივ გადაწევა დუღილის მრუდიდან (ნახ. 100).

გადახურება არის სითხის გადაწევა ორთქლის არეში, ამიტომ სითხის გადახურება შეიძლება როგორც სითბოს გადაცემით, ისე წნევის შემცირებითაც.

უკანასკნელი ხერხით საოცარი შედეგი მიიღება. შიგ გახსნილი გაზებისგან საგულდაგულოდ განთავისუფლებულ წყალს ან სხვა სითხეს (ამის გაკეთება ადვილი არ არის) დგუშიან ჭურჭელში ათავსებენ. დგუში სითხის ზედაპირს აღწევს. ჭურჭელსა და დგუშს სითხე უნდა ასველებდეს. ახლა თუ დგუშს ჩვენსკენ ამოვწევთ, მაშინ მას ფსკერზე შეწებებული წყალი გამოჰყვება. მაგრამ დგუშზე შეწებებული წყა-

ლი წამოიღებს წყლის შემდეგ ფენას, ეს ფენა თავის ქვეშ მდებარე ფენას და ამის შედეგად სითხე გაიჭიმება.

ბოლოს და ბოლოს წყლის სვეტი გაწყდება (სწორედ წყლის სვეტი, წყალი კი არ მოსწყდება დგუშს), მაგრამ ეს მაშინ, როდესაც ძალა ფართის ერთეულზე ათეულ კილოგრამებამდე ავა. სხვანაირად რომ ვთქვათ, სითხეში შეიქმნება რამდენიმე ათეული ატმოსფეროს ტოლი უარყოფითი წნევა.

ნივთიერების ორთქლის მდგომარეობა მდგრადია უკვე მცირე დადებითი წნევებისას, სითხე კი შეიძლება უარყოფით წნევამდე მივიყვანოთ. „გადახურების“ უფრო თვალსაჩინო მაგალითის მოგონება შეუძლებელია.

დნობა

არ არსებობს ისეთი მყარი სხეული, რომ მდგრადი დარჩეს ტემპერატურის ნებისმიერი მატებისას. ადრე თუ გვიან მყარი ნაჭერი სითხედ იქცევა; თუმცა ზოგიერთ შემთხვევაში ჩვენ ვერ მოვახერხებთ დნობის ტემპერატურის მიღებას — შეიძლება ქიმიური დაშლა დაიწყოს.

ტემპერატურის ზრდის მიხედვით მოლეკულები სულ უფრო ინტენსიურად მოძრაობენ. ბოლოს დგება ისეთი მომენტი, როდესაც ძლიერად „გაქანებული“ მოლეკულების წესრიგში დაკავება შეუძლებელია. მყარი სხეული დნება. ყველაზე მაღალი დნობის ტემპერატურა აქვს ვოლფრამს: 3380°C. ოქრო დნება 1963°C-ზე, რკინა — 1539°C-ზე. თუმცა ადვილადდნობადი ლითონებიც არსებობს. ვერცხლისწყალი, როგორც ცნობილია, — 39°C ტემპერატურაზე დნება. ორგანიულ ნივთიერებებს არა აქვთ დნობის მაღალი ტემპერატურა. ნაფთალინი დნება 80°C, ტოლუოლი კი — 94,5°C.

სხეულის დნობის ტემპერატურის გაზომვა, განსაკუთრებით თუ ის ტემპერატურის იმ ინტერვალში დნება, რომელიც ჩვეულებრივი თერმომეტრით იზომება, საკმაოდ იოლია. აუცილებელი არ არის თვალი ვადევნოთ მდნობარე სხეულს. საკმარისია ვუყუროთ თერმომეტრის სინდიყის სვეტს (ნახ. 101). დნობის დაწყებამდე სხეულის ტემპერატურა იზრდე-

ბა. როგორც კი დაიწყება დნობა, ტემპერატურის მატება წყდება, და იგი უცვლელი რჩება, ვიდრე დნობის პროცესი მთლიანად არ დამთავრდება.

ისევე, როგორც სითხის ორთქლად ქცევა, მყარი სხეულის სითხედ ქცევაც სითბოს მოითხოვს. დნობისათვის აუცილებელ სითბოს დნობის ფარული სითბო ეწოდება. მაგალითად, ერთი კილოგრამი ყინულის დნობას 80 დიდი კალორია ესაჭიროება.

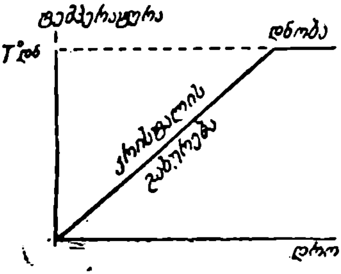
ყინული იმ სხეულთა რიცხვს მიეკუთვნება, რომლებსაც დნობის დიდი ფარული სითბო აქვთ. მაგალითად, ყინულის დნობას 10-ჯერ მეტი ენერგია ესაჭიროება, ვიდრე ასეთივე მასის ტყვიის დნობას. რასაკვირველია, აქ ლაპარაკია თვით დნობაზე, ჩვენ არ ვამბობთ, რომ ტყვიის დნობის დაწყებამდე იგი $+327°C$-მდე უნდა გაცხელდეს. ყინულის მაღალი დნობის სითბოს გამო ფერხდება თოვლის დნობა. წარმოიდგინეთ, დნობის სითბო 10-ჯერ ნაკლები რომ იყოს. მაშინ გაზაფხულის წყალდიდობა ყოველწლიურად წარმოუდგენელ უბედურებას დაატრიალებდა.

ამრიგად, ყინულის დნობის სითბო დიდია, მაგრამ იგი მცირეც არის, თუ მას შევადარებთ ორთქლადქცევის სითბოს, რომელიც ერთ კილოგრამზე 540 დიდი კალორიის ტოლია (შვიდჯერ ნაკლებია). სხვათა შორის, ეს განსხვავება სავსებით ბუნებრივია. სითხის ორთქლად გადაქცევისას ჩვენ მოლეკულები ერთმანეთს უნდა დავაცილოთ, ხოლო დნობის დროს მხოლოდ მოლეკულების განლაგებაში წესრიგის დარღვევაა საჭირო, ერთმანეთისგან კი თითქმის იგივე მანძილზე უნდა დავტოვოთ ისინი. ცხადია, უკანასკნელ შემთხვევაში ნაკლები მუშაობაა საჭირო.

დნობის გარკვეული წერტილის არსებობა კრისტალური სხეულების მნიშვნელოვან ნიშან-თვისებას წარმოადგენს. სწორედ ამ ნიშნის მიხედვით ადვილდება მათი გამორჩევა სხვა მყარი სხეულებისგან, რომელთაც ამორფულ სხეულებს, ანუ მინებს უწოდებენ. მინებს ვხვდებით როგორც არაორგანულ, ისე ორგანულ ნივთიერებებს შორისაც. ფანჯრის მინებს, ჩვეულებრივად, ნატრიუმის და კალციუმის სილიკატე-

ბისგან ამზადებენ; საწერ მაგიდაზე ხშირად ორგანულ მინას დებენ (მას კიდევ პლექსიგლასს უწოდებენ).

ამორფულ სხეულებს კრისტალურების საპირისპიროდ არა აქვთ დნობის გარკვეული ტემპერატურა. მინა კი არ დნება, რბილდება. გათბობისას მინის მყარი ნაჭერი ჯერ რბილდება, ადვილია მისი ღუნვა ან გაწევა; უფრო მაღალ ტემპერატურაზე ნაჭერი თანდათან იცვლის ფორმას საკუთარი სიმძიმის ძალის გავლენით. გათბობის პროცესში სქელი ბლანტი მინის მასა იმ ჭურჭლის ფორმას ღებულობს, რომელშიაც ის დევს. ეს მასა ჯერ სქელია, როგორც თაფლი, შემდეგ როგორც არაჟანი და, ბოლოს, თითქმის წყალივით მცირე სიბლანტის სითხედ იქცევა. რაგინდ დიდი სურვილიც არ უნდა გვქონდეს, აქ მაინც ვერ შევძლებთ იმ ტემპერატურის მითითებას, რომელზეც მყარი სხეული სითხედ იქცევა. ამის მიზეზი უნდა ვეძებოთ მინის აღნაგობის საფუძვლიან განსხვავებაში. როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ამორფულ სხეულებში ატომები უწესრიგოდ არის განლაგებული. მინები აღნაგობის მხრივ სითხეებს მოგვაგონებენ. ჯერ კიდევ მყარ მინაში მოლეკულები უწესრიგოდ არის განლაგებული. მაშასადამე, მინის ტემპერატურის აწევა კიდევ უფრო ადიდებს მისი მოლეკულების რხევათა გაქანებას, სულ უფრო მეტი და მეტი გადაადგილების თავისუფლებას ანიჭებს მათ. ამიტომაც მინა თანდათანობით რბილდება და არ ამჟღავნებს მკვეთრ გადასვლას „მყარიდან“ „თხევადში“, რაც დამახასიათებელია მოლეკულების მკაცრი წესრიგიდან უწესრიგო განაწილებაში გადასვლისათვის.



ნახ. 101.

როდესაც დუღილის მრუდზე ვსაუბრობდით, ჩვენ ვთქვით, რომ სითხეს და ორთქლს შეუძლია, თუმცაღა არამდგრად მდგომარეობაში, სხვის არეში იმყოფებოდნენ — ორთქლი შეიძლება გადავაცივოთ და გადავიყვანოთ დუღილის

მრუდიდან მარცხნივ, სითხე — გადავახუროთ და გადავწიოთ ამ მრუდიდან მარჯვნივ.

გვხვდება თუ არა ანალოგიური მოვლენები კრისტალისა და სითხის შემთხვევაში? ირკვევა, რომ აქ ანალოგია სრული არ არის.

კრისტალი რომ გავახუროთ, იგი თავის დნობის ტემპერატურაზე იწყებს დნობას. კრისტალის გადახურება არ ხერხდება. პირიქით, სითხის გაცივებისას, შესაძლებელია, თუ ზოგიერთ ზომას მივიღებთ, შედარებით ადვილად „გავირბინოთ" დნობის ტემპერატურა. ზოგიერთ სითხეში შეიძლება დიდი გადაცივების მიღება. ისეთი სითხეებიც კი არსებობს, რომელთა გადაცივებაც ადვილია, მაგრამ ძნელია ვაიძულოთ ისინი დაკრისტალდნენ. ასეთი სითხის გაცივებისას იგი სულ უფრო ბლანტი ხდება და ბოლოს დაკრისტალების გარეშე მყარდება. ასეთია მინა.

შეიძლება გადავაცივოთ წყალიც. ნისლის წვეთები შეიძლება დიდი ყინვის დროსაც კი არ გაიყინოს. გადაცივებულ სითხეში ნივთიერების პატარა კრისტალი რომ ჩავაგდოთ, მაშინვე დაიწყება დაკრისტალება.

ბოლოს დაყოვნებული დაკრისტალება შეიძლება დაიწყოს შენჯღრევის ან სხვა შემთხვევითი მოვლენების გავლენით. ცნობილია, მაგალითად, რომ კრისტალური გლიცერინი პირველად რკინიგზით ტრანსპორტირების დროს მიიღეს. დიდი ხნის შემდეგ მინებს შეუძლიათ იწყონ დაკრისტალება (განმინვა, როგორც ამბობენ ტექნიკაში).

როგორ გავზარდოთ კრისტალი

ჩვენ უკვე ვთქვით, რომ მყარი სხეულების უმრავლესობა უწვრილესი კრისტალებისგან შედგება. ჩვეულებრივ, ეს კრისტალები მხოლოდ მიკროსკოპში ჩანს. რაც შეეხება ცალკეულ კრისტალებს, რომლებსაც საკმაოდ დიდი ზომა აქვთ და კრისტალის ისეთი გარეგნული ნიშნები ახასიათებთ, როგორიცაა ბრტყელი წახნაგები, სწორი წიბოები და სწორი სიმეტრიული ფორმა, ბუნებაში საკმაოდ იშვიათად გვხვდება.

ეს შემთხვევითი არც არის. საქმე ისაა, რომ თუ საგანგებოდ არ ვიღონებთ რაიმეს, მდნარის გაცივებისას ყოველთვის წვრილკრისტალური ნივთიერება მიიღება და არა ცალკეული კრისტალი. ეს იმით აიხსნება, რომ კრისტალების ზრდა მდნარის ბევრ ადგილას ერთდროულად იწყება და მთელი მდნარი თანდათანობით ივსება მზარდი კრისტალების უზარმაზარი რიცხვით.

თუ ცალკეული კრისტალის გაზრდა გვსურს, მაშინ უნდა მივიღოთ ზომები, რომ კრისტალი ერთი ადგილიდან გაიზარდოს. მაგრამ თუ უკვე რამდენიმე კრისტალმა დაიწყო ზრდა, ისე უნდა მოვიქცეთ, რომ ზრდის პირობები მხოლოდ ერთ-ერთი მათგანისათვის იყოს ხელსაყრელი.

აი, მაგალითად, როგორ იქცევიან ადვილდნობადი ლითონების კრისტალების გაზრდისას. ლითონს ადნობენ ბოლოწაწვრილებულ მინის სინჯარაში. სინჯარა ჩამოკიდებულია ძაფზე ვერტიკალური ცილინდრული ღუმელის შიგნით და ნელ-ნელა ეშვება ქვევით. წაწვრილებული ბოლო თანდათანობით გამოდის ღუმელიდან და ცივდება. იწყება დაკრისტალება. ჯერ რამდენიმე კრისტალი წარმოიშობა, მაგრამ ისინი, რომლებიც გვერდისკენ იზრდებიან, სინჯარის კედელს ებჯინებიან და მათი ზრდა ყოვნდება. ხელსაყრელ პირობებში ამოჩნდება მხოლოდ ის კრისტალი, რომელიც სინჯარის ღერძის გასწვრივ, ე. ი. მდნარის სიღრმისკენ გაიზრდება. სინჯარის დაშვებისდა მიხედვით მდნარის ახალი ულუფა ექცევა დაბალი ტემპერატურის არეში და „კვებავს“ ამ ერთადერთ კრისტალს. ამიტომაც ყველა კრისტალიდან მხოლოდ ეს ერთი დარჩება; რაც უფრო დავუშვებთ სინჯარას, მით უფრო გაიზრდება კრისტალიც და, საბოლოოდ, მთელი გამდნარი ლითონი ერთი მთლიანი კრისტალის სახით გაცივდება.

იგივე იდეა უდევს საფუძვლად ლალის ძნელადდნობადი კრისტალების ზრდას. ნივთიერების წმინდა ფხვნილს ყრიან ცეცხლის ალში. ფხვნილი დნება, პაწაწინა წვეთები მცირეფართიან ძნელდნობად ქვესადებზე ცვივა და მრავალ კრისტალს წარმოქმნის. წვეთების შემდგომი ვარდნისას ქვესადებზე ყველა კრისტალი იზრდება, მაგრამ აქაც საბოლოოდ მხოლოდ ის კრისტალი იზრდება, რომელიც ყველაზე უფრო

ხელსაყრელ პირობებშია ვარდნილი წვეთების „მთსალებად“. ძალიან ხშირად კრისტალებს ხსნარებიდან ზრდიან. ასეთი დაკრისტალების შესახებ ჩვენ შემდეგ ვილაპარაკებთ.

რა საჭიროა მსხვილი კრისტალები?

ცალკეული მსხვილი კრისტალები ხშირად ესაჭიროება მრეწველობასა და ტექნიკას. დიდი მნიშვნელობა აქვს ტექნიკისათვის სეგნეტის მარილისა და კვარცის კრისტალებს, რომლებსაც უნარი შესწევთ მექანიკური მოქმედება (მაგალითად, წნევა) ელექტრულ ძაბვად გარდაქმნან.

ოპტიკურ მრეწველობას ესაჭიროება კალციტის, ქვამარილის, ფლუორიტის და სხვათა მსხვილი კრისტალები.

საათების მრეწველობისათვის საჭიროა ლალის, საფირონისა და ზოგი სხვა ძვირფასი ქვის კრისტალები. საქმე ისაა, რომ ჩვეულებრივი საათის ცალკეული მოძრავი ნაწილები საათში 20.000-მდე რხევას ასრულებს. ასეთი დიდი სიჩქარე არაჩვეულებრივად მაღალ მოთხოვნებს უყენებს ღერძების ბოლოებისა და საკისრების ხარისხს. გაცვეთა უმცირესი იქნება მაშინ, თუ ღერძის 0,07—0,15 მმ დიამეტრის მქონე წვეროს საკისრად ლალს ან საფირონს გამოიყენებენ. ამ ნივთიერებათა კრისტალები ძალზე მაგარია და ძალიან ნელა ცვდება ფოლადისაგან. აღსანიშნავია, რომ ამ შემთხვევაში ხელოვნური ქვები ბუნებრივს სჯობია.

ლითონების თვისებების შესასწავლად საჭიროა რკინის, სპილენძისა და სხვათა ცალკეული დიდი ზომის კრისტალები.

წნევის გავლენა დნობის ტემპერატურაზე

თუ წნევას შევცვლით, შეიცვლება დნობის ტემპერატურაც. ასეთსავე კანონზომიერებას გავეცანით, როდესაც დუღილზე ვლაპარაკობდით. რაც მეტია წნევა, მით უფრო მაღალია დუღილის ტემპერატურა. როგორც წესი, ეს დნობაზეც ვრცელდება. მაგრამ არის ნივთიერებათა მცირე რიცხვი, რომლებიც ანომალურად იქცევიან: მათი დნობის ტემპერატურა წნევის ზრდისას მცირდება. საქმე ისაა, რომ მყარი სხეულების დიდი უმრავლესობა თავიანთ სითხეებზე უფრო

მკვრივია. ამ კანონიდან გამონაკლისს სწორედ ის ნივთიერებები შეადგენენ, რომელთა დნობის ტემპერატურაც წნევის შეცვლისას მთლად ჩვეულებრივი სახით არ იცვლება — მაგალითად, წყალი. ყინული წყალზე მსუბუქია და მისი დნობის ტემპერატურა მცირდება წნევის ზრდისას.

შეკუმშვა ხელს უწყობს უფრო მკვრივი მდგომარეობის შექმნას. თუ მყარი სხეული თხევადზე მკვრივია, მაშინ შეკუმშვა ხელს უწყობს გამყარებას და აფერხებს დნობას. მაგრამ თუ დნობა კუმშვით ბრკოლდება, ეს იმას ნიშნავს, რომ ნივთიერება მყარი რჩება, იმ დროს როცა ადრე იმავე ტემპერატურაზე იგი უკვე დნობას დაიწყებდა, ე. ი. წნევის ზრდისას დნობის ტემპერატურა იზრდება. ანომალურ შემთხვევაში სითხე მყარ სხეულზე მკვრივია და წნევა ხელს უწყობს სითხის წარმოქმნას, ანუ ამცირებს დნობის ტემპერატურას.

წნევის გავლენა დნობის ტემპერატურაზე ბევრად ნაკლებია ანალოგიურ ეფექტზე დუღილისათვის. წნევის გაზრდა 100 კგ-ძ/სმ^2-ზე ზემოთ 1°C-ით ამცირებს ყინულის დნობის ტემპერატურას.

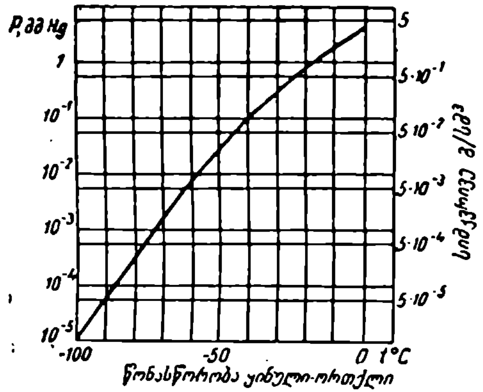
აქედან ჩანს, როგორი გულუბრყვილობაა, როცა ხანდახან ციგურების ყინულზე სრიალს წნევის გამო დნობის ტემპერატურის შემცირებით ხსნიან. ციგურის პირზე წნევა ყოველ შემთხვევაში 100 კგ-ძ/სმ^2 არ აღემატება და ამიტომ დნობის ტემპერატურის შემცირებას არავითარი მნიშვნელობა არა აქვს მოციგურავისათვის.

მყარი სხეულების აორთქლება

როდესაც ამბობენ, „ნივთიერება ორთქლდება“, ჩვეულებრივ, სითხის აორთქლებას გულისხმობენ. მაგრამ მყარ სხეულებსაც შეუძლიათ აორთქლება. ხანდახან მყარი სხეულების აორთქლებას აქროლებას უწოდებენ.

აორთქლებად მყარ სხეულს წარმოადგენს, მაგალითად, ნაფთალინი, ნაფთალინი დნება 80°C, ხოლო ორთქლდება ოთახის ტემპერატურაზე. ნაფთალინს სწორედ ამ თვისების

გამო იყენებენ ჩრჩილის მოსასპობად. ნაფთალინდაყრილი ბეწვის ქურქი ნაფთალინის ორთქლით იჟღინთება და ქმნის ატმოსფეროს, რომელსაც ჩრჩილი ვერ იტანს. სუნის მქონე ყოველი მყარი სხეული მნიშვნელოვნად ქროლდება. სუნს ხომ მოლეკულები ქმნიან, ისინი სწყდებიან ნივთიერებას და ჩვენს ცხვირს აღწევენ. მაგრამ უფრო ხშირია შემთხვევები, როდესაც ნივთიერება უმნიშვნელოდ ქროლდება და ხანდახან იმდენად უმნიშვნელოდ, რომ ამის აღმოჩენა ძალზე გულმოდგინე გამოკვლევებითაც კი შეუძლებელია. პრინციპში ნებისმიერი მყარი ნივთიერება ორთქლდება (სწორედ ნების-



ნახ. 102.

მიერი, რკინა ან სპილენძიც კი). თუ ჩვენ არ ძალგვიძს აქროლების აღმოჩენა, ეს მხოლოდ იმას ნიშნავს, რომ გამაჯერებელი ორთქლის სიმკვრივე მეტად უმნიშვნელოა.

მყარ სხეულთან წონასწორობაში არსებული გამაჯერებელი ორთქლის სიმკვრივე ტემპერატურის ზრდასთან ერთად სწრაფად იზრდება (ნახ. 102). შეიძლება დავრწმუნდეთ, რომ ოთახის ტემპერატურაზე მკვეთრი სუნის მქონე ნივთიერებებს უფრო დაბალ ტემპერატურაზე სუნი ეკარგებათ.

მყარი სხეულის გამაჯერებელი ორთქლის სიმკვრივის მნიშვნელოვნად გადიდება უმეტეს შემთხვევებში შეუძლე-

ბელია უბრალო მიზეზის გამო — ნივთიერება გადნობას ასწრებს.

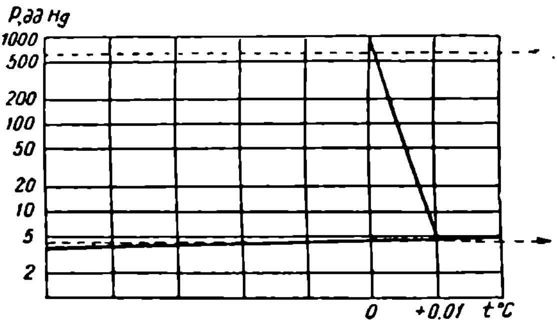
აორთქლებისგან არც ყინულია დაზღვეული. ეს კარგად იციან დიასახლისებმა, რომლებიც ყინვაში სარეცხს ფენენ გასაშრობად. წყალი ჯერ იყინება, შემდეგ კი ყინული ორთქლდება და თეთრეულიც შრება.

სამმაგი წერტილი

ამრიგად, არსებობს პირობები, რომელთა დროსაც ორთქლს, სითხეს და კრისტალს წყვილ-წყვილად შეუძლიათ წონასწორობაში ყოფნა.

შეიძლება თუ არა წონასწორობაში იმყოფებოდეს ყველა მდგომარეობა? ასეთი წერტილი წნევისა და ტემპერატურის დიაგრამაზე არსებობს, მას სამმაგი წერტილი ეწოდება. სად მდებარეობს ის?

თუ დახურულ ჭურჭელში ნულ გრადუსზე მოვათავსებთ წყალს, რომელშიც ყინულის ნაჭერი ცურავს, მაშინ წყლის



ნახ. 103.

(და „ყინულის“) ორთქლი თავისუფალ სივრცეში იწყებს ამოსვლას. 4,6 მმ Hg წნევაზე აორთქლება შეწყდება და დაიწყება გაჯერება. ახლა სამი ფაზა — ყინული, წყალი და

ორთქლი — წონასწორობის მდგომარეობაში იქნება. სამმაგი წერტილიც სწორედ ეს არის.

სხვადასხვა მდგომარეობათა შორის თანაფარდობებს თვალსაჩინოდ და გარკვევით გვიჩვენებს წყლის დიაგრამა, რომელიც ნახ. 103-ზეა გამოსახული.

ასეთი დიაგრამა შეიძლება ნებისმიერი სხეულისათვის აიგოს.

ნახატზე გამოსახული მრუდები ჩვენთვის ნაცნობია — ეს წონასწორობის მრუდებია ყინულსა და ორთქლს, ყინულსა და წყალს, წყალსა და ორთქლს შორის. ვერტიკალზე, როგორც ყოველთვის, გადაზომილია წნევა, ჰორიზონტალზე — ტემპერატურა.

სამი მრუდი იკვეთება სამმაგ წერტილში და დიაგრამას სამ არედ — ყინულის, წყლისა და წყლის ორთქლის საარსებო არეებად ყოფს.

მდგომარეობის დიაგრამა მოკლე ცნობარია. მისი მიზანია გვიპასუხოს კითხვაზე, სხეულის რა მდგომარეობაა მდგრადი ამა და ამ წნევასა და ამა და ამ ტემპერატურაზე.

თუ წყალს ან ორთქლს მარცხენა არეში მოვათავსებთ, ისინი ყინულად იქცევიან. თუ „ქვედა არეში“ შევიტანთ სითხეს ან მყარ სხეულს, ორთქლს მივიღებთ. „მარჯვენა არეში“ ორთქლი დაკონდენსირდება, ხოლო ყინული გადნება.

ფაზების არსებობის დიაგრამა საშუალებას გვაძლევს, მაშინვე ვუპასუხოთ, რა მოუვა ნივთიერებას გათბობის ან შეკუმშვის შედეგად. უცვლელი წნევის პირობებში გათბობა დიაგრამაზე ჰორიზონტალური ხაზით გამოისახება. ამ ხაზის გასწვრივ მარცხნიდან მარჯვნივ მოძრაობს ნივთიერების მდგომარეობის გამომსახველი წერტილი.

ნახატზე ორი ასეთი ხაზია გამოსახული, ერთ-ერთი მათგანი გათბობაა ნორმალურ წნევაზე. ხაზი მდებარეობს სამმაგი წერტილის ზევით. ამიტომ იგი გადაკვეთს ჯერ დნობის მრუდს, ხოლო შემდეგ, ნახაზის ფარგლებს გარეთ, აორთქლების მრუდსაც. ნორმალური წნევის პირობებში ყინული 0°C ტემპერატურაზე გადნება, ხოლო წარმოქმნილი წყალი 100°C-ზე ადუღდება.

სხვაგვარად იქნება ყინულის საქმე, რომელიც ძალიან მცირე, ვთქვათ, 5 მმ Hg-ზე ოდნავ ნაკლებ წნევაზე თბება.

გათბობის პროცესი გამოიხატება სამმაგი წერტილის ქვევით გამავალი ხაზით. დნობისა და დუღილის მრუდებს ეს ხაზი არ გადაკვეთს. ასეთი უმნიშვნელო წნევისას გათბობა გამოიწვევს ყინულის უშუალოდ ორთქლად გადაქცევას.

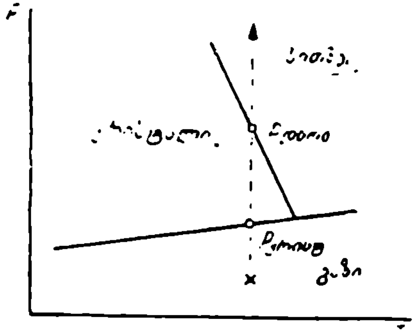
ნახ. 104-ზე იგივე დიაგრამა გვიჩვენებს, რა საინტერესო მოვლენას მივიღებთ წყლის ორთქლის შეკუმშვის შედეგად ნახატზე ჯვრით დანიშნულ მდგომარეობაში. ორთქლი ჯერ ყინულად იქცევა, შემდეგ კი გადნება. ნახატი საშუალებას გვაძლევს აქვე ვთქვათ, როგორ წნევაზე დაიწყება კრისტალის ზრდა და როგორზე — დნობა.

ყველა ნივთიერების მდგომარეობის დიაგრამა ერთმანეთსა ჰგავს. საყოფაცხოვრებო თვალსაზრისით დიდი განსხვავება იმის გამო წარმოიშობა, რომ სამმაგი წერტილის დიაგრამაზე მდებარეობის წერტილი სხვადასხვა ნივთიერებისათვის შეიძლება სულ სხვადასხვაგვარი იყოს.

ჩვენ ხომ „ნორმალური პირობების" მახლობლად ვარსებობთ, ე. ი. უპირველეს ყოვლისა 1 ატმოსფეროს ტოლი წნევის მახლობელ პირობებში. როგორ არის განლაგებული ნივთიერების სამმაგი წერტილი ნორმალური წნევის ხაზის მიმართ, ჩვენთვის ეს ძალზე მნიშვნელოვანია.

თუ სამმაგ წერტილში წნევა ატმოსფერულზე ნაკლებია, მაშინ ჩვენთვის, „ნორმალურ" პირობებში მცხოვრებთათვის, ნივთიერება დნობადებს მიეკუთვნება. ტემპერატურის ზრდისას იგი ჯერ სითხედ იქცევა, ხოლო შემდეგ დუღილს დაიწყებს. წინააღმდეგ შემთხვევაში — როცა სამმაგ წერტილში წნევა ატმოსფერულზე მაღალია — გათბობისას ჩვენ ვერ ვიხილავთ სითხეს, მყარი სხეული პირდაპირ იქცევა ორთქლად. ასე ემართება „მყარ ყინულს", რაც ძალიან მოხერხებულია ნაყინის გამყიდველებისათვის. ნაყინის ბრიკეტებს შორის „მშრალი ყინულის" ნაჭრებს ათავსებენ და სულაც არ ეშინიათ, რომ ნაყინი დასველდება. „მშრალი ყინული" არის მყარი ნახშირმჟავა გაზი CO_2. ამ ნივთიერების სამმაგი წერტილი მდებარეობს 73 ატმოსფეროზე. ამიტომაც მყარი CO_2-ის გათბობისას მისი მდგომარეობის გამომსახვე-

ლი წერტილი მოძრაობს ჰორიზონტალზე, რომელიც კვეთს მხოლოდ მყარი სხეულის გამყარების მრუდს (ისევე, როგორც



ნახ. 104.

ჩვეულებრივი ყინულისათვისაც დაახლოებით 5 მმ Hg მახლობელი წნევის პირობებში).

ერთი და იგივე ატომები, მაგრამ სხვადასხვა კრისტალები

შავი მქრქალი, რბილი, გრაფიტი, რომლითაც ჩვენ ვწერთ, და მბრწყინავი გამჭვირვალე, მაგარი, ალმასი, რომელიც მინას ჭრის, ერთი და იმავე ატომებისაგან — ნახშირბადის ატომებისაგან არის აგებული. მაშ ასე რატომ განსხვავდება ამ ორი ერთნაირი შემადგენლობის მქონე ნივთიერების თვისებები?

მოიგონეთ ფენოვანი გრაფიტის მესერი, რომლის ყოველ ატომს სამი მეზობელი ჰყავს, და ალმასის მესერი, სადაც ყოველ ატომს ოთხი უახლოესი მეზობელი ჰყავს. ამ მაგალითზე ნათლად ჩანს, როგორ განისაზღვრება კრისტალების თვისებები ატომების ურთიერთგანლაგებით. გრაფიტისაგან ცეცხლგამძლე ტიგელებს აკეთებენ, რომლებიც ორი-სამი ათას გრადუს ტემპერატურას უძლებენ, ხოლო ალმასი

700°-ზე ზევით იწვის; ალმასის ხვედრითი წონაა 3,5, ხოლო გრაფიტისა —2,3; გრაფიტი ატარებს ელექტრულ დენს, ალმასი არ ატარებს და ა. შ.

ეს თავისებურება — მოგვცეს სხვადასხვა კრისტალები — მარტო ნახშირბადს არ ახასიათებს. თითქმის ყოველი ქიმიური ელემენტი, და არა მარტო ელემენტი, ნებისმიერი ქიმიური ნივთიერებაც, შეიძლება რამდენიმე სახესხვაობის სახით არსებობდეს. ცნობილია ყინულის ექვსი სახესხვაობა, გოგირდის ცხრა სახესხვაობა, რკინის ოთხი სახესხვაობა.

მდგომარეობის დიაგრამაზე მსჯელობისას, ჩვენ არაფერი გვითქვამს კრისტალების სხვადასხვა ტიპებზე, მხოლოდ მყარი სხეულის ერთიანი არე მოვხაზეთ. ეს არე კი ბევრი ნივთიერებისათვის უბნებად იყოფა. ყოველი უბანი შეესაბამება მყარი სხეულის გარკვეულ „ხარისხს", როგორც ამბობენ, გარკვეულ ფაზას (გარკვეულ კრისტალურ მოდიფიკაციას).

ყოველ კრისტალურ ფაზას აქვს თავისი მდგრადი მდგომარეობის არე, რომელიც წნევისა და ტემპერატურის გარკვეული ინტერვალით არის შემოფარგლული. ერთი კრისტალური სახესხვაობის მეორედ გარდაქმნის კანონები ისეთივეა, რაც დნობისა და აორთქლების კანონები.

ყოველგვარი წნევისათვის მოიძებნება ტემპერატურა, რომელზედაც არ დაირღვევა კრისტალების ორივე ტიპის მშვიდობიანი თანაარსებობა. თუ ტემპერატურას გავზრდით, ერთი სახის კრისტალი მეორე სახის კრისტალად დაიწყებს გადაქცევას. თუ ტემპერატურას შევამცირებთ, მაშინ შებრუნებული გარდაქმნა მოხდება.

ნორმალური წნევისას წითელი გოგირდი ყვითელ გოგირდად რომ გარდაიქმნას, საჭიროა 110°C-ზე დაბალი ტემპერატურა. ამ ტემპერატურის ზევით, თვით დნობის ტემპერატურამდე, მდგრადია ატომების ისეთი განლაგების წესი, რომელიც წითელი გოგირდისათვის არის დამახასიათებელი. თუ ტემპერატურა მცირდება — ატომების რხევებიც მცირდება, და 110°C-დან დაწყებული, ბუნება პოულობს ატომების განლაგების უფრო მოხერხებულ წესს. ერთი კრისტალი მეორედ გარდაიქმნება.

ექვსი სხვადასხვა ყინულისათვის არავის არ მოუგონია სახელი. პირდაპირ ამბობენ: ყინული ერთი, ყინული ორი, ..., ყინული შვიდი. შვიდი რატომღა, თუ სულ ექვსი სახესხვაობაა? საქმე ისაა, რომ ყინული ოთხი განმეორებითი ცდების დროს აღარ აღმოჩნდა.

თუ წყალს ნულის მახლობელ ტემპერატურაზე შევკუმშავთ, მაშინ 2000 ატმ მახლობელი წნევისას წარმოიშობა ყინული ხუთი, ხოლო დაახლოებით 6000 ატმ წნევისას — ყინული ექვსი.

ყინული ორი და ყინული სამი მდგრადია ნულ გრადუსზე დაბალ ტემპერატურაზე.

ყინული შვიდი ცხელი ყინულია; იგი წარმოიშობა ცხელი წყლის შეკუმშვის შედეგად დაახლოებით 20.000 ატმ წნევამდე.

ყველა ყინული, ჩვეულებრივის გარდა, წყალზე მძიმეა. ნორმალურ გარემო პირობებში მიღებული ყინული ანომალურად იქცევა; პირიქით, ნორმალურისაგან განსხვავებულ პირობებში მიღებული ყინული ნორმალურად იქცევა.

ჩვენ ვამბობთ, რომ ყოველ კრისტალურ მოდიფიკაციას არსებობის გარკვეული არე შეესაბამება. მაგრამ თუ ასეა, როგორღა არსებობენ ერთნაირ პირობებში გრაფიტი და ალმასი?

ასეთი „უკანონობა" კრისტალების სამყაროში ძალიან ხშირად გვხვდება. „უცხო" პირობებში ცხოვრება კრისტალებისათვის თითქმის კანონს წარმოადგენს. თუ ორთქლის ან სითხის გადასაყვანად სხვების საარსებო არეში სხვადასხვა ხერხების გამოყენებაა საჭირო, კრისტალს, პირიქით, თითქმის ვერასოდეს ვაიძულებთ დარჩეს იმ ფარგლებში, რომლებიც მას ბუნებამ მიუჩინა.

კრისტალების გადაცივებისა და გადახურების მიზეზია ის სიძნელე, რაც თან ახლავს ერთი წესრიგის მეორე წესრიგად გარდაქმნას უკიდურესი სივიწროვის პირობებში. ყვითელი გოგირდი 95,5°C-ზე წითელ გოგირდად უნდა გარდაიქმნას. ცოტად თუ ბევრად სწრაფი გათბობისას ჩვენ „გავირბენთ" ამ გარდაქმნის წერტილს და გოგირდის დნობის ტემპერატურას 113°C-მდე მივიყვანთ.

გარდაქმნის ჭეშმარიტი ტემპერატურის აღმოჩენა ყველაზე უფრო ადვილია კრისტალების ურთიერთშეხებისას. ამისათვის ისინი მჭიდროდ უნდა დავაწყოთ ერთმანეთზე და დავიცვათ 96°C ტემპერატურა. მაშინ ყვითელ გოგირდს წითელი შთანთქავს, ხოლო 95°C-ზე ყვითელი — წითელს. განსხვავებით გადასვლისაგან „კრისტალი — სითხე“, გარდაქმნა „კრისტალი — კრისტალი“, ჩვეულებრივ, როგორც გადაცივების, ასევე გადახურების დროსაც ყოვნდება.

ზოგიერთ შემთხვევაში საქმე ნივთიერების ისეთ მდგომარეობასთან გვაქვს, რომელსაც სულ სხვა ტემპერატურის პირობებში შეჰფერის არსებობა.

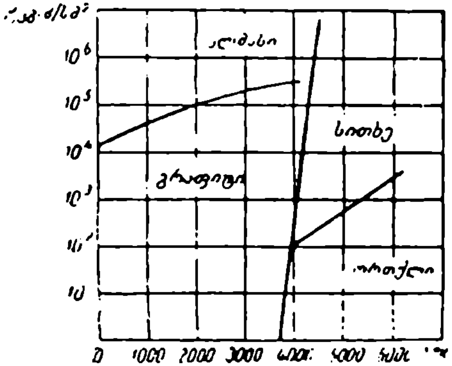
თეთრი კალა ნაცრისფერ კალად უნდა გარდაიქმნას, როცა ტემპერატურა +13°C-მდე დაეცემა. ჩვეულებრივ, საქმე თეთრ კალასთან გვაქვს და ვიცით, რომ ზამთარში იგი უცვლელი რჩება. კალა შესანიშნავად იტანს 20—30-გრადუსიან გადაცივებას. მაგრამ მკაცრი ზამთრის პირობებში თეთრი კალა ნაცრისფერ კალად გარდაიქმნება. ამ ფაქტის უცოდინარობა იყო ერთ-ერთი მიზეზი, რამაც სკოტის ექსპედიცია დაღუპა სამხრეთ პოლუსზე (1912 წ.). ექსპედიციამ თხევადი სათბობი კალით დარჩილული ჭურჭლებით წაიღო. დიდ სიცივეში თეთრი კალა ნაცრისფერ ფხვნილად იქცა — ჭურჭლები დაიშალა და სათბობი დაიღვარა. ნაცრისფერი ლაქების გაჩენას თეთრ კალაზე ტყუილად არ უწოდებენ კალის ჭირს.

ისევე, როგორც გოგირდის შემთხვევაში, თეთრი კალა შეიძლება ნაცრისფერ კალად გარდავქმნათ 13°C-ზე ოდნავ უფრო დაბალ ტემპერატურაზეც, თუკი კალის საგანზე მოხვდება ნაცრისფერი სახესხვაობის პაწაწინა მარცვალი.

ერთი და იმავე ნივთიერების რამდენიმე სახესხვაობის არსებობას და მათი ურთიერთგარდაქმნის დაყოვნებას ტექნიკისათვის უზარმაზარი მნიშვნელობა აქვს.

ოთახის ტემპერატურაზე რკინის ატომები ქმნიან კუბურ მოცულობაცენტრირებულ მესერს, რომელშიც ატომები კუბის წვეროებსა და ცენტრშია განლაგებული. თვითეულ ატომს რვა მეზობელი ჰყავს. მაღალ ტემპერატურაზე რკინის ატომები წარმოქმნიან უფრო მჭიდრო „წყობას“ — თვითეულ

ატომს თორმეტი მეზობელი ჰყავს. რკინა, რომელშიაც მეზობლების რიცხვი რვა არის, რბილია, რკინა, რომელშიაც მეზობლების რიცხვი თორმეტია, მაგარია. თურმე მეორე ტიპის რკინის მიღება შესაძლებელია ოთახის ტემპერატურაზე. ამ ხერხს — წრთობას — ფართოდ იყენებენ მეტალურგიაში.



ნახ. 105.

წრთობა საკმაოდ უბრალოდ მიმდინარეობს — ლითონის საგანს წითლად ავარვარებენ, შემდეგ კი წყალში ან ზეთში აგდებენ. გაციება იმდენად სწრაფია, რომ მაღალ ტემპერატურაზე მდგრადი სტრუქტურა ვერ ასწრებს გარდაქმნას. ამრიგად, მაღალტემპერატურიანი სტრუქტურა განუსაზღვრელად ხანგრძლივი დროის განმავლობაში იარსებებს მისთვის უჩვეულო პირობებში: გადაკრისტალება მდგრად სტრუქტურაში იმდენად ნელა მიმდინარეობს, რომ პრაქტიკულად შესამჩნევი არც არის.

როდესაც რკინის წრთობაზე ვლაპარაკობთ, ჩვენ მთლად ვერ ვიცავთ სიზუსტეს. საერთოდ აწრთობენ ფოლადს, ე. ი. რკინას, რომელიც შეიცავს ნახშირბადს პროცენტის ნაწილების რაოდენობით. ნახშირბადის სულ მცირე მინარევის არსებობა აფერხებს მაგარი რკინის რბილ რკინად გარდაქმნას და წრთობის საშუალებას იძლევა. რაც შეეხება მთლად სუფთა რკინას, მისი წრთობა არ ხერხდება — აქ სტრუქტურა მკვეთრი გაციების შემთხვევაშიც კი ასწრებს გარდაქმნას.

ესა თუ ის გარდაქმნა დამოკიდებულია მდგომარეობის დიაგრამის სახესა და წნევისა და ტემპერატურის შეცვლაზე.

კრისტალი კრისტალად შეიძლება მხოლოდ წნევის შეცვლისას გარდაიქმნას. ასეთი ხერხით მიიღეს შავი ფოსფორი.

გრაფიტის გარდაქმნა ალმასად ერთდროულად მაღალი ტემპერტურისა და დიდი წნევის გამოყენებით მოხერხდა. ნახ. 105-ზე ნაჩვენებია ნახშირბადის მდგომარეობის დიაგრამა. 10.000 ატმოსფეროზე დაბალი წნევისა და 4000°K-ზე ნაკლები ტემპერატურისას მდგრად მოდიფიკაციას წარმოადგენს გრაფიტი. ამრიგად, ალმასი „სხვის" პირობებში ცხოვრობს, ამიტომ იგი ადვილად შეიძლება გრაფიტად გარდავქმნათ. მაგრამ პრაქტიკულ ინტერესს შებრუნებული ამოცანა წარმოადგენს. გრაფიტის ალმასად გარდაქმნა არ ხერხდება მხოლოდ წნევის გადიდებით. ფაზური გარდაქმნა მყარ მდგომარეობაში, როგორც ჩანს, მეტისმეტად ნელა მიმდინარეობს. მდგომარეობის დიაგრამის სახე გვიკარნახებს საკითხის სწორ გადაწყვეტას: გავადიდოთ წნევა და ერთდროულად გავახუროთ გრაფიტი. მაშინ მივიღებთ (დიაგრამის მარჯვენა კუთხე) გამდნარ ნახშირბადს. მისი გაციებით მაღალი წნევის პირობებში ალმასის არეში უნდა მოვხვდეთ.

ასეთი პროცესის პრაქტიკული შესაძლებლობა 1955 წ. დამტკიცდა. ამჟამად პრობლემა ტექნიკურად გადაწყვეტილად ითვლება.

ხაოცარი ხითხე

თუ სხეულის ტემპერატურას შევამცირებთ, მაშინ ადრე თუ გვიან იგი გამყარდება და კრისტალურ სტრუქტურას მიიღებს. ამ დროს სულ ერთია, როგორ წნევაზე მიმდინარეობს გაციება. ეს გარემოება სავსებით ბუნებრივი და გასაგები ჩანს ფიზიკის იმ კანონების თვალსაზრისით, რომლებსაც უკვე გავეცანით. მართლაც, ტემპერატურის შემცირებისას, ჩვენ ვამცირებთ სითბური მოძრაობის ინტენსივობას. როდესაც მოლეკულების მოძრაობა იმდენად სუსტდება, რომ ველარ უშლის ხელს მათ შორის ურთიერთქმედების ძალებს, მოლე-

კულები გარკვეული წესით მწკრივდებიან — წარმოშობენ კრისტალს. შემდგომი გაცივება მოლეკულებს ართმევს მათი მოძრაობის მთელ ენერგიას და აბსოლუტურ ნულზე ნივთიერება უნდა არსებობდეს უმოძრაო მოლეკულების სახით, რომლებიც წესიერ მესერს ქმნიან.

ცდა გვიჩვენებს, რომ ასე იქცევა ყველა ნივთიერება. ყველა, ერთის გარდა: ასეთი „მახინჯი" გახლავთ ჰელიუმი.

ზოგიერთი ცნობა ჰელიუმის შესახებ ჩვენ უკვე მივაწოდეთ მკითხველს. ჰელიუმი არის რეკორდსმენი თავისი კრიტიკული ტემპერატურის მნიშვნელობის მიხედვით. არც ერთ ნივთიერებას არა აქვს 4,3°K-ზე უფრო დაბალი კრიტიკული ტემპერატურა. მაგრამ თავისთავად ეს რეკორდი სულაც არ არის გასაკვირი. საოცარი სხვა რამეა: ჰელიუმის გაცივებისას კრიტიკულ ტემპერატურაზე დაბლა, პრაქტიკულად აბსოლუტური ნულის მიღწევის შემდეგ ჩვენ ვერ მივიღებთ მყარ ჰელიუმს. ჰელიუმი აბსოლუტურ ნულზეც თხევადი რჩება.

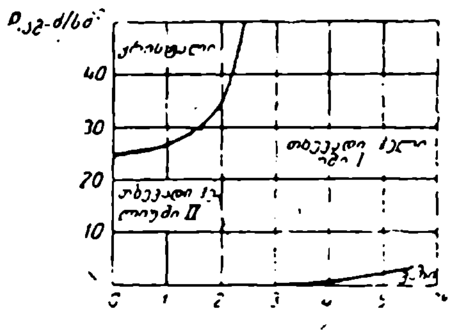
ჰელიუმის ქცევა სავსებით აუხსნელია ჩვენ მიერ გადმოცემული მოძრაობის კანონების თვალსაზრისით და ბუნების იმ კანონების შეზღუდული ვარგისიანობის ერთ-ერთ ნიშანს წარმოადგენს, რომლებიც უნივერსალური ეგონათ.

თუ სხეული თხევადია, მაშინ მისი ატომები მოძრაობაშია, მაგრამ სხეულის აბსოლუტურ ნულამდე გაცივებისას ჩვენ ხომ მას მოძრაობის მთელ ენერგიას ვართმევთ. იძულებული ვართ ვაღიაროთ, რომ ჰელიუმს აქვს მოძრაობის ისეთი ენერგია, რომლის წართმევაც შეუძლებელია. ეს დასკვნა შეუთავსებელია მექანიკასთან, რომელსაც ჩვენ აქამდე ვსწავლობდით, რადგან ვიცით, რომ სხეულის მოძრაობა ყოველთვის შეიძლება დავამუხრუჭოთ სრულ გაჩერებამდე, თუ მას მთელ კინეტიკურ ენერგიას წავართმევთ; ზუსტად ასევე შეიძლება შევაჩეროთ მოლეკულების მოძრაობა, თუ მათ წავართმევთ ენერგიას იმ ჭურჭლის კედლებთან დაჯახებისას, რომელსაც ვაცივებთ. ჰელიუმისათვის ასეთი მექანიკა აშკარად შეუფერებელია.

ჰელიუმის „უცნაური" ქცევა უდიდესი მნიშვნელობის ფაქტზე მიგვითითებს. ჩვენ პირველად შევხვდით ატომთა სამყაროში მექანიკის ძირითადი კანონების გამოყენების შე-

უძლებლობას. ეს კანონები კი ხილული სხეულების მოძრაობის უშუალო შესწავლის შედეგად არის დადგენილი და ფიზიკის ურყევ საფუძვლადაა მიჩნეული.

ის ფაქტი, რომ აბსოლუტურ ნულზე ჰელიუმი „უარს ამბობს“ დაკრისტალდეს, არავითარი ხერხით არ შეიძლება



ნახ. 106.

შევარიგოთ იმ მექანიკასთან, რომელსაც ჩვენ აქამდე ვსწავლობდით. წინააღმდეგობა, რომელსაც ჩვენ პირველად შევხვდით, — ატომების სამყაროს დაუმორჩილებლობა მექანიკის კანონებისათვის, — მხოლოდ პირველი რგოლია იმ ჯაჭვისა, რომელსაც კიდევ უფრო მკვეთრი და მწვავე წინააღმდეგობები ქმნის ფიზიკაში.

ამ წინააღმდეგობებს მივყავართ ატომის სამყაროს მექანიკის საფუძვლების მეტად ღრმა გადასინჯვის აუცილებლობასთან, რაც თავის მხრივ ბუნების მთელი ჩვენი გაგების შეცვლას გამოიწვევს.

ატომის სამყაროს მექანიკის საფუძვლიანი გადასინჯვის აუცილებლობა იმას როდი ნიშნავს, რომ შესწავლილ მექანიკის კანონებს ხაზი გადავუსვათ. უმართებულო იქნებოდა. იძულებული გაგვეხადა მკითხველი, შეესწავლა გამოუსადეგარი საგნები. ძველი მექანიკა სავსებით სამართლიანია დიდი სხეულების სამყაროში. ესეც კი საკმარისია იმისათვის, რომ ფიზიკის სათანადო თავებს სრული პატივისცემით მოვეპყრათ. მაგრამ მნიშვნელოვანია ისიც, რომ „ძველი“ მექანიკის მრა-

ვალი კანონი უცვლელად გადადის „ახალ“ მექანიკაში. ამას მიეკუთვნება, კერძოდ, ენერგიის მუდმივობის კანონი.

ისეთი ენერგიის არსებობა, რომლის „წართმევაც“ არ შეიძლება აბსოლუტურ ნულზე, ჰელიუმის განსაკუთრებულ თვისებას არ წარმოადგენს. ირკვევა, რომ „ნულოვანი“ ენერგია ყველა ნივთიერებასა აქვს. მხოლოდ ჰელიუმისათვის ეს ენერგია საკმარისია საიმისოდ, რომ ხელი შეუშალოს წესიერი კრისტალური მესერის წარმოქმნას.

არ უნდა ვიფიქროთ, თითქოს ჰელიუმი არ შეიძლება იყოს კრისტალურ მდგომარეობაში. ჰელიუმის დასაკრისტალებლად საჭიროა მხოლოდ წნევის აწევა დახლოებით 25 ატმ-მდე. ამ წნევაზე ზევით გაცივებას მყარი კრისტალური ჰელიუმის წარმოქმნა მოსდევს. ასეთ ჰელიუმს ჩვეულებრივი თვისებები აქვს. იგი ქმნის კუბურ წახნაგ-ცენტრირებულ მესერს.

ნახ. 106-ზე ნაჩვენებია ჰელიუმის მდგომარეობის დიაგრამა. იგი მკვეთრად განსხვავდება ყველა სხვა ნივთიერების დიაგრამებისაგან სამმაგი წერტილის არარსებობით. დუღილისა და დნობის მრუდები არ გადაიკვეთება.

XIII. ᲮᲡᲜᲐᲠᲔᲑᲘ

ᲠᲐ ᲐᲠᲘᲡ ᲮᲡᲜᲐᲠᲘ

ბულიონს რომ მარილი მოვაყაროთ და მოვურიოთ, მარილის კვალიც კი აღარ დარჩება. არ გეგონოთ, რომ მარილის მარცვლები შეუიარაღებელი თვალით არა ჩანს. მარილის კრისტალების აღმოჩენა არავითარი საშუალებით არ შეიძლება, რადგან ისინი გაიხსნენ. ბულიონში რომ პილპილი ჩავამატოთ, ხსნარს ვერ მივიღებთ, თუნდაც ბულიონს უსასრულოდ ვურიოთ — პაწაწინა შავი მარცვლები მაინც არ გაქრება.

მაგრამ რას ნიშნავს გამოთქმა „ნივთიერება გაიხსნა“? ხომ არ შეიძლება უკვალოდ გაქრნენ ნივთიერების შემადგენელი ატომები და მოლეკულები? რასაკვირველია, არა, ისინი არ ქრებიან. გახსნის დროს ქრება მხოლოდ ნივთიერების მარცვალი, პატარა კრისტალი, ერთი ხარისხის მოლეკულების დაჯგუფება. გახსნა არის ნარევის ნაწილაკების ისეთი არევა,

რომლის დროსაც ერთი ნივთიერების მოლეკულები მეორე ნივთიერების მოლეკულებს შორის ნაწილდება. ხსნარი სხვადასხვა ნივთიერებების მოლეკულების ან ატომების ნარევია.

ნარევი შეიძლება გახსნილი ნივთიერების სხვადასხვა რაოდენობას შეიცავდეს. ხსნარის შემადგენლობა მისი კონცენტრაციით ხასიათდება, მაგალითად, გახსნილი ნივთიერების გრამების რაოდენობის შეფარდებით ხსნარის ლიტრების რიცხვთან.

გასახსნელი ნივთიერების დამატებისდა მიხედვით ხსნარის კონცენტრაცია იზრდება, მაგრამ არა უსაზღვროდ. ადრე თუ გვიან ხსნარი ნაჯერი ხდება და „აღარ ღებულობს“ გასახსნელ ნივთიერებას. ნაჯერი ხსნარის კონცენტრაციას, ანუ ხსნარის „ზღვრულ“ კონცენტრაციას ხსნადობა ეწოდება.

საოცრად ბევრი შაქრის გახსნა შეიძლება ცხელ წყალში. 80°C ტემპერატურაზე ერთი ჭიქა წყალი მთლიანად მიიღებს 720 გ შაქარს. ეს ნაჯერი ხსნარი სქელი და ბლანტი იქნება, მზარეულები მას შაქრის სიროფს უწოდებენ. ჩვენ შაქრის მნიშვნელობა თლილი ჭიქისათვის მოვიყვანეთ, რომლის ტევადობა 0,2 ლიტრია. მაშასადამე, შაქრის კონცენტრაცია 80°C-ზე 3600 გ/ლ ტოლია (გ/ლ იკითხება: „გრამი ლიტრზე“).

ზოგიერთი ნივთიერების ხსნადობა დიდად არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე. ოთახის ტემპერატურაზე (20°C) წყალში შაქრის ხსნადობა 2000 გ/ლ-მდე ეცემა. პირიქით, მარილის ხსნადობა სრულიად უმნიშვნელოდ იცვლება ტემპერატურის შეცვლისას.

შაქარი და მარილი კარგად იხსნება წყალში. მაგრამ ნაფთალინი წყალში პრაქტიკულად უხსნადია. სხვადასხვა გამხსნელებში სხვადასხვა ნივთიერებები სრულიად სხვადასხვაგვარად იხსნება.

ხსნარებს იყენებენ მონოკრისტალების გასაზრდელად. ნაჯერ ხსნარში გახსნილი ნივთიერების პატარა კრისტალი რომ დავკიდოთ, მაშინ გამხსნელის აორთქლებისდა მიხედვით გახსნილი ნივთიერება ამ კრისტალის ზედაპირზე დაილექება. ამასთან, მოლეკულები მკაცრ წესრიგს დაიცავენ, პატარა კრისტალი გაიზრდება და მონოკრისტალად დარჩება.

სითხეებისა და გაზების ხსნარები

შეიძლება თუ არა სითხის სითხეში გახსნა? რასაკვირველია, შეიძლება. მაგალითად, არაყი — არის სპირტის ხსნარი წყალში (ან, თუ გნებავთ, წყლისა სპირტში, იმის მიხედვით, რომელი უფრო მეტია). არაყი ნამდვილი ხსნარია, წყლისა და სპირტის მოლეკულები შიგ სავსებით შერეულია.

მაგრამ ორი სითხის შერევისას ყოველთვის არ მიიღება ასეთი შედეგი.

სცადეთ წყალში ნავთი ჩაასხათ. ვერავითარი არევით ვერ მოახერხებთ ერთგვაროვანი ხსნარის მიღებას, ეს ისევე უიმედოა, როგორც პილპილის წვენში გახსნა. როგორც კი შეწყვეტთ არევას, სითხეები შრეებად განლაგდება: უფრო მძიმე წყალი — ქვემოთ, უფრო მსუბუქი ნავთი — ზემოთ. წყლიანი ნავთი და წყლიანი სპირტი ხსნადობის თვისებების მიხედვით ურთიერთსაწინააღმდეგო სისტემებია.

მაგრამ საშუალედო შემთხვევებიც არსებობს. ეთერი რომ წყალს შევურიოთ, ჭურჭელში გარკვევით დავინახავთ ორ ფენას. ერთი შეხედვით შეიძლება გვეჩვენოს, რომ ზემოდან ეთერია, ხოლო ქვევით წყალი. სინამდვილეში კი როგორც ქვედა, ისე ზედა ფენაც ხსნარს წარმოადგენს: ქვევით — წყალია, რომელშიაც ეთერის ნაწილია გახსნილი (კონცენტრაცია: 25 გ. ეთერი ერთ ლიტრ წყალზე), ზემოდან კი — ეთერი, რომელშიც წყლის შესამჩნევი რაოდენობა ურევია (60 გ/ლ).

ახლა გაზების ხსნარებით დავინტერესდეთ. ცხადია, ყველა გაზი განუსაზღვრელი რაოდენობით იხსნება ერთმანეთში. ორი გაზი ყოველთვის ისეთ ნარევს ქმნის, რომ ერთის მოლეკულები მეორის მოლეკულებს შორის აღწევენ. გაზის მოლეკულები ხომ მცირედ ურთიერთქმედებენ ერთმანეთთან და ყოველი გაზი მეორის თანდასწრებით გარკვეული აზრით ისე იქცევა, თითქოს „ყურადღებას“ არ აქცევდეს თავის თანამცხოვრებს.

გაზები სითხეებშიაც იხსნება. მაგრამ უკვე არა ნებისმიერი, არამედ განსაზღვრული რაოდენობებით. ამ მხრივ ისინი მყარი სხეულებისგან არ განსხვავდებიან, ამასთან, სხვადა-

სხვა გაზი სხვადასხვაგვარად იხსნება, და ეს განსხვავება ძალიან დიდი შეიძლება იყოს. წყალში დიდი რაოდენობით იხსნება ამიაკი (ნახევარ ჭიქა ცივ წყალზე დაახლოებით 100 გ), გოგირდწყალბადი და ნახშირმჟავა. უმნიშვნელო რაოდენობით იხსნება წყალში ჟანგბადი და აზოტი (0,07 და და 0,03 გ ერთ ლიტრ წყალზე). ამრიგად, ერთ ლიტრ ცივ წყალში არის დაახლოებით გრამის მეასედი ჰაერი. მაგრამ ამ მცირე რაოდენობასაც დიდი მნიშვნელობა აქვს დედამიწაზე სიცოცხლისათვის — წყალში გახსნილი ჟანგბადით ხომ თევზები სუნთქავენ.

რაც მეტია გაზის წნევა, მით მეტი რაოდენობით იხსნება ის სითხეში. თუ გახსნილი გაზის რაოდენობა ძალიან დიდი არ არის, მაშინ ამ რაოდენობასა და სითხის ზედაპირზე არსებულ გაზის წნევას შორის პირდაპირპროპორციულობა მყარდება.

ვის არ მიუღია სიამოვნება ცივი გაზიანი წყლისაგან, ასე კარგად რომ კლავს წყურვილს! გაზიანი წყალი მიიღება იმ დამოკიდებულების წყალობით, რაც არსებობს გახსნილი გაზის რაოდენობასა და წნევას შორის. ნახშირმჟავა გაზს წნევით სდენიან წყალში (ბალონებიდან, რომლებიც გაზიანი წყლის ყველა კიოსკში აქვთ). როდესაც წყალს ჭიქაში ასხამენ, წნევა ატმოსფერულამდე ეცემა და წყალი „ზედმეტ" გაზს ბუშტების სახით გამოჰყოფს.

თუ ასეთ ეფექტებს გავითვალისწინებთ, ცხადი გახდება, რომ არ შეიძლება მყვინთავების სწრაფად ამოყვანა წყლის ზედაპირზე. დიდი წნევისას ღრმა წყალში მყვინთავის სისხლში იხსნება ჰაერის დამატებითი რაოდენობა. ზევით ამოსვლისას წნევა ეცემა, ჰაერი ბუშტების სახით გამოიყოფა და შეიძლება სისხლძარღვები დაიხშოს.

მყარი ხსნარები

ყოველდღიურ ცხოვრებაში სიტყვა „ხსნარი" სითხეებისათვის იხმარება. მაგრამ არსებობს მყარი ნარევებიც, რომელთა ატომები და მოლეკულები ერთგვაროვნად არის შერეული.

როგორ უნდა მივიღოთ მყარი ხსნარები? ფილთაქვისა და როდინის საშუალებით მათი მიღება არ შეიძლება. ამიტომ ერთმანეთში შესარევი ნივთიერებები ჯერ სითხედ უნდა ვაქციოთ, ე. ი. გავადნოთ, შემდეგ სითხეები შევურიოთ და ნარევს გამყარების საშუალება მივცეთ. შეიძლება სხვაგვარადაც მოვიქცეთ — გავხსნათ ორი ნივთიერება, რომელთა შერევაც გვსურს, რაიმე სითხეში და შემდეგ გამხსნელი ავაორთქლოთ. ასეთი ხერხით შეიძლება მყარი ხსნარების მიღება. შეიძლება, მაგრამ, ჩვეულებრივ, არ მიიღება. მყარი ხსნარები იშვიათობაა. მარილიან წყალში შაქრის ნატეხი რომ ჩავაგდოთ, იგი მშვენივრად გაიხსნება. ამოვაშროთ წყალი; ჯამის ძირზე აღმოჩნდება მარილისა და შაქრის უწვრილესი კრისტალები. მარილი და შაქარი მყარ ხსნარს არ იძლევა.

ერთ ტიგელში შეიძლება გავადნოთ კადმიუმი და ბისმუტი. გაცივების შემდეგ მიკროსკოპში დავინახავთ კადმიუმისა და ბისმუტის კრისტალების ნარევს. არც ბისმუტი და კადმიუმი ქმნიან მყარ ხსნარებს.

მყარი ხსნარების წარმოშობის აუცილებელი, თუმცა არასაკმარისი პირობა შესარევ ნივთიერებათა მოლეკულების ან ატომების დაახლოებით ერთნაირი ფორმა და ზომაა. ამ შემთხვევაში ნარევის გაყინვისას წარმოიშობა ერთი სახის კრისტალები. ყოველი კრისტალის კვანძები, ჩვეულებრივ, უწესრიგოდ არის დაკავებული სხვადასხვა სახის ატომებით (მოლეკულებით).

ლითონთა შენადნობები, რომელთაც დიდი ტექნიკური მნიშვნელობა აქვთ, ხშირად მყარ ხსნარებს წარმოადგენენ. მინარევის მცირე რაოდენობის გახსნით შეიძლება ლითონის თვისებები მკვეთრად შეიცვალოს. ამის მკაფიო ილუსტრაციაა ტექნიკაში ერთ-ერთი ყველაზე უფრო გავრცელებული ლითონის — ფოლადის მიღება, რომელიც წარმოადგენს ნახშირბადის მცირე რაოდენობის მყარ ხსნარს რკინაში (ნახშირბადის 0,5 წონითი პროცენტი, ანუ ნახშირბადის ერთი ატომი რკინის 40 ატომზე). ამასთან, ნახშირბადის ატომები უწესრიგოდ არის ჩანერგილი რკინის ატომებს შორის.

რკინაში ნახშირბადის ატომების მხოლოდ მცირე რაოდენობა იხსნება. მაგრამ ზოგიერთი მყარი ხსნარი მიიღება

ნივთიერებათა ნებისმიერი პროპორციებით შერევის შედეგად. ავიღოთ, მაგალითად, ოქროსა და სპილენძის შენადნობი. ოქროს და სპილენძის კრისტალებს ერთნაირი ტიპის კუბური წახნაგცენტრირებული მესერები აქვთ. ასეთივე მესერი აქვს სპილენძის შენადნობს ოქროსთან. თუ გვსურს წარმოდგენა გვქონდეს სპილენძის სულ უფრო მზარდი ნაწილის მქონე შენადნობის სტრუქტურაზე, უნდა აზრით მოვაცილოთ მესერს ოქროს ატომები და სპილენძის ატომებით შევცვალოთ ისინი. ამასთან, შეცვლა უწესრიგოდ ხდება, სპილენძის ატომები მესერის კვანძებში ნებისმიერად ნაწილდება. სპილენძის შენადნობებს ოქროსთან შეიძლება ჩანაცვლების ხსნარები ვუწოდოთ, ხოლო ფოლადი სხვა ტიპის — ჩანერგვის ხსნარს წარმოადგენს.

უმეტეს შემთხვევაში მყარი ხსნარები არ მიიღება, და, როგორც ზემოთ იყო ნათქვამი, გაცივების შემდეგ მიკროსკოპში ნივთიერება ორივე შემადგენელი ნაწილის წვრილი კრისტალების ნარევის სახით მოჩანს.

როგორ იყინება ხსნარები

თუ რომელიმე მარილის წყალხსნარს გავაცივებთ, გამოირკვევა, რომ გაყინვის ტემპერატურა დაცემულია. ნული გრადუსი გავლილია, ხსნარი კი არ გამყარებულა. მხოლოდ ნულს ქვემოთ რამდენიმე გრადუსზე წარმოიშობა სითხეში კრისტალები. ეს არის სუფთა ყინულის კრისტალები, მყარ ყინულში მარილი არ იხსნება.

გაყინვის ტემპერატურა დამოკიდებულია ხსნარის კონცენტრაციაზე. ხსნარის კონცენტრაციის გადიდებით, დაკრისტალების ტემპერატურა მცირდება. გაყინვის ყველაზე დაბალი ტემპერატურა ნაჯერ ხსნარსა აქვს. ხსნარის გაყინვის ტემპერატურის შემცირება საგრძნობლად შეიძლება: მაგალითად, სუფრის მარილის ნაჯერი ხსნარი წყალში იყინება — 21°C-ზე. სხვა მარილების დახმარებით შეიძლება მივაღწიოთ ტემპერატურის კიდევ უფრო მეტ დაქვეითებას; ქლოროვანი კალციუმი, მაგალითად, საშუალებას

იძლევა ხსნარის გამყარების ტემპერატურა — 55°C-მდე დავიყვანოთ.

ახლა განვიხილოთ, როგორ მიმდინარეობს გაყინვის პროცესი. მას შემდეგ, რაც ხსნარიდან ყინულის პირველი კრისტალები გამოიყოფა, ხსნარის სიმაგრე გაიზრდება. გარეშე მოლეკულების ფარდობით რიცხვთან ერთად მოიმატებს დაბრკოლებები წყლის დაკრისტალების პროცესისათვის და გაყინვის ტემპერატურა დაეცემა. თუ ტემპერატურის შემცირებას არ განვაგრძობთ, დაკრისტალება შეჩერდება. ტემპერატურის შემდგომი დაწევისას წყლის (გამხსნელის) კრისტალები განაგრძობენ გამოყოფას. ბოლოს, ხსნარი ნაჯერი გახდება. ხსნარის შემდგომი გამდიდრება გახსნილი ნივთიერებით შეუძლებელია, იგი უცებ გაიყინება. ამასთან, თუ გაყინულ ნარევს მიკროსკოპში გავსინჯავთ, დავინახავთ. რომ იგი ყინულისა და მარილის პატარ-პატარა კრისტალებისაგან შედგება.

ამრიგად, ხსნარი უბრალო სითხესავით არ იყინება. გაყინვის პროცესი ტემპერატურის უფრო დიდ ინტერვალზე იჭიმება.

რა მოხდება, რომელიმე მოყინულ ზედაპირს მარილი რომ მოვაყაროთ? ამ კითხვაზე ყველაზე უკეთ მეეზოვეები გაგვცემენ პასუხს: როგორც კი მარილი ყინულს შეეხება, ყინული დნობას დაიწყებს. ამისათვის, რასაკვირველია, საჭიროა მარილის ნაჯერი ხსნარის გაყინვის ტემპერატურა ჰაერის ტემპერატურაზე დაბალი იყოს. თუ ეს პირობა დაცულია, მაშინ ყინულისა და მარილის ნარევი მდგომარეობის უცხო არეში, სახელდობრ, ხსნარის მდგრადი არსებობის არეში იმყოფება. სწორედ ამიტომ გარდაიქმნება ყინულისა და მარილის ნარევი ხსნარად, ე. ი. ყინული დაიწყებს დნობას, ხოლო მარილი — წარმოშობილ წყალში გახსნას. ბოლოს და ბოლოს, ან მთელი ყინული გადნება, ან ისეთი კონცენტრაციის ხსნარი წარმოიშობა, რომლის გაყინვის ტემპერატურა გარემოს ტემპერატურის ტოლია.

100 კვადრატული მეტრი ფართის პატარა ეზო 1 სმ სისქის ყინულის ქერქით არის დაფარული — ეს უკვე საკმაო რაოდენობის ყინულია, იგი დაახლოებით ერთ ტონას შეად-

გეხს. გამოვიანგარიშოთ, რამდენი მარილი იქნება საჭირო ეზოს გასასუფთავებლად, თუ ტემპერატურა — 3°C. დაკრისტალების (დნობის) ასეთი ტემპერატურა აქვს მარილის ხსნარს, რომლის კონცენტრაცია 45 გ/ლ. 1 ლ წყალი დაახლოებით 1 კგ ყინულს შეესაბამება. მაშ, 1 ტ ყინულის გასადნობად — 3°C-ზე საჭიროა 45 კგ მარილი. პრაქტიკულად იყენებენ გაცილებით ნაკლებ რაოდენობას, რადგანაც ყინულის მთლიანი გადნობა არ არის საჭირო.

მარილთან ყინულის შერევისას ყინული დნება, ხოლო მარილი წყალში იხსნება. მაგრამ დნობისათვის საჭიროა სითბო და ყინული მას თავის გარემოსართმევს. ამრიგად, ყინულისათვის მარილის მიმატება ტემპერატურის დაწევას იწვევს.

ჩვენ ახლა, ჩვეულებრივ, ფაბრიკებში დამზადებულ ნაყინს ვყიდულობთ. წინათ ნაყინს შინ ამზადებდნენ და მაცივრის როლს ყინულისა და მარილის ნარევი ასრულებდა.

ხსნარების დუღილი

ხსნარების დუღილის მოვლენას ბევრი რამ აქვს საერთო გაყინვის მოვლენასთან.

გახსნილი ნივთიერება დაკრისტალებას აძნელებს. ამავე მიზეზით გახსნილი ნივთიერება აძნელებს დუღილსაც. ორივე შემთხვევაში გარეშე მოლეკულები თითქოს იბრძვიან, რაც შეიძლება უფრო გაზავებული ხსნარის შენარჩუნებისათვის. სხვანაირად რომ ვთქვათ, გარეშე მოლეკულები ასტაბილიზებენ ძირითადი ნივთიერების მდგომარეობას, ე. ი. ხელს უწყობენ იმ ნივთიერების არსებობას, რომელსაც მათი გახსნა შეუძლია.

ამიტომ გარეშე მოლეკულები ხელს უშლიან სითხის დაკრისტალებას და, მაშასადამე, დაბლა სწევენ ამ პროცესის ტემპერატურას. სწორედ ასევე გარეშე მოლეკულები ხელს უშლიან სითხის დუღილს და, მაშასადამე, ამაღლებენ მისი დუღილის ტემპერატურას.

საინტერესოა, რომ კონცენტრაციის გარკვეულ საზღვრებამდე (შედარებით სუსტი ხსნარებისათვის) როგორც ხსნა-

რის დაკრისტალების ტემპერატურის დაწევა, ისე დუღილის ტემპერატურის აწევა სრულებით არ არის დამოკიდებული გახსნილი ნივთიერების თვისებებზე და მისი მოლეკულების რაოდენობით განისაზღვრება. ამ საინტერესო გარემოებას გახსნილი ნივთიერების მოლეკულური წონის განსაზღვრისათვის იყენებენ. ეს კეთდება ერთი შესანიშნავი ფორმულის დახმარებით, რომელსაც აქ ვერ მოვიყვანთ. ეს ფორმულა აკავშირებს გაყინვის ან დუღილის ტემპერატურას ხსნარის მოცულობის ერთეულში არსებული მოლეკულების რაოდენობასთან (და დნობის ან დუღილის სითბოსთან).

წყლის დუღილის ტემპერატურა თითქმის სამჯერ უფრო ნაკლებად იზრდება, მისი გაყინვის ტემპერატურის შემცირებასთან შედარებით. მაგალითად, დაახლოებით 3,5% მარილების შემცველი ზღვის წყლის დუღილის წერტილია 100,6°C. იმდროს, როცა მისი გაყინვის ტემპერატურა 2°C-ით მცირდება.

თუ ერთი სითხე უფრო მაღალ ტემპერატურაზე დუღს, ვიდრე მეორე, მაშინ (იმავე ტემპერატურაზე) მისი ორთქლის დრეკადობა ნაკლებია. ამრიგად, ხსნარის ორთქლის დრეკადობა ნაკლებია სუფთა გამხსნელის ორთქლის დრეკადობაზე. განსხვავებაზე შეიძლება შემდეგი ციფრების მიხედვით ვიმსჯელოთ: წყლის ორთქლის დრეკადობა 20°C-ზე 17,5 მმ Hg-ის ტოლია. სუფრის მარილის ნაჯერი ხსნარის ორთქლის დრეკადობა იმავე ტემპერატურაზე 13,2 მმ Hg.

ორთქლი, რომლის დრეკადობაა 15 მმ Hg, გაუჯერებელია წყლისათვის, მაგრამ გადაჯერებული იქნება მარილის ნაჯერი ხსნარისათვის. ასეთ ხსნართან შეხებისას ორთქლი იწყებს კონდენსირებას და ხსნარად იქცევა. რასაკვირველია, ჰაერიდან წყლის ორთქლს შთანთქავს არა მარტო მარილის ხსნარი, არამედ ფხვნილი მარილიც. მარილზე გამოყოფილი წყლის პირველივე წვეთი გახსნის მას და გაჯერებულ ხსნარს შექმნის.

წყლის ორთქლის შესრუტვის შედეგად მარილი სველდება. ეს არასასიამოვნო ამბავი კარგად იციან დიასახლისებმა. მაგრამ ხსნარს ზემოთ ორთქლის დრეკადობის დადაბლება სასარგებლოც არის: ლაბორატორიულ პრაქტიკაში მას

იყენებენ ჰაერის გასაშრობად. ჰაერს ატარებენ ქლოროვან კალციუმში, რომელიც რეკორდსმენია ჰაერიდან სინოტივის შთანთქმაში. თუ სუფრის მარილის ნაჯერი ხსნარისათვის ორთქლის დრეკადობა 13,2 მმ Hg, ქლოროვანი კალციუმისათვის იგი 5,6 მმ Hg. ამ მნიშვნელობამდე დაეცემა წყლის ორთქლის დრეკადობა, როცა მას ქლოროვანი კალციუმის საკმარის რაოდენობაში გავატარებთ (ქლოროვანი კალციუმის 1 კგ დაახლოებით 1 კგ წყალს „იტევს"). ეს უმნიშვნელო სინოტივეა და ჰაერი შეიძლება მშრალად ჩაითვალოს.

როგორ ასუფთავებენ სითხეებს მინარევებისაგან

მინარევებისაგან სითხეების გასუფთავების ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი ხერხია გამოხდა. სითხეს ადუღებენ და ორთქლის მაცივარში უშვებენ. გაცივებისას ორთქლი კვლავ სითხედ იქცევა, მაგრამ იგი უკვე საწყისზე სუფთაა.

გამოხდის საშუალებით ადვილია სითხეში გახსნილი მყარი ნივთიერებების გამოყოფა. ასეთი ნივთიერებების მოლეკულები ორთქლში პრაქტიკულად არ არის. ამ ხერხით ღებულობენ გამოხდილ წყალს — სრულიად უგემურ სუფთა წყალს, რომელშიც არ არის მინერალები.

მაგრამ აორთქლების გამოყენებით შეიძლება თხევადი მინარევებისგანაც გავაცალკევოთ ორი ან მეტი სითხისაგან შემდგარი ნარევი. ამ დროს იმ გარემოებით სარგებლობენ, რომ ნარევის წარმომქმნელი ორივე სითხე ერთნაირად „ადვილად" არ დუღს.

ვნახოთ, როგორ მოიქცევა დუღილის დროს ორი სითხის ნარევი, მაგალითად, ტოლი პროპორციებით აღებული წყლისა და ეთილის სპირტის ნარევი (50-გრადუსიანი არაყი).

ნორმალური წნევისას წყალი 100°C დუღს, ხოლო სპირტი — 78°C. ჩვენი ნარევი ადუღდება 81,2°C საშუალედო ტემპერატურაზე. სპირტი უფრო ადვილად დუღს, ამიტომ მისი ორთქლის დრეკადობა მეტია, და ნარევის საწყისი ორმოცდაათპროცენტიანი შემადგენლობისას ორთქლის პირველ პორციაში სპირტის 80% იქნება.

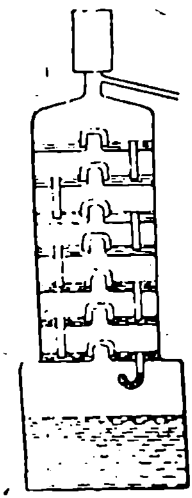
ორთქლის მიღებული პორცია შეიძლება ძაცივარში გადავიყვანოთ და სპირტით გამდიდრებული სითხე მივიღოთ. შემდეგ ეს პროცესი შეიძლება რამდენჯერმე გავიმეოროთ. ცხადია, პრაქტიკისათვის ასეთი ხერხი ხელსაყრელი არ არის — ყოველი შემდგომი გამოხდისას ხომ სულ უფრო და უფრო ნაკლები ნივთიერება მიიღება. ასეთ დანაკარგს ადგილი რომ არ ჰქონდეს, გასუფთავების მიზნით ეგრეთწოდებული სარექტიფიკაციო (ანუ გამასუფთავებელი) სვეტები უნდა გამოვიყენოთ.

ეს საინტერესო აპარატი შემდეგნაირადაა მოწყობილი: წარმოვიდგინოთ ვერტიკალური სვეტი, რომლის ქვედა ნაწილშიც თხევადი ნარევია მოთავსებული. სვეტის ძირს ათბობენ, ზედა ნაწილს კი აცივებენ. დუღილის დროს წარმოქმნილი ორთქლი ზევით ადის და კონდენსირდება; გამოყოფილი სითხე კი ძირს ჩადის. თუ სვეტის ძირი განუწყვეტლივ თბება, ხოლო ზედა ნაწილი განუწყვეტლივ ცივდება, მაშინ დახურულ სვეტში დამყარდება ზევით მიმავალი ორთქლისა და ქვევით მიმავალი სითხის შემხვედრი ნაკადები.

შევაჩეროთ ყურადღება სვეტის რომელიმე ჰორიზონტალურ კვეთაზე. ამ კვეთაში სითხე ქვევით ჩადის, ხოლო ორთქლი ზევით ადის, ამასთან, თხევად ნარევში შემავალი არც ერთი ნივთიერება არ ყოვნდება. თუ გვაქვს სპირტისა და წყლის ნარევით შევსებული სვეტი, მაშინ ზევით და ქვევით მოძრავი სპირტისა და წყლის რაოდენობა ტოლი იქნება. იმის გამო, რომ სითხე ქვევით მიდის, ხოლო ორთქლი — ზევით, სვეტის ნებისმიერ სიმაღლეზე სითხისა და ორთქლის შემადგენლობა ერთნაირი იქნება.

როგორც ზემოთ გამოვარკვიეთ, ორი ნივთიერების ნარევის სითხისა და ორთქლის წონასწორობა მოითხოვს, პირიქით, თხევადი და ორთქლისებური ფაზების სხვადასხვა შემადგენლობას. ამიტომაც სვეტის ნებისმიერ სიმაღლეზე სითხე ორთქლად იქცევა და ორთქლი — სითხედ. ამასთან, კონდესირდება ნარევის მაღალ ტემპერატურაზე მდუღარე ნაწილი. ხოლო სითხიდან ორთქლად იქცევა დაბალ ტემპერატურაზე მდუღარე შემადგენელი ნაწილი.

ამიტომ ზევით მიმავალ ორთქლის ნაკადს თან მიაქვს ყველა სიმაღლიდან დაბალ ტემპერატურაზე მდუღარე მდგენელი, ხოლო ქვევით მდინარი სითხის ნაკადი განუწყვეტლივ მდიდრდება მაღალი დუღილის ტემპერატურის მქონე ნაწილით. ყოველ სიმაღლეზე მყარდება ნარევის სხვადასხვა შემადგენლობა: რაც მეტია სიმაღლე, მით მეტია დაბალ ტემპერატურაზე მდუღარე მდგენელის პროცენტიც. იდეალურ შემთხვევაში მაღლა იქნება სუფთა დაბალი დუღილის ტემპერატურის მქონე მდგენელის ფენა, ხოლო ძირს — მაღალი დუღილის ტემპერატურის მქონე სუფთა სითხის ფენა.



ნახ. 107.

ახლა საჭიროა, მხოლოდ შეძლებისდაგვარად ნელა, რომ არ დავარღვიოთ დახატული იდეალური სურათი, გამოვაცალკევოთ ნივთიერებები, დაბალი დუღილის ტემპერატურის მქონე — ზევიდან, ხოლო მაღალი დუღილის ტემპერატურის მქონე — ქვევიდან.

პრაქტიკულად განცალკევებისა, ანუ რექტიფიკაციისათვის, ორთქლისა და სითხის შემხვედრ ნაკადებს კარგად არევის საშუალება უნდა მივცეთ. ამ მიზნით სითხისა და ორთქლის ნაკადებს აყოვნებენ ერთმანეთის ზემოთ განლაგებული და სითხის ჩამოსაშვები მილებით შეერთებული თეფშების საშუალებით. სავსე თეფშიდან სითხეს შეუძლია ქვედა საფეხურებზე ჩასვლა. სწრაფ ნაკადად ზემოთ მიმართული ორთქლი (0,3—1 მ/წმ) არღვევს სითხის თხელ ფენას. სვეტის სქემა ნაჩვენებია ნახ. 126-ზე).

სითხის მთლიანად გასუფთავება ყოველთვის არ ხერხდება. ზოგიერთ ნარევს „არასასიამოვნო“ თვისება აქვს: გარკვეული შემადგენლობისას ორთქლადქცეული მოლეკულების კომპონენტების თანაფარდობა ისეთივეა, როგორც კომპონენტების თანაფარდობა თხევად ნარევში. ასეთ შემთხვევაში, რასაკვირველია, შემდგომი გასუფთავება აღწერილი ხერხით

შეუძლებელია. ასეთი ნარევი, რომელიც 96% სპირტსა და 4% წყალს შეიცავს: იგი ამგვარივე შემადგენლობის ორთქლს იძლევა. ამიტომ 96%-იანი სპირტი საუკეთესოა აორთქლების მეთოდით მიღებულ სპირტებს შორის.

სითხეების რექტიფიკაცია (ანუ დისტილაცია) ქიმიური ტექნოლოგიის უმნიშვნელოვანეს პროცესს წარმოადგენს. რექტიფიკაციის საშუალებით ღებულობენ, მაგალითად, ნავთობიდან ბენზინს.

საინტერესოა, რომ რექტიფიკაცია არის ჟანგბადის მიღების ყველაზე უფრო იაფი ხერხი. ამისათვის, რასაკვირველია, საჭიროა წინასწარ გადავიყვანოთ ჰაერი თხევად მდგომარეობაში, რის შემდეგაც რექტიფიკაციის საშუალებით შეიძლება გამოვაცალკევოთ თითქმის სუფთა აზოტი და ჟანგბადი.

მყარი სხეულების გასუფთავება

ბოთლზე, რომელშიც ქიმიური ნივთიერებაა, როგორც წესი, ქიმიური სახელწოდების გვერდით შეიძლება ასეთი ასოები ამოვიკითხოთ: „ს“. „ს. ა.“ ან „სპ. ს.“. ამ ასოებით პირობით აღნიშნულია ნივთიერების სისუფთავის ხარისხი: „ს.“ აღნიშნავს სისუფთავის საკმაოდ დაბალ ხარისხს — ნივთიერებაში შეიძლება იყოს 1% რიგის მინარევი; „ს. ა.“ — ნივთიერება „სუფთაა ანალიზისათვის“ — შეიცავს მინარევს არა უმეტეს პროცენტის რამდენიმე მეათედისა; „სპ. ს.“ — სპექტრალურად სუფთა ნივთიერება — ძნელად მისაღებია. სპექტრალური ანალიზი მინარევის მეათასედ ნაწილებს აჩვენებს. წარწერა „სპ. ს.“ უფლებას გვაძლევს იმედი ვიქონიოთ, რომ ნივთიერება თავისი სისუფთავის მხრივ, სულ ცოტა, „ოთხი ცხრიანით“ ხასიათდება, ე. ი. ძირითადი ნივთიერების შემცველობა არ არის 99, 99%-ზე ნაკლები.

მოთხოვნილება სუფთა მყარ ნივთიერებებზე მეტად დიდია. მრავალი ფიზიკური თვისებისათვის მავნებელია მინარევის პროცენტის მეთასედი ნაწილი, ხოლო ერთ სპეციალურ ამოცანაში, რომელიც თანამედროვე ტექნიკას ძალიან აინტერესებს, სახელდობრ, ნახევარგამტარი მასალის მისაღებად,

ტექნიკოსები მოითხოვენ შვიდი ცხრიანის შესაბამის სისუფთავეს. ეს იმას ნიშნავს, რომ საინჟინრო ამოცანის გადაწყვეტას ხელს უშლის ერთი ზედმეტი ატომი ათ მილიონ საჭირო ატომზე! ასეთი ზესუფთა მასალის მისაღებად სპეციალურ მეთოდებს მიმართავენ.

ზესუფთა გერმანიუმისა და კაჟბადის მისაღებად (სწორედ ესენი არიან ნახევრადგამტართა მთავარი წარმომადგენლები) მდნარიდან ნელა უნდა ამოვწიოთ მზარდი კრისტალი. გამდნარი კაჟბადის (ან გერმანიუმის) ზედაპირთან მიაქვთ ღერო, რომლის ბოლოზე დამაგრებულია პატარა კრისტალი. შემდეგ ღეროს ნელ-ნელა წევენ ზევით. მდნარიდან ამოდის კრისტალი. მას ძირითადი ნივთიერების ატომები ქმნიან, მინარევის ატომები მდნარში რჩება.

უფრო ფართოდ გავრცელდა ეგრეთ წოდებული ზონური დნობის მეთოდი. გასაწმენდი ელემენტისაგან მზადდება ნებისმიერი სიგრძის ღერო, რომლის დიამეტრი რამდენიმე მილიმეტრია. ღეროს გასწვრივ გადაადგილდება მისი გარემომცველი პატარა ცილინდრული ღუმელი. ღუმელის ტემპერატურა საკმარისია დნობისათვის და ღუმელს შიგნით მოთავსებული ლითონის უბანი დნება. ამრიგად, ღეროს გასწვრივ გადაადგილდება გამდნარი ლითონის პატარა ზონა.

მინარევის ატომები ჩვეულებრივ სითხეში უფრო უკეთ იხსნებიან, ვიდრე მყარ სხეულში. ამიტომაც გამდნარი ზონის საზღვარზე მინარევის ატომები მყარი უბნებიდან გადადიან გამდნარ ზონაში და არა პირიქით. გამდნარ ზონას გადაადგილებისას თან მიაქვს მინარევის ატომები. უკუსვლის დროს ღუმელი გამორთულია და ლითონის ღეროს გასწვრივ გამდნარი ზონის გადაადგილების ოპერაცია მრავალჯერ მეორდება. ციკლების საკმარისი რიცხვის შემდეგ ღეროს გაჭუჭყიანებული ბოლო უნდა მოიხერხოს. ზესუფთა მასალას ღებულობენ ვაკუუმში ან ინერტული გაზის ატმოსფეროში.

თუ მინარევი ატომების წილი დიდია, მაშინ გასუფთავების სხვა მეთოდებს მიმართავენ. ზონურ დნობას და მდნარიდან კრისტალის ამოწევას მხოლოდ ნივთიერების საბოლოო გასუფთავებისათვის იყენებენ.

ადსორბცია

გაზები იშვიათად იხსნება მყარ სხეულებში, ე. ი. იშვიათად შედის კრისტალების შიგნით. სამაგიეროდ არსებობს მყარი სხეულების მიერ გაზების შთანთქმის სხვა საშუალება. გაზის მოლეკულები თავს იყრიან მყარი სხეულის ზედაპირზე — ამ თავისებურ მიწებებას ადსორბცია[1] ეწოდება. ამრიგად, ადსორბცია მაშინ მიმდინარეობს, როდესაც მოლეკულას არ ძალუძს სხეულის შიგნით შესვლა, ხაგრამ სამაგიეროდ წარმატებით ეჭიდება მის ზედაპირს.

ადსორბირება ზედაპირის მიერ გაზის შთანთქმას ნიშნავს. მაგრამ განა შეუძლია ასეთ მოვლენას რამდენადმე მნიშვნელოვანი როლის შესრულება? ყველაზე დიდ სხეულზე დატანილი ერთი მოლეკულის სისქის ფენა გრამის უმნიშვნელო ნაწილს იწონის.

ვიანგარიშოთ. პატარა მოლეკულის ფართი დაახლოებით 10 კვ ანგსტრემი იქნება, ე. ი. 10^{-15} სმ^2, მაშასადამე, 1 სმ^2 ფართზე დაეტევა 10^{15} მოლეკულა. ვთქვათ, წყლის მოლეკულების ასეთი რაოდენობა ცოტას, $3 \cdot 10^{-8}$ გ იწონის. კვადრატულ მეტრზედაც კი მხოლოდ 0,0003 გ წყალი მოთავსდება.

ნივთიერების შესამჩნევი რაოდენობა წარმოიშობა ასეული კვადრატული მეტრის მქონე ზედაპირზე. 100 მ^2-ზე უკვე 0,03 გ წყალი მოდის (10^{21} მოლეკულა).

განა ლაბორატორიულ პრაქტიკაში შეიძლება ამოდენა ზედაპირთან გვქონდეს საქმე? თუმცა რა ძნელი მოსაფიქრებელია, რომ ხანდახან ისეთ პაწაწინა სხეულებსაც კი, ჩაის კოვზის წვერზე რომ ეტევიან, უზარმაზარი, რამდენიმე ასეული მეტრის ტოლი ზედაპირი აქვთ.

კუბს, რომლის გვერდია 1 სმ, 6 სმ^2 ზედაპირის ფართი აქვს. გავჭრათ ეს კუბი 8 ტოლ კუბად, რომელთა გვერდები 0,5 სმ იქნება. პატარა კუბების წახნაგების ფართი იქნება 0,25 სმ^2. ასეთი წახნაგების რიცხვი სულ $6 \times 8 = 48$. მათი საერთო ფართი 12 სმ^2 ტოლია. ზედაპირი გაორკეცდა.

ამრიგად, სხეულის ყოველგვარი დაქუცმაცება ზრდის მის ზედაპირს. ახლა დავაქუცმაცოთ კუბი, რომლის გვერდი 1 სმ

---

[1] არ უნდა ავრიოთ ადსორბცია აბსორბციასთან. რაც უბრალოდ შთანთქმას ნიშნავს.

ტოლია, 1 მიკრონის ზომის ნაწილაკებად. 1 მიკრონი$=10^{-4}$ სმ, მაშასადამე, დიდი კუბი 10^{12} ნაწილაკად დაქუცმაცდება. თვითეულ ნაწილაკს (სიმარტივისათვის დავუშვათ, რომ ისიც კუბურია) აქვს 6 კვ. მიკრონი ფართი, ე. ი. $6 \cdot 10^{-8}$ სმ^2. ნაწილაკთა საერთო ფართი უდრის $6 \cdot 10^4$ სმ^2, ე. ი. 6 კვადრატულ მეტრს. მიკრონამდე დაქუცმაცება კი სულაც არ არის ზღვრული.

სავსებით გასაგებია, რომ ხვედრითი ზედაპირი (ე. ი. ერთი გრამი ნივთიერების ზედაპირი) უზარმაზარი რიცხვებით შეიძლება გამოისახოს. იგი სწრაფად იზრდება ნივთიერების დაქუცმაცების მიხედვით — მარცვლის ზედაპირი ხომ ზომის კვადრატის პროპორციულად მცირდება, ხოლო მარცვლების რიცხვი მოცულობის ერთეულში ზომის კუბის პროპორციულად იზრდება. ჭიქის ფსკერზე დასხმული წყლის ზედაპირის ფართი რამდენიმე სანტიმეტრია. იგივე წყლის ზედაპირი წვიმის წვეთების სახით რამდენიმე ათეული კვადრატული სანტიმეტრით გაიზრდება. ხოლო ერთ გრამ ნისლის წვეთებს რამდენიმე ასეული კვადრატული მეტრის ტოლი ზედაპირი ექნება.

ნახშირი რომ დავაქუცმაცოთ (სჯობს, რაც შეიძლება უფრო წმინდად), მაშინ იგი შეძლებს ამიაკის, ნახშირორჟანგისა და მრავალი მწამლავი გაზის ადსორბირებას. ამ უკანასკნელი თვისების გამო ნახშირს აირწინაღში იყენებენ. ნახშირი განსაკუთრებით კარგად ქუცმაცდება და მისი ნაწილაკების ხაზოვანი ზომები შეიძლება ათ ანგსტრემამდე დავიყვანოთ. ამიტომ ერთ გრამ სპეციალურ ნახშირს რამდენიმე ასეული კვადრატული მეტრი ზედაპირის ფართი ექნება და ნახშირიანი აირწინაღი რამდენიმე ათეულ ლიტრ გაზს შთანთქავს.

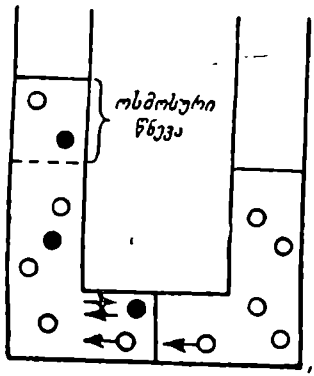
ადსორბციას ფართოდ იყენებენ ქიმიურ მრეწველობაში. სხვადასხვა გაზის მოლეკულები ზედაპირზე ადსორბირების შედეგად მჭიდროდ ეხებიან ერთმანეთს და უფრო ადვილად მონაწილეობენ ქიმიურ რეაქციებში. ქიმიური პროცესების ასაჩქარებლად ხშირად იყენებენ როგორც ნახშირს, ასევე წვრილად დაქუცმაცებულ ლითონებს — ნიკელს, სპილენძს და სხვებს.

ქიმიური რეაქციების დამაჩქარებელ ნივთიერებებს კატალიზატორები ეწოდება.

ოსმოსი

ცხოველთა ქსოვილებს შორის არის თავისებური აპკები, რომლებიც წყლის მოლეკულებს ატარებენ და ამავე დროს გაუვალი არიან წყალში გახსნილი ნივთიერებების მოლეკულებისათვის.

ამ აპკების თვისებები წარმოადგენს ფიზიკური მოვლენების მიზეზს, რომლებსაც ოსმოსური მოვლენები (ან, უბრალოდ, ოსმოსი) ეწოდება. წარმოიდგინეთ, რომ ასეთი ნახევრადშეღწევადი ტიხარი ორ ნაწილად ყოფს მილს, რომელსაც გადმობრუნებული Π ასოს ფორმა აქვს. მილის ერთ მუხლში ჩასხმულია ხსნარი, ხოლო მეორეში — წყალი ან სხვა გამხსნელი. ორივე მუხლში სითხის ერთნაირი რაოდენობა რომ ჩავასხათ, გაკვირვებით შევნიშნავთ, რომ დონეთა ტოლობისას წონასწორობა არ იქნება დაცული. მოკლე დროის შემდეგ სითხეები სხვადასხვა დონეებზე გაჩერდება. ამასთან, დონე მაღლა აიწევს იმ მუხლში, რომელშიაც ხსნარია მოთავსებული. ნახევრადშეღწევადი ტიხრით ხსნარისაგან გამოყოფილი წყალი ისწრაფვის გააზავოს ხსნარი. სწორედ ამ მოვლენას ეწოდება ოსმოსი, ბოლო სიმაღლეთა სხვაობას — ოსმოსური წნევა.



ნახ. 108.

რა იწვევს ოსმოსურ წნევას?

ჭურჭლის მარჯვენა მუხლში (ნახ. 108) წნევას მხოლოდ და მხოლოდ წყალი ახორციელებს. მარცხენა მუხლში სრული წნევა იქმნება წყლის წნევისა და გახსნილი ნივთიერების წნევისაგან. მაგრამ ტიხრში გასვლა შეუძლია მხოლოდ წყალს და ნახევრად შეღწევადი ტიხრის არსებობისას წონასწორობა მაშინ კი არ ხორციელდება, როდესაც მარცხენა მუხლში წნევა სრული წნევის ტოლია, არამედ მაშინ, როდესაც სუფთა წყლის წნევა ხსნარის წნევის

„წყლისეული" ნაწილის ტოლია. სრულ წნევათა წარმოშობილი სხვაობა გახსნილი ნივთიერების წნევას უდრის.

წნევის ეს ნაჭარბია სწორედ ოსმოსური წნევა. როგორც ცდებიდან და გამოთვლიდან ჩანს, ოსმოსური წნევა ტოლია იმ გაზის წნევისა, რომელიც გახსნილი ნივთიერებისაგან შედგება, თუ მას იგივე მოცულობა უკავია. ამიტომ გასაკვირი არ არის, რომ ოსმოსური წნევა საკმაოდ დიდი რიცხვებით იზომება.

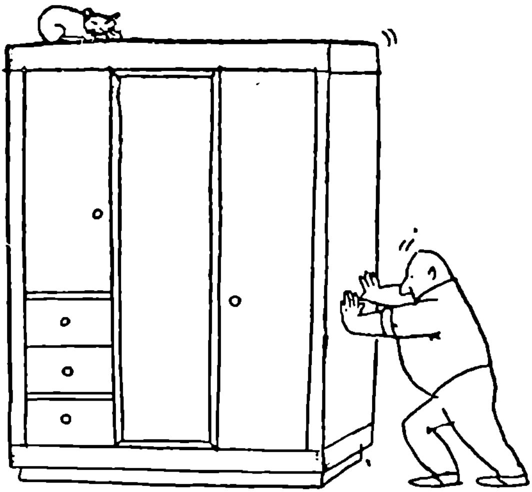
გამოვითვალოთ ოსმოსური წნევა, რომელიც 1 ლ წყალში წარმოიშობა. თუ შიგ 20 გ შაქარია გახსნილი (შაქრის კონცენტრაცია ერთ ჭიქა ჩაიში, ალბათ, მეტია). მოლეკულური წონა შაქრისა, რომლის ფორმულაც არის $C_{12}H_{22}O_{11}$, 342 ტოლია. ამოცანის პირობის თანახმად ერთ ლიტრში არის შაქრის მოლის 20/342 ნაწილი. ამრიგად, შაქრის ერთ მოლზე მოდის $\frac{342}{20}=17{,}1$ ლ მოცულობა. მაგრამ „ნორმალურ" პირობებში 0°C და 1 ატმ წნევისას ერთი მოლი გაზი იკავებს 22,4 ლ მოცულობას. იდეალური გაზის კანონების შესაბამისად გაზის სახით განხილული შაქრის წნევა 0°C-ზე $\frac{22{,}4}{17{,}1}$ ატმ ტოლი უნდა იყოს, ხოლო 20°C-ზე $\frac{22{,}4}{17{,}1}\cdot\frac{293}{273}=1{,}4$ ატმ. სწორედ ეს არის შაქრის ოსმოსური წნევა. ნახევრადშეღწევადი აპკით ცდის ჩატარებისას ეს ოსმოსური წნევა გააწონასწორებდა 14 მ სიმაღლის წყლის სვეტს.

ახლა განვიხილოთ, როგორ არის დაკავშირებული ოსმოსურ წნევასთან ზოგიერთი მარილის ხსნარის გამხსნელი მოქმედება. კუჭ-ნაწლავის კედლები ზოგი ხსნარისთვის ნახევრად შეღწევადია. თუ მარილი არ გადის კუჭ-ნაწლავის კედლებში (ასეთია გლაუბერის მარილი), მაშინ კუჭ-ნაწლავში წარმოიშობა ოსმოსური წნევა, რომელიც ქსოვილების საშუალებით ამოსწოვს წყალს ორგანიზმიდან კუჭ-ნაწლავში.

რატომ არ კლავს წყურვილს ძალიან მლაშე წყალი? თურმე აქაც ოსმოსური წნევაა დამნაშავე. თირკმელებს არ შე-

უძლიათ გამოჰყონ შარდი ისეთი ოსმოსური წნევით, რომელიც ორგანიზმის ქსოვილებში წნევას აღემატება. ამიტომაც ორგანიზმი, რომელიც მარილიდან ზღვის წყალს ღებულობს, არამცთუ არ გადასცემს მას ქსოვილთა სითხეებს, არამედ, პირიქით, შარდთან ერთად გამოჰყოფს ქსოვილებისათვის წარმეულ წყალს.

XIV. ხახუნი



ხახუნის ძალები

ჩვენ პირველად არ ვლაპარაკობთ ხახუნზე. მართლაც და, როგორ შეიძლებოდა მოძრაობაზე საუბრისას ხახუნი არ გვეხსენებინა? ჩვენი გარემომცველი თითქმის ყველა სხეულის მოძრაობას ხახუნი ახლავს. გამორთავს თუ არა მძღოლი მოტორს, ავტომობილი მაშინვე ჩერდება, მრავალი რხევის შემდეგ ჩერდება ქანქარაც, ნელა იძირება მზესუმზირას ზეთიან ქილაში ლითონის პატარა ბურთულა. რა აიძულებს ზედაპირზე მოძრავ სხეულებს, გაჩერდნენ, რა ანელებს ბურთულას ვარდნას ზეთში? ხახუნის ძალა, რომელიც ერთი სხეულის ზედაპირის გასწვრივ მეორის მოძრაობისას წარმოიშობა.

მაგრამ ხახუნის ძალა მარტო მოძრაობისას როდი წარმოიშობა.

ალბათ გინახავთ, როგორ გადააქვთ ავეჯი ოთახის ერთი კუთხიდან მეორეში. ალბათ ისიც იცით, რა ძნელია მძიმე კარადის ადგილიდან დაძვრა. ძალას, რომელიც ამ ძალვას ეწინააღმდეგება, უძრაობის ხახუნის ძალა ეწოდება.

ხახუნის ძალები მაშინაც წარმოიშობა, როდესაც სხეულს ვამოძრავებთ, და მაშინაც, როდესაც ვაგორებთ. ეს რამდენადმე განსხვავებული ორი ფიზიკური მოვლენაა. ამიტომაც ასხვავებენ სრიალის ხახუნს და გორვის ხახუნს. გორვის ხახუნი რამდენიმე ათეულჯერ ნაკლებია სრიალის ხახუნზე.

რასაკვირველია, ზოგიერთ შემთხვევაში სრიალიც იოლია: ციგა ადვილად სრიალებს თოვლზე, ხოლო ციგურები ყინულზე — კიდევ უფრო ადვილად.

რაზეა დამოკიდებული ხახუნის ძალა?

ხახუნის ძალა მყარ სხეულებს შორის მცირედ არის დამოკიდებული მოძრაობის სიჩქარეზე და სხეულის წონის პროპორციულია. თუ სხეულის წონა ორჯერ გაიზრდება, მაშინ მისი ადგილიდან დაძვრა და გადაადგილება ორჯერ უფრო ძნელი იქნება. ჩვენ მთლად ზუსტად არ გამოვთქვით აზრი, მნიშვნელობა აქვს არა იმდენად წონას, რამდენადაც ძალას, რომელიც ზედაპირს აწერს. თუ სხეული მსუბუქია, მაგრამ ჩვენ მას მაგრად ვაწვებით ხელით, მაშინ, რასაკვირველია, ეს გავლენას მოახდენს ხახუნის ძალაზე. თუ სხეულის ზედაპირზე დამწოლ ძალას (უმეტეს შემთხვევაში ეს წონაა) P-თი აღვნიშნავთ, მაშინ ხახუნის $F_{\text{ხახ}}$ ძალისთვის სამართლიანი იქნება ასეთი მარტივი ფორმულა:

$$F_{\text{ხახ}}=kP.$$

ზედაპირების თვისებას როგორღა ითვალისწინებენ? ხომ კარგად არის ცნობილი, რომ ერთი და იმავე თავკავებიანი ციგა სულ სხვადასხვაგვარად სრიალებს, იმის მიხედვით, გადაკრულია თავკავებზე რკინა თუ არა. ეს თვისებები პროპორციულობის k კოეფიციენტის საშუალებით არის გათვალისწინებული. მას ხახუნის კოეფიციენტი ეწოდება.

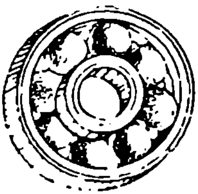
ლითონის ხეზე ხახუნის კოეფიციენტი $^1/_2$ ტოლია. გლუვ ხის მაგიდაზე დადებული 2 კგ-ძ წონის მქონე ლითონის ფილის გადაადგილება მხოლოდ 1 კგ ძალით ხერხდება. მაგრამ

აი ყინულზე ფოლადის ხახუნის კოეფიციენტი მხოლოდ 0,027 ტოლია. იგივე ფილა შეიძლება მხოლოდ 54 გ-ძ ტოლი ძალით გადავაადგილოთ.

ზედაპირის ფართი არ შედის მოყვანილ ფორმულაში: ხახუნის ძალა არ არის დამოკიდებული მოხახუნე სხეულების შეხების ზედაპირის ფართისაგან. ერთნაირი ძალაა საჭირო იმისთვის, რომ ადგილიდან დაიძრას ან მუდმივი სიჩქარით გადაადგილდეს ერთი კილოგრამი წონის მქონე ფოლადის ფართო ფურცელი და კილოგრამიანი საწონი, რომელიც ზედაპირს მცირე ფართით ეყრდნობა.

ერთი შენიშვნაც: ადგილიდან სხეულის დაძვრა რამდენადმე უფრო ძნელია, ვიდრე მისი გაცურება: ხახუნის ძალა, რომლის გადალახვაც მოძრაობის პირველ მომენტშია საჭირო (უძრაობის ხახუნი), ხახუნის ძალის შემდგომ მნიშვნელობებზე 20—30% მეტია.

რა შეიძლება ითქვას რაიმე გაგორებული სხეულის, მაგალითად, ბორბლის ხახუნის ძალაზე? ისევე, როგორც სრიალის ხახუნი, ისიც მით უფრო მეტია, რაც მეტია ზედაპირზე ბორბლის მიმჭერი ძალა. გარდა ამისა, გორვის ხახუნის ძალა ბორბლის რადიუსის უკუპროპორციულია. ეს გასაგებიცაა: რაც უფრო დიდია ბორბალი, მით ნაკლები მნიშვნელობა აქვს მისთვის იმ ზედაპირის უსწორმასწორობას, რომელზეც ის მიგორავს.



ნახ. 109.

თუ შევადარებთ ძალებს, რომელთა გადალახვაც საჭიროა სხეულის სრიალის და გორების დროს, განსხვავება ძალზე მნიშვნელოვანი გამოვა. მაგალითად, ასფალტზე რომ 1 ტ-ძ წონის მქონე ფოლადის ლუგვი ვათრიოთ, საჭიროა 200 კგ-ძ ტოლი ძალის მოდება — ეს მხოლოდ ათლეტებს ძალუძთ. ხოლო იგივე ლუგვის გორებას ურიკით ბავშვიც შეძლებს, ამისათვის საჭიროა ძალა არა უმეტეს 10 კგ-ძ.

გასაკვირი არ არის, რომ გორვის ხახუნმა „გაიმარჯვა“ სრიალის ხახუნზე. სწორედ ამიტომ კაცობრიობა უკვე დიდი ხანია გადავიდა ბორბლებიან ტრანსპორტზე.

თავკავების ბორბლებით შეცვლა ჯერ კიდევ არ არის სრიალის ხახუნზე სრული გამარჯვება: ბორბალი ხომ ღერძს უნდა ჩამოეცვას. ერთი შეხედვით შეუძლებელია საკისართან ღერძების ხახუნის თავიდან აცილება. ასე ფიქრობდნენ საუკუნეების განმავლობაში და ცდილობდნენ სხვადასხვა საცხით შეემცირებინათ სრიალის ხახუნი საკისრებში. სამსახური, რომელსაც საცხი გვიწევს, არც ისე უმნიშვნელოა — სრიალის ხახუნი 8—10-ჯერ მცირდება. მაგრამ საცხის ხმარების დროსაც სრიალის ხახუნი ბევრ შემთხვევაში იმდენად მნიშვნელოვანია, რომ მეტისმეტად ძვირი ჯდება. წარსული საუკუნის ბოლოს ეს გარემოება ძალიან აფერხებდა ტექნიკის განვითარებას. სწორედ მაშინ წარმოიშვა შესანიშნავი იდეა საკისრებში სრიალის ხახუნი გორვის ხახუნით შეეცვალათ. სრიალის ხახუნი გორვის ხახუნით შეცვალა ბურთულებიანმა საკისარმა. ღერძსა და მილისს შორის მოთავსებულია ბურთულები. ბორბლის ბრუნვისას ბურთულები მილისზე გორავენ, ხოლო ღერძი — ბურთულებზე. 109-ე ნახაზზე ნაჩვენებია ამ მექანიზმის მოწყობილობა. ხახუნის ძალები რამდენიმე ათეულჯერ შემცირდა.

შეუძლებელია თანამედროვე ტექნიკაში გორვის საკისრების როლის გადაფასება. მათ ამზადებენ ბურთულებით, ცილინდრული გორგოლაჭებით, კონუსური გორგოლაჭებით. ასეთი საკისრები აქვს ყველა მანქანას, დიდსა და მცირეს. არსებობს მილიმეტრის ზომის ბურთულებიანი საკისარი; ზოგიერთი დიდი მანქანის საკისარი კი ტონაზე მეტს იწონის. ბურთულები საკისრებისათვის (თქვენ ისინი, რასაკვირველია, გინახავთ სპეციალური მაღაზიების ვიტრინებში) სულ სხვადასხვა დიამეტრებისა მზადდება — მილიმეტრის ნაწილებიდან რამდენიმე სანტიმეტრამდე.

გლანტი ხახუნი სითხეებსა და გაზებში

აქამდე ჩვენ „მშრალ" ხახუნზე ვლაპარაკობდით, ე. ი. ისეთ ხახუნზე, რომელიც მყარი სხეულების შეხების დროს წარმოიშობა. მაგრამ ხახუნის ძალების გავლენას მცურავი და

მფრინავი სხეულებიც განიცდიან. იცვლება ხახუნის წყარო — მშრალი ხახუნის ნაცვლად გვაქვს „სველი“ ხახუნი.

წინააღმდეგობა, რომელსაც წყალში ან ჰაერში მოძრავი სხეული განიცდის, სხვა კანონზომიერებებს ემორჩილება. ეს კანონზომიერებანი არსებითად განსხვავდება მშრალი ხახუნის კანონებისგან, რომლებზეც ზემოთ გვქონდა ლაპარაკი.

სითხისა და გაზის ქცევის წესები ხახუნის თვალსაზრისით არ განსხვავდება. ამიტომ ყველაფერი ქვემოთ ნათქვამი თანაბრად ეხება როგორც სითხეებს, ასევე გაზებსაც. თუ სიმოკლისთვის „სითხეზე“ ვილაპარაკებთ, ნათქვამი სავსებით სამართლიანი იქნება გაზებისთვისაც.

„სველი“ ხახუნის ერთ-ერთი განსხვავება მშრალისაგან უძრაობის ხახუნის არარსებობაა: წყალში ან ჰაერში ჩამოკიდებული საგანი, ზოგადად რომ ვთქვათ, შეიძლება ნებისმიერად მცირე ძალით დავძრათ ადგილიდან. ხოლო რაც შეეხება ხახუნის ძალას, რომელსაც მოძრავი სხეული განიცდის, იგი დამოკიდებულია მოძრაობის სიჩქარეზე, სხეულის ფორმასა და ზომაზე და სითხის (გაზის) თვისებებზე. სითხეებსა და გაზებში სხეულების მოძრაობის შესწავლამ გვიჩვენა, რომ „სველი“ ხახუნისათვის არ არსებობს ერთიანი კანონი. არსებობს ორი სხვადასხვა კანონი: ერთი სამართლიანია მოძრაობის მცირე სიჩქარისათვის, ხოლო მეორე — დიდი სიჩქარისათვის. ორი კანონის არსებობა ნიშნავს, რომ სითხეებსა და გაზებში მყარი სხეულების დიდი და მცირე სიჩქარით მოძრაობისას გარემო სხვადასხვაგვარად შემოედინება მოძრავ სხეულებს.

მოძრაობის მცირე სიჩქარისას წინააღმდეგობის ძალა მოძრაობის სიჩქარისა და სხეულის ზომის პირდაპირპროპორციულია.

FთvL.

როგორ გავიგოთ ზომის პროპორციულობა. თუ არ არის ნათქვამი, რა ფორმის სხეულზეა ლაპარაკი? ეს იმას ნიშნავს, რომ ფორმით სავსებით მსგავსი ორი სხეულისათვის (ე. ი. ისეთებისათვის, რომელთა ყველა ზომა ერთნაირ შეფარდებაშია ერთმანეთთან), წინააღმდეგობის ძალები ისევე ეფარდება ერთმანეთს, როგორც სხეულის ხაზოვანი ზომები.

წინააღმდეგობის სიდიდე ძალიან არის დამოკიდებული სითხის თვისებებისაგან. თუ შევადარებთ ხახუნის ძალებს, რომლებსაც სხვადასხვა გარემოში ერთნაირი სიჩქარით მოძრავი ერთნაირი სხეულები განიცდიან, ვნახავთ, რომ სხეულები მით მეტ წინააღმდეგობის ძალას განიცდიან, რაც უფრო სქელია, ან, როგორც ამბობენ, რაც უფრო ბლანტია გარემო. ამიტომ ხახუნს, რომელზეც აქ ვსაუბრობთ, ბლანტი ხახუნი ვუწოდოთ. სავსებით გასაგებია, რომ ჰაერი უმნიშვნელო ბლანტ ხახუნს ქმნის, დაახლოებით 60-ჯერ ნაკლებს, ვიდრე წყალი. სითხეები გვხვდება „თხელიც", როგორიცაა წყალი, და ძალიან ბლანტიც, როგორიცაა არაყანი ან თაფლი.

სითხის სიბლანტის ხარისხზე შეიძლება ვიმსჯელოთ შიგ სხეულის ვარდნის, აწ ნაჩვრეტიდან სითხის გამოღვრის სისწრაფის მიხედვით.

ნახევარლიტრიანი ძაბრიდან წყალი რამდენიმე წამში გამოიღვრება. ძალიან ბლანტი სითხე კი ამ ძაბრიდან საათობით ან დღეობითაც კი იდენს. შეიძლება უფრო ბლანტი სითხეების მაგალითის მოყვანაც. გეოლოგებმა ყურადღება მიაქციეს ზოგიერთი ვულკანის კრატერის შინაგან ფერდობებზე ლავის გროვებში ნაპოვნ სფეროსებურ ნაჭრებს. ერთი შეხედვით სრულიად გაუგებარია, როგორ შეიძლებოდა კრატერის შიგნით ლავისაგან ასეთი სფერო წარმოშობილიყო. ეს გაუგებარია, თუ ვილაპარაკებთ ლავაზე, როგორც მყარ სხეულზე. მაგრამ თუ ლავა სითხედ იქცევა, მაშინ კრატერის ძაბრიდან იგი წვეთობით გამოვა, ისევე როგორც ნებისმიერი სხვა სითხე. თუმცაღა ერთი წვეთი წარმოიშობა არა წამის ნაწილებში, არამედ ათეული წლების განმავლობაში. როდესაც წვეთი ძალიან დამძიმდება, იგი მოსწყდება და „დაეწვეთება" ვულკანის კრატერის ძირზე.

ამ მაგალითიდან ცხადია, რომ ერთმანეთს არ უნდა გავუთანაბროთ ნამდვილი მყარი სხეულები და ამორფული სხეულები, რომლებიც, როგორც ვიცით, სითხეებს უფრო ჰგვანან, ვიდრე კრისტალებს. ლავა სწორედ ასეთი ამორფული სხეულია. იგი მყარი გვეჩვენება, მაგრამ სინამდვილეში ძალიან ბლანტი სითხეა.

როგორ ფიქრობთ, ლუქი მყარი სხეულია? აიღეთ ორი საცობი, დააწყეთ ისინი ორი ჯამის ძირზე. ერთში ჩაასხით რომელიმე გამდნარი მარილი (მაგალითად, გვარჯილა — ის ადვილი საშოვნელია), ხოლო მეორე ჯამში — ლუქი. ორივე სითხე გაიყინება და ქვეშ მოიტანს საცობს. დააწყეთ ეს ჯამები კარადაში და კარგა ხანს ხელს ნუ ახლებთ. რამდენიმე თვის შემდეგ თქვენ ნახავთ განსხვავებას ლუქსა და მარილს შორის. საცობი, რომელზეც მარილი დაასხით, ძველებურად ჭურჭლის ძირში იქნება. ხოლო ლუქდასხმული საცობი ზემოთ აღმოჩნდება. როგორ მოხდა ეს? ძალიან უბრალოდ: საცობი ისე ამოტივტივდა, როგორც წყალში, განსხვავება მხოლოდ დროშია: როცა ბლანტი ხახუნის ძალები მცირეა, საცობი მყისვე ამოტივტივდება ხოლმე, ხოლო ძალიან ბლანტ სითხეებში კი — თვეების შემდეგ.

წინააღმდეგობის ძალები დიდი სიჩქარისას

დავუბრუნდეთ „სველი" ხახუნის კანონებს. როგორც გამოვარკვიეთ, მცირე სიჩქარისას წინააღმდეგობა დამოკიდებულია სითხის სიბლანტეზე მოძრაობის სიჩქარესა და სხეულის ხაზოვან ზომებზე. ახლა განვიხილოთ ხახუნის კანონები დიდი სიჩქარისას. მაგრამ საჭიროა წინასწარ ითქვას, როგორი სიჩქარე ჩავთვალოთ მცირე სიჩქარედ და როგორი — დიდად. ჩვენ გვაინტერესებს არა სიჩქარის აბსოლუტური სიდიდე, არამედ ის, არის თუ არა სიჩქარე საკმარისად მცირე, იმისთვის, რომ ზემოთ განხილული ბლანტი ხახუნის კანონი შესრულდეს.

თურმე შეუძლებელია დავასახელოთ მეტრების ისეთი რიცხვი წამში, რომ მცირე სიჩქარისას ყველა შემთხვევაში გამოგვადგეს ბლანტი ხახუნის კანონები. ჩვენს მიერ შესწავლილი კანონის გამოყენების ფარგლები დამოკიდებულია სხეულის ზომისა და სითხის სიბლანტისა და სიმკვრივისაგან.

ჰაერისთვის „მცირეა"

$$\frac{0{,}75}{L\,(\text{სმ})}\ \frac{\text{სმ}}{\text{წმ}}$$

ნაკლები სიჩქარე.
წყლისათვის —

$$\frac{0{,}05}{L(\text{სმ})}\ \frac{\text{სმ}}{\text{წმ}}$$

ნაკლები, ხოლო თაფლის მსგავსი ბლანტი სითხეებისათვის

$$\frac{100}{L\ (\text{სმ})}\ \frac{\text{სმ}}{\text{წმ}}$$

ნაკლები.

ამრიგად, ჰაერისა და განსაკუთრებით წყლის მიმართ ბლანტი ხახუნის კანონებს ნაკლებად იყენებენ: 1 სმ/წმ რიგის მცირე სიჩქარეების დროსაც კი ისინი პაწაწინა მილიმეტრის ზომის სხეულებისათვის გამოდგება. წინააღმდეგობა, რასაც წყალში მყვინთავი ადამიანი განიცდის, სრულიად არ ემორჩილება ბლანტი ხახუნის კანონს.

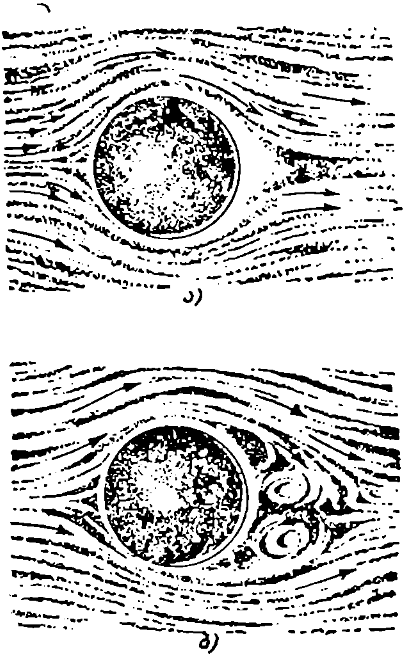
რით უნდა აიხსნას, რომ სიჩქარის შეცვლისას იცვლება გარემოს წინააღმდეგობის კანონი? მიზეზი უნდა ვეძებოთ სითხეში მოძრავი სხეულის გარსდენის ხასიათის შეცვლაში. ნახ. 110-ზე გამოსახულია სითხეში მოძრავი ორი მრგვალი ცილინდრი (ცილინდრის ღერძი ნახაზის პერპენდიკულარულია). ნელი მოძრაობისას სითხე მდორედ გარსედინება მოძრავ სხეულს — წინააღმდეგობის ძალა, რომლის გადალახვაც მას უხდება, ბლანტი ხახუნის ძალას წარმოადგენს (ნახ. 110, ა). დიდი სიჩქარისას მოძრავი სხეულის უკან წარმოიშობა სითხის რთული, არეული მოძრაობა (ნახ. 110, ბ). სითხეში ხან ჩნდება, ხან ისევ ქრება სხვადასხვა ჰავლები, ისინი ქმნიან უცნაურ ფიგურებს, რგოლებს, გრიგალებს. ჰავლების სურათი განუწყვეტლივ იცვლება. ამ მოძრაობის წარმოქმნა, რომელსაც ტურბულენტური ეწოდება, საფუძვლიანად ცვლის წინააღმდეგობის კანონს.

ტურბულენტური წინააღმდეგობა სულ სხვაგვარად არის დამოკიდებული სხეულის სიჩქარესა და ზომებზე, ვიდრე ბლანტი წინააღმდეგობა: იგი პროპორციულია სიჩქარისა და ხაზოვანი ზომების კვადრატებისა. სითხის სიბლანტე ამ მოძრაობის დროს აღარ ასრულებს არსებით როლს; განმსაზღვრელ

თვისებად მისი სიმკვრივე გვევლინება, ამასთან, წინააღმდეგობის ძალა სითხის (გაზის) სიმკვრივის პირველი ხარისხის პროპორციულია. ამრიგად, ტურბულენტური წინააღმდეგობის F ძალისთვის სამართლიანია ფორმულა

$$F \backsim \rho v^2 L^2,$$

სადაც v მოძრაობის სიჩქარეა, L—საგნის ხაზოვანი ზომები, ხოლო ρ — გარემოს სიმკვრივე. პროპორციულობის რიცხვით კოეფიციენტს, რომელიც ჩვენ არ დავწერეთ, სხეულის ფორმის მიხედვით სხვადასხვა მნიშვნელობები აქვს.



ნახ. 110.

გარსდენადი ფორმა

ჰაერში მოძრაობა, როგორც ზემოთ ვთქვით, თითქმის ყოველთვის „სწრაფია", ე. ი. ძირითად როლს ასრულებს ტურბულენტური და არა ბლანტი წინააღმდეგობა. ტურბულენტურ წინააღმდეგობას განიცდიან თვითმფრინავები, ფრინველები, პარაშუტისტები. თუ ადამიანი ჰაერში უპარაშუტოდ ვარდება, მაშინ გარკვეული დროის შემდეგ იგი იწყებს თანაბრად ვარდნას (წინააღმდეგობის ძალა აწონასწორებს წონას), მაგრამ საკმაოდ მნიშვნელოვანი, 50 მ/წმ სიჩქარით. პარაშუტის გახსნა ვარდნის მკვეთრ შენელებას იწვევს. იგივე წონა ახლა პარაშუტის თაღის წინააღმდეგობით წონასწორდება. იმის გამო, რომ წინააღმდეგობის ძალა მოძრაობის

სიჩქარისა და ვარდნილი სხეულის ზომის ტოლი ხარისხის პროპორციულია, სიჩქარე იმდენჯერ მცირდება, რამდენჯერაც ვარდნილი სხეულის ხაზოვანი ზომები იცვლება. პარაშუტის დიამეტრი დაახლოებით 7 მეტრია, ადამიანის „დიამეტრი" დაახლოებით ერთი მეტრი. ვარდნის სიჩქარე 7 მ/წმ-მდე დაეცემა. ასეთი სიჩქარით უვნებლად შეიძლება დედამიწაზე დაშვება.

უნდა ითქვას, რომ წინააღმდეგობის გადიდების ამოცანა გაცილებით უფრო ადვილი გადასაწყვეტია, ვიდრე შებრუნებული ამოცანა. ავტომობილისა და თვითმფრინავისათვის ჰაერის წინააღმდეგობის ან წყალქვეშა ნავისათვის წყლის წინააღმდეგობის შემცირება უმნიშვნელოვანესი და ძნელი ტექნიკური ამოცანაა.

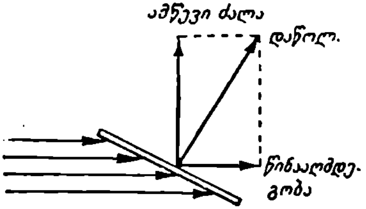
ირკვევა, რომ სხეულის ფორმის შეცვლით ტურბულენტური წინააღმდეგობა მრავალჯერ შეიძლება შემცირდეს. ამისათვის მინიმუმამდე უნდა დავიყვანოთ ტურბულენტური მოძრაობა, რომელიც წინააღმდეგობის წყაროს წარმოადგენს. ამას მივაღწევთ, თუ სხეულს სპეციალურ, როგორც ამბობენ, გარსდენად ფორმას მივცემთ.

როგორი ფორმაა ამ თვალსაზრისით საუკეთესო? თითქოს სხეულს ისეთი ფორმა უნდა მივცეთ, რომ წინ წვეტი მოძრაობდეს. ამ წვეტმა, როგორც შეიძლება გვეჩვენოს, უდიდესი წარმატებით უნდა „გააპოს" ჰაერი. მაგრამ ირკვევა, რომ მნიშვნელოვანია არა ჰაერის გაპობა, არამედ მისი რაც შეიძლება ნაკლებად შერხევა, რომ იგი ძალიან მდორედ გარსედინებოდეს სხეულს. სითხეში ან გაზში მოძრავი სხეულისათვის საუკეთესო პროფილს წარმოადგენს წინიდან ბლაგვი და უკან[1] წაწვეტებული ფორმა. ამ შემთხვევაში სითხე მდორედ ჩაედინება წვეროზე და ტურბულენტური მოძრაობა მინიმუმამდე დაიყვანება. არავითარ შემთხვევაში არ შეიძლება მახვილი კუთხეების წინ მიმართვა, რადგანაც წვეტები ტურბულენტურ მოძრაობას წარმოქმნიან.

---

[1] მახვილი კუთხეები ნავებს და გემებს ტალღების „გასაკვეთად", ე. ი. მხოლოდ მაშინ ესაჭიროებათ, როცა მოძრაობა ზედაპირზე წარმოებს.

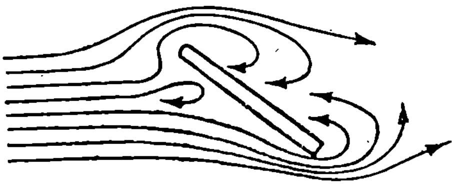
თვითმფრინავის ფრთის გარსდენადი ფორმა ქმნის არა მარტო მოძრაობისათვის უმცირეს წინააღმდგობას, არამედ



ნახ. 111.

უდიდეს ამწევ ძალასაც, როდესაც გარსდენადი ზედაპირი მოძრაობის მიმართულებისადმი ზევით არის ახრილი. ფრთის გარსდენისას ჰაერი მას ძირითადად მისივე სიბრტყისადმი მართობი მიმართულებით აწვება (ნახ. 111). გასაგებია, რომ დახრილი ფრთისათვის ეს ძალა ზევით არის მიმართული.

კუთხის ზრდასთან ერთად იზრდება ამწევი ძალაც. მაგრამ მხოლოდ გეომეტრიულ მოსაზრებებზე დამყარებულმა მსჯელობამ შეიძლება არასწორ დასკვნამდე მიგვიყვანოს და გვაფიქრებინოს, რომ რაც მეტია კუთხე მოძრაობის მიმართულე-



ნახ. 112.

ბისადმი, მით უკეთესია. სინამდვილეში კუთხის ზრდის მიხედვით სიბრტყის მდორე გარსდენა სულ უფრო ძნელდება, ხოლო კუთხის გარკვეული მნიშვნელობისათვის, როგორც ეს ნახ. 112-დან ჩანს, წარმოიქმნება ძლიერი ტურბულენტობა; წინააღმდეგობა მკვეთრად იზრდება და ამწევი ძალა ეცემა.

სიბლანტის გაქრობა

ძალიან ხშირად რაიმე მოვლენის ახსნისას ან ამა თუ იმ სხეულის ქცევის აღწერისას, ჩვენ ნაცნობ მაგალითებს ვიშველიებთ. სავსებით გასაგებია, ვამბობთ ჩვენ, რომ ეს სხე-

ული ასე მოძრაობს, სხვა სხეულებიც ხომ ამავე კანონების მიხედვით მოძრაობენ. მეტწილად გვაკმაყოფილებს ისეთი ახსნა, როდესაც ახალი მოვლენა ჩვენთვის უკვე ცნობილ მოვლენაზე დაიყვანება. ამიტომ ადვილად ავუხსენით მკითხველს ის კანონები, რომელთა მიხედვითაც სითხეები მოძრაობს, ყველას უნახავს, როგორ მიედინება წყალი, და ამ მოძრაობის კანონები სავსებით ბუნებრივი გვეჩვენება.

მაგრამ არის ერთი სრულიად საოცარი სითხე, რომელიც არც ერთ სხვა სითხეს არა ჰგავს და განსაკუთრებული, მხოლოდ მისთვის დამახასიათებელი კანონების მიხედვით მოძრაობს. ეს თხევადი ჰელიუმია.

ჩვენ უკვე ვთქვით, რომ თხევადი ჰელიუმი სითხედ რჩება აბსოლუტურ ნულამდე. მაგრამ ჰელიუმი 2°K ზევით (უფრო ზუსტად, 2,19°K) და ამ ტემპერატურის ქვემოთ სულ სხვადასხვა სითხეებია. ორი გრადუსის ზევით ჰელიუმის თვისებები არაფრით არ განასხვავებს მას სხვა სითხეებისაგან. ამ ტემპერატურაზე ქვევით ჰელიუმი საოცარ სითხედ იქცევა. საოცარ ჰელიუმს ჰელიუმ II ეწოდება.

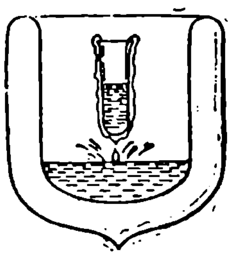
ჰელიუმ II-ის ყველაზე უფრო საოცარი თვისებაა ზედენადობა, ანუ სიბლანტის სრული უქონლობა, რაც 1938 წ. აღმოაჩინა პ. კაპიცამ.

ზედენადობაზე დაკვირვებისათვის ისეთ ჰურჭელს ამზადებენ, რომლის ფსკერზე ძალიან პატარა — ნახევარი მიკრონის სიგანის ნაჩვრეტია გაკეთებული. ჩვეულებრივი სითხე ასეთ ნაჩვრეტში თითქმის არ გადის; ასევე იქცევა ჰელიუმი 2,19°K-ზე მაღალ ტემპერატურაზე. მაგრამ როგორც კი ტემპერატურა 2,19°K-ზე ქვევით დაეცემა, ჰელიუმის გამოდენის სიჩქარე ნახტომისებურად იზრდება სულ ცოტა რამდენიმე ათასჯერ. უწვრილეს ნაჩვრეტში ჰელიუმ II თითქმის მყისიერად მოედინება, ე. ი. სავსებით კარგავს სიბლანტეს. ჰელიუმის ზედენადობა კიდევ უფრო უცნაურ მოვლენას იწვევს. ჰელიუმ II-ს შეუძლია თავისთავად „ამოძვრეს“ ჰიქიდან ან სინჯარიდან.

113-ე ნახაზზე ნაჩვენებია ამ ცდის ჩატარების სქემა. სინჯარას, რომელშიაც ჰელიუმ II-ა, ათავსებენ დიუარში ჰელიუმის აბაზანის ზემოთ. „ყოველგვარი მიზეზის გარეშე“

ჰელიუმი ადის სინჯარის კედელზე უთხელესი, სრულიად შეუმჩნეველი აპკის სახით, გადმოდის ნაპირებზე და სინჯარის ძირიდან წვეთები ცვივა.

უნდა მოვიგონოთ, რომ კაპილარული ძალების წყალობით, რაზედაც 193 გვერდზე გვქონდა საუბარი, ყოველი სითხის მოლეკულები ჭურჭლის კედელს ზევით მიჰყვებიან და ზედ ძალიან თხელ აპკს ქმნიან, რომლის სიგანე სანტიმეტრის მემილიონედი ნაწილის ტოლია. თვალისათვის ეს აპკი შეუმჩნეველია და, საერთოდ, ჩვეულებრივი ბლანტი სითხის შემთხვევაში თავს არაფრით არ ამჟღავნებს.



ნახ. 113.

სრულიად იცვლება სურათი, როცა საქმე გვაქვს სიბლანტეს სავსებით მოკლებულ ჰელიუმთან. ვიწრო ღრეჩო არ უშლის ხელს ზედენადი ჰელიუმის მოძრაობას, ხოლო თხელი ზედაპირული აპკი იგივეა, რაც ვიწრო ღრეჩო. სიბლანტეს მოკლებული სითხე უთხელესი ფენის სახით მიედინება. ჭიქის ან სინჯარის კედელზე ზედაპირული აპკი ქმნის სიფონს, რომლითაც ჰელიუმი ჭურჭლის კიდეზე გადადის.

ცხადია, ჩვეულებრივი სითხის შემთხვევაში ჩვენ ვერაფერს ამის მსგავსს ვერ ვამჩნევთ. ნორმალური სიბლანტის შემთხვევაში უმნიშვნელო სისქის სიფონში „გაძვრომა" სითხეს პრაქტიკულად არ შეუძლია. ასეთი მოძრაობა იმდენად ნელია, რომ გადადენა მილიონ წლებს გაგრძელდებოდა.

ამრიგად, ჰელიუმ II მოკლებულია ყოველგვარ სიბლანტეს. აქედან თითქოს რკინისებური ლოგიკით გამომდინარეობს შემდეგი, რომ მყარი სხეული ასეთ სითხეში ხახუნის გარეშე უნდა მოძრაობდეს. მოვათავსოთ თხევად ჰელიუმში ძაფზე ჩამოკიდებული დისკო და დავგრიხოთ ძაფი. თუ ამ მარტივ ხელსაწყოს თავისუფლებას მივანიჭებთ, მივიღებთ ქანქარას მსგავს მოწყობილობას — ძაფი და დისკო რხევას დაიწყებს და პერიოდულად დაიგრიხება ხან ერთ, ხან მეორე მხარეს. თუ ხახუნი არ არის, მოსალოდნელია, რომ დისკო დაუსრულებლად განაგრძობს რხევას, მაგრამ არაფერი ამის

მსგავსი არ ხდება. შედარებით მცირე, დაახლოებით იმავე ხანში, როგორც ჩვეულებრივი ნორმალური ჰელიუმ I-სთვის (ე. ი. ჰელიუმისათვის, რომლის ტემპერატურა 2,19°K მეტია), დისკო გაჩერდება. ეს უცნაურობაა? ნაჩვრეტიდან გამოდინებისას ჰელიუმი ისე იქცევა, როგორც სითხე, რომელსაც სიბლანტე არა აქვს, ხოლო შიგ მოძრავი სხეულების მიმართ — როგორც ჩვეულებრივი ბლანტი სითხე. ეს კი მართლაც სრულიად უჩვეულო და გაუგებარია.

ახლა ისღა დაგვრჩენია, მოვიგონოთ რა იყო ნათქვამი თვით იმ ფაქტის შესახებ, რომ ჰელიუმი არ მყარდება აბსოლუტურ ნულამდე. აქ ხომ საქმე ეხება მოძრაობაზე ჩვენთვის ჩვეული წარმოდგენების უვარგისობას. რაკი ჰელიუმი „უკანონოდ" დარჩა თხევადი, მაშ რაღა გასაკვირია ამ სითხის უკანონო საქციელი.

თხევადი ჰელიუმის ქცევა შეიძლება მხოლოდ მოძრაობაზე ახალი წარმოდგენების თვალსაზრისით გავიგოთ. ამ წარმოდგენებმა კვანტური მექანიკის სახელწოდება მიიღეს.

შევეცდებით ზოგადად გადმოგცეთ როგორ ხსნის კვანტური მექანიკა თხევადი ჰელიუმის ქცევას.

კვანტური მექანიკა ძალიან თავსატეხი და ძნელად გასაგები თეორიაა და დაე, მკითხველს ნუ გაუკვირდება, რომ მოვლენების ახსნას კიდევ უფრო უცნაური სახე აქვს, ვიდრე თვით მოვლენებს. ირკვევა, რომ თხევადი ჰელიუმის ყოველი ნაწილაკი ერთდროულად ორ მოძრაობაში მონაწილეობს: ერთი მოძრაობა ზედენადია და სიბლანტესთან არ არის დაკავშირებული, ხოლო მეორე — ჩვეულებრივი.

ჰელიუმ II ისე იქცევა, თითქოს სრულიად დამოუკიდებლად „ერთმანეთის გამჭოლად" მოძრავი ორი სითხის ნარევისაგან შედგებოდეს. ერთი სითხე ქცევის მხრივ ნორმალურია, ე. ი. ჩვეულებრივი სიბლანტისაა, მეორე შემადგენელი ნაწილი კი ზედენადია.

როდესაც ჰელიუმი ნაჩვრეტში გაედინება ან ჭიქის კიდეზე გადმოედინება, ჩვენ ზედენადობის ეფექტს ვაკვირდებით. ხოლო ჰელიუმში ჩაშვებული დისკოს რხევის დროს დისკოს

აჩერებს ხახუნი, რომელსაც წარმოქმნის ჰელიუმის ნორმალურ ნაწილში დისკოს ხახუნის გარდუვალობა.

ორ სხვადასხვა მოძრაობაში მონაწილეობის უნარი აპირობებს აგრეთვე ჰელიუმის არაჩვეულებრივ სითბოგამტარობის თვისებებს. როგორც უკვე ითქვა, სითხეები საზოგადოდ საკმაოდ ცუდად ატარებენ სითბოს. იგივე ითქმის ჰელიუმ I-ზეც. ჰელიუმ II-ად გარდაქმნის შემდეგ კი მისი თბოგამტარობა დაახლოებით მილიარდჯერ იზრდება. ამრიგად, ჰელიუმ II სითბოს უკეთ ატარებს, ვიდრე სითბოს ყველაზე კარგი ჩვეულებრივი გამტარები — სპილენძი და ვერცხლი.

საქმე ისაა, რომ ჰელიუმის ზედენადი მოძრაობა სითბოს გადაცემაში არ მონაწილეობს. ამიტომაც, როდესაც ჰელიუმ II-ში ტემპერატურა ეცემა, მაშინ ურთიერთ საწინააღმდეგო მიმართულებით მოძრავი ორი ნაკადი წარმოიშობა. ერთ მათგანს — ნორმალურს — თან სითბო მიაქვს. ეს სრულიად არა ჰგავს ჩვეულებრივ თბოგამტარობას. ჩვეულებრივ სითხეში სითბოს გადაცემა მოლეკულების დაჯახებით ხორციელდება. ჰელიუმ II-ში სითბო მიედინება ჰელიუმის ჩვეულებრივ ნაწილთან ერთად, მიედინება, როგორც სითხე. აი აქ უკვე ტერმინი „სითბოს ნაკადი" სავსებით გამართლებულია. სითბოს გადაცემის სწორედ ასეთი ხერხი აპირობებს უზარმაზარ თბოგამტარობას.

ჰელიუმის თბოგამტარობის ეს ახსნა შეიძლება იმდენად უცნაური გვეჩვენოს, რომ არც დავიჯეროთ. მაგრამ ნათქვამის სამართლიანობაში უშუალოდ დავრწმუნდებით შემდეგი მარტივი ცდით.

თხევად ჰელიუმიან აბაზანაში მოთავსებულია ჰელიუმით სავსე დიუარი. ჭურჭელი აბაზანას კაპილარული მინაზარდით უერთდება. ჰელიუმი ჭურჭლის შიგნით ელექტრული სპირალით თბება, სითბო ირგვლივ მყოფ ჰელიუმს არ გადაეცემა, რადგანაც ჭურჭლის კედლები სითბოს არ ატარებს.

კაპილარული მილაკის პირდაპირ არის წვრილი ძაფით ჩამოკიდებული ფრთა. თუ სითბო სითხესავით მიედინება, მაშინ მან ფრთა უნდა მოაბრუნოს. ასედაც ხდება. ამასთან,

ჰელიუმის რაოდენობა ჭურჭელში არ იცვლება. როგორ ავხსნათ ეს საოცარი მოვლენა? მხოლოდ ერთადერთი გზით: გათბობისას წარმოშობილი სითხის ნორმალური ნაწილის ნაკადი გამთბარი ადგილიდან ცივისაკენ მიედინება, ზედენადი ნაწილის ნაკადი კი — საწინააღმდეგო მიმართულებით. ჰელიუმის რაოდენობა ყოველ წერტილში უცვლელია, მაგრამ რადგანაც სითბოს გადატანასთან ერთად სითხის ნორმალური ნაწილიც მოძრაობს, ამიტომ ფრთა მობრუნდება ამ ნაწილის ბლანტი ხახუნის გამო და გადახრილი დარჩება მანამდე, სანამ გათბობა გაგრძელდება.

რაკი ზედენად მოძრაობას სითბო არ გადააქვს, სხვა დასკვნაც შეიძლება გავაკეთოთ. ზემოთ ნათქვამი იყო, რომ ჰელიუმს უნარი აქვს „გადაცოცდეს" ჭიქის კიდეზე. მაგრამ ჭიქიდან „ძვრება" ზედენადი ნაწილი, ნორმალური კი რჩება. სითბო ჰელიუმის მხოლოდ ნორმალურ ნაწილთან არის დაკავშირებული, იგი თან არ მისდევს „ამომძვრალ" ზედენად ნაწილს. მაშასადამე, ჭიქიდან ჰელიუმის „ამოძვრომის" მიხედვით ერთი და იგივე სითბო მოვა ჰელიუმის სულ უფრო მცირე რაოდენობაზე — ჭურჭელში დარჩენილი ჰელიუმი უნდა გათბეს. ცდა ამას სინამდვილეშიც გვიჩვენებს.

ზედენად და ნორმალურ მოძრაობასთან დაკავშირებული ჰელიუმის მასები სხვადასხვაგვარია. მათი ფარდობა ტემპერატურაზეა დამოკიდებული. რაც უფრო დაბალია ტემპერატურა, მით მეტია ჰელიუმის ზედენადი მასა. აბსოლუტურ ნულზე მთელი ჰელიუმი ზედენადი ხდება. ტემპერატურის მომატებისას ჰელიუმის სულ უფრო მეტი და მეტი ნაწილი იქცევა ნორმალურად და 2,19°K მთელი ჰელიუმი ნორმალურია, იგი ჩვეულებრივი სითხის თვისებებს იძენს.

მაგრამ მკითხველს უკვე ენის წვერზე აქვს კითხვა: ეს რა ზედენადი ჰელიუმია, როგორ მონაწილეობს სითხის ნაწილაკი ერთდროულად ორ მოძრაობაში, როგორ ავხსნათ თვით ფაქტი ერთი ნაწილაკის ორი მოძრაობისა?.. სამწუხაროდ, ჩვენ იძულებული ვართ ყველა ეს კითხვა აქ უპასუხოდ დავტოვოთ. ჰელიუმ II-ის თეორია მეტისმეტად რთულია და მის გასაგებად ძალიან ბევრი რამ უნდა ვიცოდეთ.

პლასტიკურობა

დრეკადობა არის სხეულის უნარი აღიდგინოს ფორმა მას შემდეგ, რაც ძალის მოქმედება შეწყდა. მეტრიან ფოლადის მავთულზე, რომლის განივკვეთია 1 მმ², კილოგრამიანი საწონი რომ ჩამოვკიდოთ, მავთული გაიჭიმება. გაჭიმვა უმნიშვნელოა, მხოლოდ და მხოლოდ 0,05 მმ, მაგრამ მისი შემჩნევა არ არის ძნელი. საწონი რომ მოვხსნათ, მავთული იმავე 0,05 მმ დამოკლდება და ნიშანი ადრინდელ მდგომარეობაში დაბრუნდება. სწორედ ასეთ დეფორმაციას ეწოდება დრეკადი.

შევნიშნოთ, რომ 1 მმ² განივკვეთის მავთული 1 კგ ძალის მოქმედებით და 1 სმ² განივკვეთის მავთული 100 კგ ძალის მოქმედებით, როგორც ამბობენ, მექანიკური დაძაბულობის ერთნაირ პირობებში იმყოფებიან. ამიტომაც მასალის ქცევა ყოველთვის უნდა აიწეროს არა ძალის (რაც უსაგნოა, თუ სხეულის კვეთა უცნობია), არამედ იმ ძაბვის, ე. ი. ძალის ჩვენებით, რომელიც ფართის ერთეულზე მოდის. ჩვეულებრივი სხეულები — ლითონები, მინა, ქვები — შეიძლება დრეკადად გავჭიმოთ უკეთეს შემთხვევაში მხოლოდ რამდენიმე პროცენტით. განსაკუთრებული დრეკადი თვისებები აქვს რეზინს. რეზინი შეიძლება დრეკადად გაიჭიმოს რამდენიმე ასეული პროცენტით (ე. ი. საწყის სიგრძეზე ორჯერ და სამჯერ მეტად), ხოლო თუ ასეთი რეზინის ზონარს გავათავისუფლებთ, ვნახავთ, რომ იგი საწყის მდგომარეობას დაუბრუნდება.

ყველა სხეული გამონაკლისის გარეშე მცირე ძალების გავლენით დრეკადია. მაგრამ დრეკადი ქცევის ზღვარი ზოგი სხეულისათვის ადრე დგება, სხვებისათვის გაცილებით უფრო გვიან. მაგალითად, ისეთი რბილი ლითონისათვის, როგორიც ტყვიაა, დრეკადობის ზღვარს მაშინ მივიღებთ, თუ მილიმეტრიანი კვეთის მავთულის ბოლოზე 0,2—0,3 კგ-ძ ტოლ ტვირთს ჩამოვკიდებთ. ისეთი მაგარი მეტალებისათვის, როგორიც ფოლადია, ეს ზღვარი დაახლოებით 100-ჯერ მეტია, ე. ი. 25 კგ-ძ მახლობლადაა.

ისეთი დიდი ძალების მიმართ, დრეკადობის საზღვარს რომ აღემატებიან, სხვადასხვა სხეულები შეიძლება უხეშად ორ კლასად გავყოთ — ისეთებად, როგორიცაა მინა, ე. ი. მსხვრევადებად, და ისეთებად, როგორიცაა თიხა, ე. ი. პლასტიკურებად.

თიხის ნაჭერს თითი რომ დავაჭიროთ, ზედ ანაბეჭდი დარჩება, რომელიც კანის ნაოჭების რთულ სურათსაც კი ზუსტად გადმოგვცემს. თუ რბილი რკინის ან ტყვიის ნაჭერს ჩაქუჩს დავარტყამთ, იგი მკაფიო კვალს დატოვებს. ზემოქმედება აღარ არის, დეფორმაცია კი რჩება — მას პლასტიკურს ან ნარჩენს უწოდებენ. ასეთი ნარჩენი კვალის მიღება მინაზე არ ხერხდება: თუ ამ განზრახვას დავიჟინებთ, მინა დაიმსხვრევა. ასევე მსხვრევადია ზოგიერთი ლითონი და შენადნობი, მაგალითად, თუჯი. რკინის ვედროს რომ ჩაქუჩი დავარტყათ, იგი გაიჭყლიტება, ხოლო თუჯის ქვაბი გატყდება.

მსხვრევადი სხეულების სიმაგრეზე შემდეგი რიცხვების მიხედვით შეიძლება მსჯელობა. თუჯის ნაჭერი ფხვნილად რომ ვაქციოთ, ზედაპირის კვადრატულ მილიმეტრზე დაახლოებით 50—80 კგ ძალით უნდა ვიმოქმედოთ. აგურისთვის ეს რიცხვი 1,5—3 კგ-ძალამდე მცირდება.

ისევე, როგორც ყოველგვარი კლასიფიკაცია, სხეულთა დაყოფა მსხვრევადებად და პლასტიკურებად საკმაოდ პირობითია. პირველ ყოვლისა, მცირე ტემპერატურაზე მსხვრევადი სხეული უფრო მაღალ ტემპერატურაზე შეიძლება პლასტიკური გახდეს. მინა მშვენივრად შეიძლება დამუშავდეს როგორც პლასტიკური მასალა, თუ მას რამდენიმე ასეულ გრადუსამდე გავახურებთ.

ისეთი რბილი ლითონი, როგორიც ტყვიაა, შეიძლება ცივად ვჭედოთ, მაგრამ მაგარი ლითონები მხოლოდ ძალიან გახურებულ, გავარვარებულ მდგომარეობაში იჭედება. ტემპერატურის მატება მკვეთრად ადიდებს მასალების პლასტიკურ თვისებებს.

ლითონების ერთ-ერთ არსებით თავისებურებას, რომელმაც ისინი უბადლო კონსტრუქციულ მასალებად აქცია, წარმოადგენს მათი სიმაგრე ოთახის ტემპერატურებზე და პლასტიკურობა მაღალ ტემპერატურებზე: გავარვარებული ლითო-

ნებისათვის ადვილია საჭირო ფორმის მიცემა, ხოლო ოთახის ტემპერატურაზე ამ ფორმის შეცვლა მხოლოდ ძალიან მნიშვნელოვანი ძალებით შეიძლება.

მექანიკურ თვისებებზე არსებით გავლენას ახდენს მასალის შინაგანი აგებულება. გასაგებია, რომ ნაბზარი და სიღრუე ამცირებს სხეულის ხილულ სიმაგრეს და მას უფრო მყიფეს ხდის.

პლასტიკურად დეფორმად სხეულებს განმტკიცების შესანიშნავი უნარი აქვთ. მდნარიდან ახალგაზრდილი ლითონის ცალკეული კრისტალი ძალზე რბილია. ბევრი ლითონის კრისტალი იმდენად რბილია, რომ ადვილია მათი თითებით გაღუნვა, მაგრამ... ასეთი კრისტალის გაშლა აღარ ხერხდება. იგი განმტკიცებულია. ამ ნიმუშის პლასტიკურად დეფორმირება ახლა მხოლოდ მნიშვნელოვანი ძალით თუ მოხერხდება. თურმე პლასტიკურობა არა მარტო მასალის, არამედ მისი დამუშავების თვისებაც ყოფილა.

რატომ არის, რომ იარაღის დასამზადებლად ლითონის ჩამოსხმის ნაცვლად ჭედვას მიმართავენ? მიზეზი გასაგებია — ნაჭედი ლითონი (ან ნაგლინი, ან გაწელილი) სხმულზე ბევრად მტკიცეა.

რამდენიც არ უნდა ვჭედოთ ლითონი, მაინც ვერ ავწევთ მის სიმაგრეს გარკვეულ ზღვარზე ზევით. ამ ზღვარს დენადობის ზღვარი ეწოდება. ფოლადისათვის ეს ზღვარი 30—50 კგ-ძ/მმ^2 ინტერვალშია.

ეს რიცხვი შემდეგს აღნიშნავს. თუ მილიმეტრიანი კვეთის მავთულზე ფუთიან საწონს ჩამოვკიდებთ (ზღვარს ქვემოთ), მაშინ მავთული დაიწყებს გაჭიმვას და ერთდროულად განმტკიცებასაც. ამიტომ გაჭიმვა მალე შეწყდება — საწონი მშვიდად დაეკიდება მავთულზე. ხოლო თუ ასეთ მავთულზე ორ-სამფუთიან საწონს დავკიდებთ (დენადობის საზღვარს ზევით), მაშინ სხვაგვარი სურათი გვექნება. მავთული დაიწყებს უწყვეტად გაჭიმვას (დენას), სანამ არ გაწყდება. კიდევ ერთხელ ვუსვამთ ხაზს იმას, რომ სხეულის მექანიკური ქცევა განისაზღვრება არა ძალით, არამედ ძაბვით. 100 კვ. მიკრონი კვეთის მქონე მავთული დენას იწყებს 30—50. 10^{-4} კგ-ძ, ანუ 3—5 გ-ძ ტოლი ტვირთის მოქმედებით.

სიმაგრე

სიმტკიცე და სიმაგრე ერთმანეთთან ხელიხელჩაკიდებულნი არ დადიან. თოკის ბაგირს, მაუდის ნაკუწს, აბრეშუმის ძაფს შეიძლება ფრიად დიდი სიმტკიცე ჰქონდეს — მნიშვნელოვანი ძაბვა დაგვჭირდეს იმისთვის, რომ ისინი გავგლიჯოთ. მაგრამ, რასაკვირველია, არავინ იტყვის, რომ თოკი ან მაუდი მაგარი მასალებია. და, პირიქით, მინის სიმტკიცე მცირეა, მაგრამ იგი მაგარი მასალაა.

სიმაგრის ცნება, რომლითაც ტექნიკაში სარგებლობენ, ცხოვრების პრაქტიკიდან არის აღებული. სიმაგრე ჩანერგვისათვის წინააღმდეგობის გაწევაა. მასალა მაგარია, თუ ძნელია მისი გაკაწვრა, ზედ ანაბეჭდის დატოვება. ეს განმარტება მკითხველს შეიძლება ბუნდოვნადაც ეჩვენოს. ჩვენ მიჩვეული ვართ ფიზიკური ცნების რიცხვით გამოხატვას. სიმაგრეს რაღა ვუყოთ?

მინერალოგები უკვე დიდი ხანია იყენებენ ერთ ფრიად კუსტარულ, მაგრამ ამავე დროს პრაქტიკულად სასარგებლო ხერხს. ათი გარკვეული მინერალი რიგზე ლაგდება, პირველია ალმასი, მას მოსდევს კორუნდი, შემდეგ — თოპაზი, კვარცი, მინდვრის შპატი, აპატიტი, მლღობი შპატი, კირშპატი, თაბაშირი და ტალკი. ეს რიგი შემდეგნაირად არის შერჩეული: ალმასი ტოვებს ნაკაწრს ყველა მინერალზე, მაგრამ არც ერთ ამ მინერალთაგანს არ შეუძლია მისი გაკაწვრა. სწორედ ეს ნიშნავს იმას, რომ ალმასი ყველაზე მაგარი მინერალია. ალმასის სიმაგრე ისაზღვრება რიცხვით 10. ალმასის მომდევნო კორუნდი ყველა თავის მომდევნო მასალაზე მაგარია — კორუნდს მათი გაკაწვრა შეუძლია. კორუნდს მიაკუთვნებენ სიმაგრის რიცხვს 9. რიცხვები 8, 7 და 6 იმავე საფუძველზე მიეკუთვნება თოპაზს, კვარცსა და მინდვრის შპატს. თვითეული მათგანი ყველა მომდევნო მინერალზე უფრო მაგარია (ე. ი. შეუძლია გაკაწროს), და რბილია მინერალებზე (თვითონ შეიძლება გაიკაწროს), რომლებსაც სიმაგრის მეტი რიცხვი აქვთ. ყველაზე რბილ მინერალს — ტალკს — სიმაგრის ერთი ერთეული აქვს.

თუ სიმაგრეს ზემოთ მოყვანილი სკალის დახმარებით „გავ-

ზომავთ“ (ამ სიტყვის ბრჭყალებში ჩასმა მოგვიხდება), მაშინ ჩვენთვის საინტერესო მინერალს ათი არჩეული სტანდარტის რიგში ვუპოვით ადგილს.

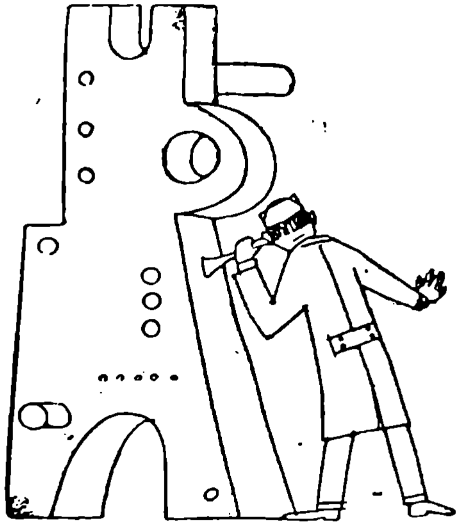
როცა უცნობ მინერალს კვარცი კაწრავს, ხოლო თვითონ ეს მინერალი მინდვრის შპატზე ტოვებს ნაკაწრს, მაშინ მისი სიმაგრე 6,5 ტოლია.

ლითონმცოდნეები სიმაგრის განსაზღვრის სხვა მეთოდით სარგებლობენ. 1 სმ დიამეტრიან ფოლადის ბურთულით საკვლევ მასალაზე სტანდარტული ძალით (ჩვეულებრივ 3000 კგ-ძ) კეთდება ჩანაჭყლეტი. წარმოშობილი ორმოს დიამეტრი მიღებულია სიმაგრის რიცხვად.

გაკაწვრის მიმართ და ჩაჭყლეტის მიმართ სიმაგრე ყოველთვის არ შეესაბამება ერთმანეთს. ერთი მასალა შეიძლება მეორეზე მაგარი აღმოჩნდეს, როცა მას გაკაწვრით გამოვცდით, და იმავე მასალაზე რბილი — ჩაჭყლეტით გამოცდისას.

ამრიგად, არ არსებობს გაზომვის ხერხისგან დამოუკიდებელი სიმაგრის უნივერსალური ცნება. ამიტომაც იგი მიეკუთვნება ტექნიკურ და არა ფიზიკურ ცნებათა რიცხვს.

XV. ბგერა



ბგერითი რხევები

რხევების შესახებ მკითხველს ჩვენ უკვე მრავალი ცნობა მივაწოდეთ. როგორ ირხევა ქანქარა, ან ზამბარაზე ჩამოკიდებული ბურთულა, ანდა როგორია სიმის რხევის კანონზომიერება — ამ საკითხებს წიგნის მეხუთე თავი მიეძღვნა. არაფერი გვითქვამს მხოლოდ იმაზე, თუ რა ხდება ჰაერში ან სხვა გარემოში, როდესაც იქ მოთავსებული სხეული ირხევა. უდავოა, გარემო გულგრილი ვერ დარჩება რხევისადმი. მერხევი საგანი უბიძგებს ჰაერს და გადაანაცვლებს მის ნაწილაკებს ადრინდელი მდებარეობიდან. ცხადია აგრეთვე, რომ ეს ზემოქმედება ჰაერის მარტო ახლოს მდებარე ფენებს არ ეხება. სხეული შეკუმშავს უახლოეს ფენას, ეს ფენა აწვება მომდევნოს და ამგვარად მთელი გარემომცველი ჰაერი იწყებს მოძრაობას. ჩვენ ვამბობთ, რომ ჰაერი რხევით მდგომარეობაშია ან ჰაერში ბგერითი რხევა სრულდება.

გარემოს რხევებს ჩვენ ბგერით რხევებს ვუწოდებთ, მაგრამ ეს იმას არ ნიშნავს, რომ ბგერის ყველა რხევა გვესმის. ფიზიკა უფრო ფართო გაგებით სარგებლობს ბგერითი რხევების ცნებით. თუ როგორი ბგერითი რხევები გვესმის ჩვენ, ამის შესახებ ქვემოთ ვიტყვით.

აქ იმიტომ ვლაპარაკობთ ჰაერზე, რომ ბგერა უმეტესად ჰაერის საშუალებით ვრცელდება. მაგრამ, რასაკვირველია, ჰაერს არა აქვს რაიმე განსაკუთრებული თვისება, რაც მას ბგერითი რხევების შესრულების მონოპოლურ უფლებას მიანიჭებდა. ბგერითი რხევები წარმოიშობა ნებისმიერ კუმშვად გარემოში, ხოლო რადგანაც უკუმშვადი სხეულები ბუნებაში არ არის, ამიტომ, ცხადია, ნებისმიერი მასალის ნაწილაკები შეიძლება ამ პირობებში აღმოჩნდეს. მოძღვრებას ასეთი რხევების შესახებ ჩვეულებრივად აკუსტიკას უწოდებენ.

ბგერითი რხევებისას ჰაერის თვითეული ნაწილაკი საშუალოდ ადგილზევე რჩება — იგი მხოლოდ წონასწორობის მდებარეობის მახლობლად ირხევა. უმარტივეს შემთხვევაში ჰაერის ნაწილაკს შეუძლია შეასრულოს ჰარმონიული რხევა, რომელიც, როგორც გვახსოვს, სინუსის კანონის მიხედვით ხდება. ასეთი რხევა ხასიათდება წონასწორობის მდებარეობიდან მაქსიმალური გადანაცვლებით — ამპლიტუდით და რხევის პერიოდით, ანუ დროით, რომელიც ერთი სრული რხევისათვის არის საჭირო.

ბგერითი რხევების თვისებების აღწერისას უფრო ხშირად სარგებლობენ რხევის სიხშირის ცნებით, ვიდრე პერიოდით. სიხშირე $\nu = \frac{1}{T}$ პერიოდის შებრუნებული სიდიდეა. სიხშირის ერთეულია შებრუნებული წამი (წმ$^{-1}$). თუ რხევის სიხშირე 100 წმ$^{-1}$. ტოლია, ეს იმას ნიშნავს, რომ ერთ წამში ჰაერის ნაწილაკი ასრულებს 100 სრულ რხევას. იმის ნაცვლად, რომ ვთქვათ „100 შებრუნებული წამი“, შეიძლება ითქვას „100 ჰერცი“ (ჰც) ან „100 ციკლი“. იმის გამო, რომ ფიზიკაში საკმაოდ ხშირად გვაქვს საქმე სიხშირეებთან, რომლებიც მრავალჯერ აღემატებიან ჰერცს, ფართოდ იხმარება ერთე-

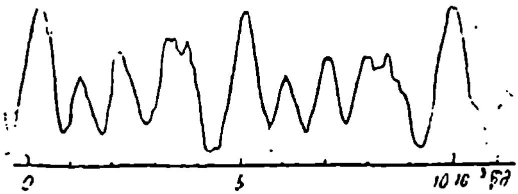
ულები კილოჰერცი (კილოციკლი) და მეგაჰერცი (მეგაციკლი); 1 კჰც$=10^3$ ჰც, 1 მგჰც$=10^6$ ჰც.

წონასწორობის მდებარეობაზე გავლისას მერხევი ნაწილაკის სიჩქარე მაქსიმალურია. პირიქით, გადანაცვლების განაპირა მდებარეობებში ნაწილაკის სიჩქარე, ცხადია, ნულის ტოლია. ჩვენ უკვე აღვნიშნეთ, რომ თუ ნაწილაკის გადანაცვლება ჰარმონიული რხევის კანონს ემორჩილება, მაშინ რხევის სიჩქარის ცვლილებაც იმავე კანონის მიხედვით ხდება. თუ გადანაცვლების ამპლიტუდას S_0 აღვნიშნავთ, ხოლო სიჩქარისას v_0, მაშინ $v_0=2\pi\frac{S_0}{T}$, ანუ $v_0=2\pi\ \nu\cdot s_0$. ხმამაღალი ლაპარაკის შედეგად ჰაერის ნაწილაკები ირხევა. ამ რხევის გადანაცვლების ამპლიტუდა სანტიმეტრის მხოლოდ რამდენიმე მემილიონედი ნაწილის ტოლია. სიჩქარის ამპლიტუდური მნიშვნელობა იქნება 0,02 სმ/წმ სიდიდის რიგისა.

სხვა მნიშვნელოვანი ფიზიკური სიდიდე, რომელიც გადანაცვლებასა და ნაწილაკის სიჩქარესთან ერთად ირხევა, ჭარბი წნევაა, მას ბგერის წნევასაც უწოდებენ. ჰაერის ბგერითი რხევა მდგომარეობს შეკუმშვისა და გაიშვიათების პერიოდულ მონაცვლეობაში გარემოს ყოველ წერტილში. ჰაერის წნევა ნებისმიერ ადგილში, ხან მეტია, ხან ნაკლები იმ წნევაზე, რომელიც ბგერის არსებობამდე იყო. წნევის ამ ნაჭარბს (ან დანაკლისს) ეწოდება სწორედ ბგერის წნევა. ბგერის წნევა ჰაერის ნორმალური წნევის სულ უმნიშვნელო ნაწილს შეადგენს. ჩვენი მაგალითისათვის — ხმამაღალი ლაპარაკი — ბგერის წნევის ამპლიტუდა ატმოსფეროს წნევის დაახლოებით მემილიონედ ნაწილს შეადგენს. ბგერის წნევა ნაწილაკის რხევის სიჩქარის პირდაპირპროპორციულია, ამასთან, ამ ფიზიკურ სიდიდეთა ფარდობა მხოლოდ გარემოს თვისებებზეა დამოკიდებული. მაგალითად 1 დნ/სმ^2 ბგერის წნევას ჰაერში შეესაბამება 0,025 სმ/წმ რხევის სიჩქარე.

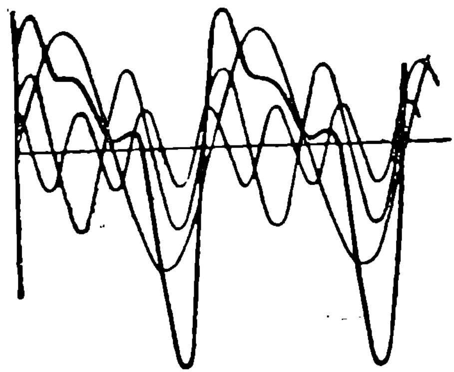
სინუსის კანონით მერხევ სიმს ჰაერის ნაწილაკებიც ჰარმონიულ რხევაში მოჰყავს. ხმაური და რთული მუსიკალური ბგერები გაცილებით უფრო რთულ სურათს იძლევა. 114-ე ნახატზე ნაჩვენებია ბგერითი რხევების ჩანაწერი, სახელდობრ, ბგერის წნევის დამოკიდებულება დროისგან. ეს სუ-

რათი ნაკლებად ჰგავს სინუსოიდს. მაგრამ ირკვევა, რომ ნებისმიერად რთული რხევა შეიძლება წარმოვიდგინოთ რო-



ნახ. 114.

გორც სხვადასხვა ამპლიტუდებისა და სიხშირეების მქონე სინუსოიდების დიდი რიცხვის ერთმანეთზე ზედდადების შედეგი. ეს მარტივი რხევები, როგორც ამბობენ, რთული რხევის სპექტრს შეადგენენ. უბრალო მაგალითისთვის რხევების ასეთი შეკრება ნაჩვენებია 115-ე ნახატზე.



ნახ. 115.

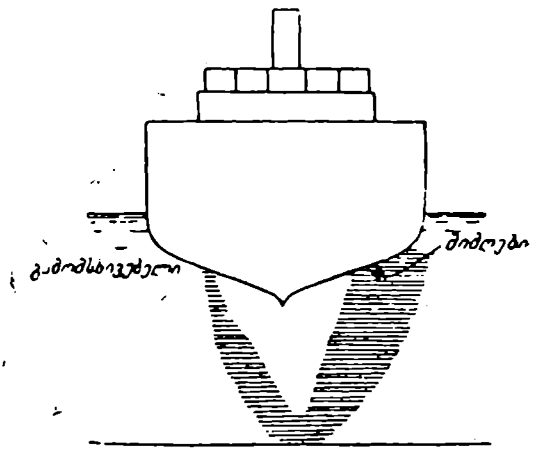
ბგერის სიჩქარე

ელვისა აღარ უნდა გვეშინოდეს მას შემდეგ, რაც დაიქუხებს. თქვენ უთუოდ გაგიგონიათ ეს. მაგრამ რატომ? საქმე ისაა, რომ სინათლე შეუდარებლად უფრო სწრაფად ვრცელ-

დება, ვიდრე ბგერა, — პრაქტიკულად მყისიერად. ელვა და ქუხილი ერთსა და იმავე მომენტში წარმოიქმნება, მაგრამ ელვას ჩვენ მისი წარმოშობის მომენტშივე ვხედავთ, ხოლო ქუხილის ხმა დაახლოებით სამ წამში ერთი კილომეტრის სიჩქარით მოდის ჩვენამდე (ბგერის სიჩქარე ჰაერში 300 მ/წმ შეადგენს). მაშასადამე, როდესაც ქუხილი ისმის, მეხის დაცემის საშიშროება უკვე გავლილია.

როცა ვიცით ბგერის გავრცელების სიჩქარე, ჩვეულებრივ, შეიძლება განვსაზღვროთ, რა მანძილზეა ჰექა-ქუხილი. თუ გაელვებიდან ქუხილამდე 12 წამი გავიდა, ჰექა-ქუხილი ჩვენგან 4 კილომეტრზე ყოფილა.

ბგერის სიჩქარე გაზებში დაახლოებით გაზის მოლეკულების მოძრაობის საშუალო სიჩქარის ტოლია. იგი არ არის



ნახ. 116.

დამოკიდებული გაზის სიმკვრივეზე და აბსოლუტური ტემპერატურიდან კვადრატული ფესვის პროპორციულია. სითხეები უფრო სწრაფად ატარებენ ბგერას, ვიდრე გაზები. წყალში ბგერა 1450 მ/წმ სიჩქარით ვრცელდება, ანუ 4,5-ჯერ უფრო სწრაფად, ვიდრე ჰაერში. კიდევ უფრო მეტია ბგერის სიჩქარე მყარ სხეულებში, მაგალითად, რკინაში — 6000 მ/წმ.

როდესაც ბგერა ერთი გარემოდან მეორეში გადადის, მისი გავრცელების სიჩქარე იცვლება. მაგრამ ერთდროულად სხვა საინტერესო მოვლენაც ვითარდება — ორი გარემოს გამყოფი ზედაპირიდან ბგერა ნაწილობრივ აირეკლება. ბგერის რა ნაწილი აირეკლება — ეს უმთავრესად სიმკვრივეების თანაფარდობაზეა დამოკიდებული. როდესაც ბგერა ჰაერიდან მყარ ან თხევად ზედაპირს ეცემა, ან, პირიქით, მკვრივი გარემოდან ჰაერში გადადის, იგი თითქმის მთლიანად ირეკლება. როდესაც ბგერა ჰაერიდან წყალში, ან, პირიქით წყლიდან ჰაერში გადადის, მაშინ მეორე გარემოში ბგერის მხოლოდ 1/1000 წილი აღწევს. თუ ორივე გარემო მკვრივია, მაშინ ფარდობა გასულ და არეკლილ ბგერებს შორის შეიძლება მცირეც იყოს. მაგალითად, წყლიდან ფოლადში ან ფოლადიდან წყალში გადავა ბგერის 13%, ხოლო აირეკლება 87%.

ბგერის არეკვლის მოვლენას ფართოდ იყენებენ ნავიგაციაში. მასზე არის დამყარებული სიღრმის გამზომი ხელსაწყოს — ექოლოტის მოწყობა (ნახ. 116). გემის ერთ ბორტთან წყლის ქვეშ ათავსებენ ბგერის წყაროს. წყვეტილი ბგერა ჰქმნის ბგერის სხივებს, რომლებიც აღწევენ წყლის სიღრმეში ზღვის ან მდინარის ძირს, ირეკლებიან იქიდან და ბგერის ნაწილი ბრუნდება გემზე, სადაც მას მგრძნობიარე ხელსაწყოები იჭერენ. ზუსტი საათი აჩვენებს, რა დრო დასჭირდა ბგერას ამ მოგზაურობისათვის. ბგერის სიჩქარე წყალში ცნობილია და მარტივი გამოთვლით შეიძლება მივიღოთ ზუსტი ცნობები სიღრმის შესახებ.

თუ ბგერას მივმართავთ არა ქვევით, არამედ წინ ან გვერდზე, შეიძლება განვსაზღვროთ, ხომ არ არის გემის მახლობლად სახიფათო წყალქვეშა კლდეები ან წყალში ღრმად ჩაძირული აისბერგები.

ბგერის ტალღა

ბგერა რომ მყისიერად ვრცელდებოდეს, მაშინ ჰაერის ყველა ნაწილაკი ერთი ნაწილაკივით დაიწყებდა რხევას. მაგრამ ბგერა მყისიერად არ ვრცელდება და გავრცელების ხაზზე მდებარე ჰაერის მოცულობები რიგ-რიგობით ებმებიან

მოძრაობაში, თითქოს მათ წყაროდან გამოსული ტალღა ამოძრავებდეს. სწორედ ასევე მშვიდად დევს ნაფოტი წყალზე, ვიდრე წყალში ჩაგდებული ქვით წარმოშობილი წრიული ტალღები არ აიტაცებენ და არ დააწყებინებენ რხევას.

შევაჩეროთ ჩვენი ყურადღება ერთ მერხევ ნაწილაკზე და შევადაროთ მისი ქცევა ბგერის გავრცელების იმავე ხაზზე მდებარე სხვა ნაწილაკების მოძრაობას. მეზობელი ნაწილაკი დაიწყებს რხევას ცოტა უფრო გვიან, შემდეგი — კიდევ უფრო გვიან. შეგვიანება გაიზრდება, ვიდრე, ბოლოს, არ შევხვდებით მთელი პერიოდით ჩამორჩენილ ნაწილაკს, რომელიც საწყის ნაწილაკთან ტაქტში დაიწყებს რხევას. ამგვარადვე მთელი წრით ჩამორჩენილ წარუმატებელ მორბენალს შეუძლია ფინიშის ხაზი ლიდერთან ერთად გადაკვეთოს. მაგრამ რა მანძილზე შევხვდებით იმ წერტილს, რომელიც საწყისთან ტაქტში ირხევა? ძნელი არ არის მიხვედრა, რომ ეს λ მანძილი უდრის ბგერის გავრცელების c სიჩქარისა და რხევის T პერიოდის ნამრავლს. λ მანძილს ტალღის სიგრძე ეწოდება,

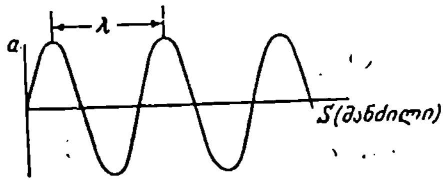
$$\lambda = cT.$$

λ შუალედების შემდეგ ჩვენ შევხვდებით წერტილებს, რომლებიც ტაქტში ირხევიან. წერტილები, რომლებიც ერთმანეთისაგან $\frac{\lambda}{2}$ მანძილებითაა დაშორებული, ერთმანეთის მიმართ ისე იმოძრავებენ, როგორც სარკისადმი მართობულად მერხევი საგანი თავისი გამოსახულების მიმართ.

თუ გამოვსახავთ გადანაცვლებას (ან სიჩქარეს, ან ბგერის წნევას) ჰარმონიული ბგერის გავრცელების ხაზზე განლაგებული ყველა წერტილისათვის, კვლავ სინუსოიდს მივიღებთ.

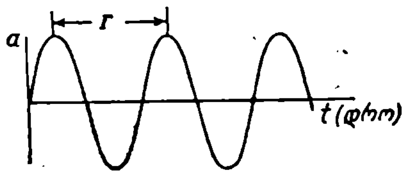
არ უნდა აგვერიოს ერთმანეთში ტალღური მოძრაობისა და რხევების გრაფიკები. 117-ე და 118-ე ნახატები ძალიან ჰგვანან ერთმანეთს, მაგრამ პირველზე ჰორიზონტალურ ღერძზე გადაზომილია მანძილი, ხოლო მეორეზე — დრო. ერთი ნახატი წარმოადგენს რხევების დროში გაშლას, ხოლო მეორე — ტალღის მყისიერ „ფოტოგრაფიას“. ამ ნახატების შედარებიდან ჩანს, რომ ტალღის სიგრძეს შეიძლება აგრეთვე მისი სივრცული პერიოდი ვუწოდოთ: დროში T-ს როლს სივრცეში λ სიდიდე ასრულებს.

ნახატზე ბგერის ტალღის ნაწილაკის გადანაცვლება გადაზომილია ვერტიკალზე, ხოლო ტალღის გავრცელების მი-



ნახ. 117.

მართულებას, რომლის გასწვრივაც იზომება მანძილი, ჰორიზონტალი წარმოადგენს. ამან შეიძლება წარმოშვას მცდარი აზრი, რომ ნაწილაკები ტალღის გავრცელების მიმართულე-



ნახ. 118.

ბის მართობულად გადაინაცვლებენ. სინამდვილეში ჰაერის ნაწილაკები ყოველთვის ბგერის გავრცელების მიმართულების გასწვრივ ირხევიან. ასეთ ტალღას გასწვრივი (სიგრძივი) ეწოდება.

სმენადი ბგერა

როგორი ბგერის რხევებს აღიქვამს ადამიანი სმენით? თურმე ყურს შეუძლია აღიქვას მხოლოდ 20-დან 20.000 ჰც-მდე ინტერვალში მოთავსებული რხევები.

დიდი სიხშირის ბგერას ჩვენ მაღალს ვუწოდებთ, მცირე სიხშირისას — დაბალს.

ტალღის რა სიგრძეები შეესაბამება ზღვრულ სმენად სიხშირეებს? რადგანაც ბგერის სიჩქარე დაახლოებით 300 მ/წმ ტოლია, ამიტომ $\lambda = cT = \frac{c}{\nu}$ ფორმულებიდან ვპოულობთ, რომ სმენადი ტალღების სიგრძეები მოთავსებულია 15-მ-დან (ყველაზე დაბალი ტონებისათვის) 3 სმ-მდე (ყველაზე მაღალი ტონებისათვის).

როგორ „გვესმის" ეს რხევები?

ჩვენი სმენის ორგანოს მუშაობა რეზონანსის მოვლენაზეა დამყარებული. თქვენ გახსოვთ, რომ ასე ეწოდება სხეულის გაქანების მოვლენას, როდესაც გარეგანი რხევებისა და სხეულის რხევის სიხშირე ერთნაირია. ბგერის რეზონანსის დემონსტრირება ადვილია. ახადეთ როიალს თავი, დაიჭირეთ ხელში გიტარა და აიღეთ მისი საშუალებით მოკლე სუფთა ტონი. ყური მიუგდეთ: როიალი გიპასუხებთ — რხევას დაიწყებს მისი იმავე სიხშირეზე აწყობილი სიმი.

ყურში არის დაახლოებით 4,5 ათასი სხვადასხვა სიგრძის ბოჭკო. ბუნებამ ყოველგვარ ტონზე „ააწყო" ეს ბოჭკოები დაფის აპკი რხევებს ამ უწვრილეს ბოჭკოებს გადასცემს, მაგრამ რხევას მათგან მხოლოდ ისინი იწყებენ, რომლებიც სათანადო ტონზეა აწყობილი.

ზოგიერთ ადამიანს უნარი აქვს აბსოლუტურად გაარჩიოს ტონები. აიღეთ როიალზე რთული აკორდი, მსმენელი კი იტყვის, რომელ კლავიშებს შეეხეთ. მაშასადამე, მის ყურს აქვს უნარი, რთული ბგერა მის ჰარმონიულ მდგენელებად დაშალოს.

მუსიკა

მუსიკალური ბგერის განსხვავება ხმაურისაგან უკვე ილუსტრირებული იყო ბგერის წნევის მრუდებით. მარტივი მუსიკალური ტონი წარმოიშობა გარკვეული სიხშირის პერიოდული რხევით. რთული ბგერები სუფთა ტონების შეხამებას წარმოადგენენ.

მუსიკოსების ორკესტრი თითქმის ყველა სმენად ბგერას

წარმოქმნის. როიალის დიაპაზონი მოიცავს დაახლოებით 25-დან 4000 ჰც-მდე სიხშირის ტონებს.

ბგერების ყველა კომბინაცია არ ანიჭებს მსმენელს სიამოვნებას. სასიამოვნო შეგრძნებას თურმე ისეთი ბგერები იძლევა, რომელთა რხევების სიხშირეები მარტივ ფარდობაშია. თუ ბგერის სიხშირეების ფარდობა 2:1, ვღებულობთ ოქტავას, 5:4 — დიდ ტერციას, ფარდობა 4:3 გვაძლევს კვარტას, ხოლო 3:2 — კვინტას. კეთილხმოვანების შეგრძნება იკარგება, თუ შეუძლებელია ბგერის რხევის სიხშირეების ასეთი მარტივი შეფარდებების სახით წარმოდგენა. მაშინ მუსიკოსები ლაპარაკობენ დისონანსზე. ყური კარგად გრძნობს სხვადასხვა ტონების შეხამებას. ამიტომაც ადამიანებიც კი, რომლებსაც საშუალო სმენა აქვთ, კარგად გრძნობენ დისონანსებს.

ვიოლინოს ტიპის უკლავიშო ინსტრუმენტის საშუალებით მუსიკოსს შეუძლია ნებისმიერი ტონის აღება და ტონების ნებისმიერი შეხამების აჟღერება.

მაგრამ როცა როიალის მსგავს ინსტრუმენტთან გვაქვს საქმე, მაშინ სხვაგვარი მდგომარეობაა. როიალის სიმები გარკვეულ სიხშირეებზეა აწყობილი, კლავიშებზე დარტყმას არ შეუძლია ბგერის ტონის შეცვლა. როიალის კლავიატურა შვიდ სრულ ოქტავას შეიცავს. ქვედა „დო" იძლევა 32,64 ჰც სიხშირის ტონს, ხოლო ზედა — $32{,}64\times 2^7\approx 4178$ ჰც სიხშირისას. პრობლემა ისაა, თუ როგორ დაიყოს ოქტავა, ანუ როგორი შუალედური ტონები უნდა შემოვიღოთ, რომ ორი პირობა დავაკმაყოფილოთ. ჯერ ერთი, სიხშირეები რაც შეიძლება მარტივ შეფარდებებში უნდა იყვნენ და, მეორეც, ოქტავა ტოლ ინტერვალებად დაიყოს (სიხშირეებს შორის შეფარდებები), რადგანაც მხოლოდ ამ შემთხვევაში შეიძლება ერთი და იმავე მელოდიის დაკვრა ოქტავის ნებისმიერი ნოტიდან (იგივე მელოდია სხვა ტონალობაში). მკაცრად რომ ითქვას, ეს ორი მოთხოვნა წინააღმდეგობას შეიცავს. ისინი მიახლოებით ხორციელდება ეგრეთ წოდებული ტემპერირებული წყობის გამოყენებისას.

ვნახოთ, რას მივიღებთ, ოქტავა 12 ტოლ ინტერვალად რომ დავყოთ. თვითეული ამ ინტერვალთაგანი $2^{1/12}=1{,}059$

ტოლი იქნება. ეს იმას ნიშნავს, რომ ორი მეზობელი ტონის ფარდობა ამ რიცხვის ტოლი იქნება.

ამოვიწეროთ ახლა შემდეგი რიცხვები:

1) $2^{\frac{1}{12}}=1{,}059$	5) $2^{\frac{5}{12}}=1{,}335$	9) $2^{\frac{9}{12}}=1{,}682$
2) $2^{\frac{2}{12}}=1{,}122$	6) $2^{\frac{6}{12}}=1{,}414$	10) $2^{\frac{10}{12}}=1{,}782$
3) $2^{\frac{3}{12}}=1{,}189$	7) $2^{\frac{7}{12}}=1{,}498$	11) $2^{\frac{11}{12}}=1{,}888$
4) $2^{\frac{4}{12}}=1{,}260$	8) $2^{\frac{8}{12}}=1{,}587$	12) $2^{\frac{12}{12}}=2$

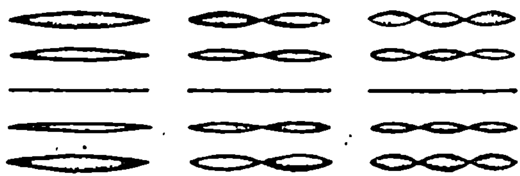
მუსიკოსი სრული კმაყოფილებით ამჩნევს, რომ არითმეტიკა წყვეტს მის ამოცანას: ოქტავა დაყოფილია მკაცრად ტოლ ინტერვალებად, ამავე დროს ბევრი ტონის ფარდობა საკმაოდ ახლოსაა მარტივი რიცხვების ფარდობასთან. ჩვენ ვპოულობთ აქ კვინტასაც (7), კვარტასაც (5), დიდ ტერციასაც (4), რადგანაც დაახლოებით $1{,}498\approx\frac{3}{2}$; $1{,}260\approx\frac{5}{4}$; ხოლო $1{,}335\approx\frac{4}{3}$. საუცხოოდ არის საქმე სხვა შემთხვევებშიც, სადაც განსხვავება 1% არ აღემატება: $1{,}414\approx\frac{7}{5}$; $1{,}122\approx\frac{9}{8}$; $1{,}587\approx8{,}5$; $1{,}682\approx\frac{5}{3}$; $1{,}888\approx\frac{17}{9}$ და მხოლოდ პირველი ინტერვალი $1{,}059\approx\frac{18}{17}$ იძლევა აშკარა დისონანსს.

სუფთა წყობისგან (ე. ი. ისეთი წყობისგან, რომელშიც სიხშირეთა ფარდობები ზუსტად მთელი რიცხვების ფარდობების ტოლია) მცირე გადახრები სმენით ძლივს შეიმჩნევა და როიალის ტემპერირებულმა წყობამაც გავრცელება ჰპოვა.

ალბათ გინახავთ, როგორ აწყობენ გიტარას — ამისათვის სიმს ჭიმავენ. თუ სიმის სიგრძე და დაჭიმვის ხარისხი შერჩეულია, მაშინ იგი შეხებისას სრულიად განსაზღვრულ ტონს გამოსცემს.

მაგრამ თუკი თქვენ მოუსმენთ სიმის ბგერას მის სხვადასხვა ადგილზე შეხების შემდეგ — შუაში, დამაგრების ადგილიდან ერთ მეოთხედზე, თუ სხვა ნებისმიერ ადგილზე, მაშინ რამდენადმე განსხვავებულ ბგერებს გაიგონებთ. ტონი ერთი და იგივე იქნება, ხოლო ბგერის ელფერი, ან, როგორც მუსიკოსები ამბობენ, ბგერის ტემბრი — განსხვავებული. რა აძლევს ერთსა და იმავე ტონის ბგერას სხვადასხვა ელფერს?

საქმე ისაა, რომ ერთსა და იმავე სიმს შეუძლია რხევა არა ერთი, არამედ მრავალი ხერხით. სიმის შესაძლო რხევების რამდენიმე ტიპი ნაჩვენებია 119-ე ნახატზე. უმცირესი სიხშირით რხევა (მას ძირითად სიხშირესაც უწოდებენ) მარცხენა სქემაზეა გამოსახული. განაპირა წერტილები დამაგრებულია, შუა წერტილი ირხევა უდიდესი ამპლიტუდით.



ნახ. 119.

იმისათვის, რომ მკითხველმა ნათლად წარმოიდგინოს მთელი სიმის რხევა, ნახატზე მისი რამდენიმე მიმდევრობითი მდებარეობაა ნაჩვენები. არის ისეთი მდებარეობაც, როდესაც მთელი სიმი სწორი ხაზის გასწვრივაა გაჭიმული — სიმის ყველა წერტილი ერთდროულად გადის წონასწორობის მდებარეობაზე. შუა სქემაზე ნაჩვენებია რხევა, რომელიც დაახლოებით გაორკეცებული სიხშირით სრულდება. ახლა განაპირა დამაგრებული წერტილების გარდა, უძრავ მდგომარეობაშია

სიმის შუა წერტილიც. ასეთ უძრავ წერტილს რხევის კვანძი ეწოდება. რხევის მაქსიმალური ამპლიტუდა აქვს სიმის ბოლოდან $1/4$ მანძილით დაშორებულ წერტილებს. ამ წერტილებზე ამბობენ, რომ აქ იმყოფება რხევის ბურცობები. სიცხადისათვის ნახატზე სიმის რამდენიმე მდებარეობაა გამოსახული. ამ შემთხვევაშიც, ისევე როგორც ყველა სხვა შემთხვევაში, სიმის ყველა წერტილი ერთდროულად გადის ნულზე.

ახლა უკვე შეიძლება აღარ გავუკეთოთ კომენტარები მარჯვენა ნახატს, სადაც ნაჩვენებია რხევა დაახლოებით გასამკეცებული სიხშირით — ამ რხევისათვის დამახასიათებელია ორი კვანძი და სამი ბურცობი.

აღგზნებისაგან დამოკიდებულებით სიმს უფრო მეტი სიხშირითაც შეუძლია რხევა. ყველა ეს სიხშირე, როგორც ამბობენ, სიმის საკუთარ სიხშირეებს განეკუთვნება.

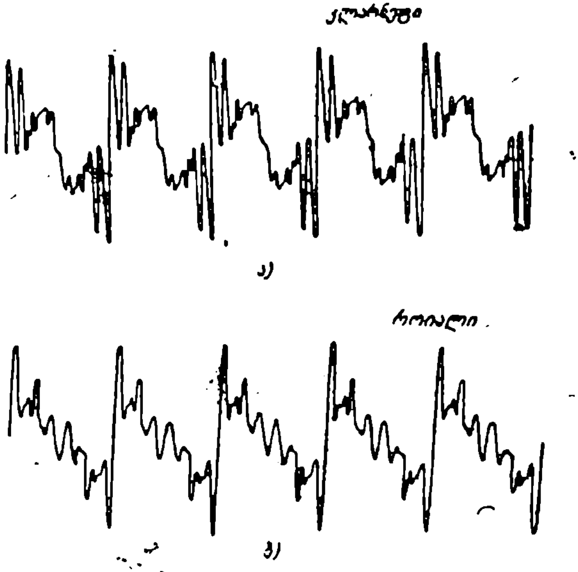
სიმის საკუთარი რხევები ძირითადის გარდა ისეთ ბგერებს იძლევა, რომლებსაც ობერტონები ეწოდება. სიმის ბგერა შედგება ძირითადი ტონისა და ობერტონების ბგერებისაგან. როდესაც სიმს სხვადასხვა ადგილებში ვეხებით, ჩვენ რხევების სხვადასხვა სპექტრებს ვქმნით. მაგალითად, სიმის ჩამოკვრა შუაზე ძალიან ძლიერ ძირითად ტონს გამოიწვევს; $1/4$ მანძილზე — გაორკეცებული სიხშირის მქონე ობერტონის შესამჩნევ ჟღერას. ნებისმიერ შემთხვევაში რხევის სპექტრში იქნება მრავალი სხვადასხვა სიძლიერის ობერტონი. სწორედ ეს ობერტონები ქმნიან ბგერის ელფერს (ტემბრს).

ახლა ჩვენთვის გასაგებია ერთი და იმავე ტონის სხვადასხვა ჟღერადობა, რომელსაც სხვადასხვა ხმაზე მღერიან ან როიალზე და ვიოლინოზე იღებენ. ესენი ყველა ერთი ტონის ბგერებია, მხოლოდ ობერტონების სხვადასხვა შემადგენლობა აქვთ. სწორედ ეს აძლევს ბგერას სპეციფიკურ ელფერს. შეადარეთ, მაგალითად, ორი მრუდი ნახ. 120 ა და ბ-ზე. ეს კლარნეტისა და როიალის მიერ გამოცემული ერთი და იმავე ტონის ბგერის ჩანაწერია. ჩვენ ვხედავთ, რომ ორივე ბგერა არ წარმოადგენს მარტივ სინუსოიდალურ რხევებს. რხევის ძირითადი სიხშირე ორივე შემთხვევაში ერთნაირია და ეს

ქმხის ერთნაირ ტონს. მაგრამ მრუდების ხაზები სხვადასხვაგვარია. სწორედ ისინი გვიჩვენებენ, რა არის ტემბრი.

ყურის უნარი, გაარჩიოს როიალის „დო“ კლარნეტის იმავე ნოტისაგან, აგრეთვე ბგერის ჰარმონიულ მდგენელებად, ანუ ძირითად ტონად და ობერტონებად დაშლას ემყარება.

კლარნეტი სასულე ინსტრუმენტების დიდ კლასს მიეკუთვნება. როგორ რხევებს ქმნიან ამ შემთხვევებში გარკვეული ტონისა და სხვადასხვა ტემბრის ბგერები? ეს ჰაერის სვეტე-



ნახ. 120.

ბის რხევებია. მუსიკოსი, რომელიც სასულე ინსტრუმენტზე უკრავს, თავისი სუნთქვით მოქმედებს არა როგორც მომღერალი, არამედ როგორც გიტარაზე დამკვრელის ხელი. მუსიკოსი მხოლოდ საყვირის (მილის) შიგნით იწვევს ჰაერის სვეტის რხევას. ხოლო რაც შეეხება ტონსა და ტემბრს, მუსიკოსი მათ ამყარებს ჰაერის სვეტის სიგრძის ვარირებით.

ჰაერის სვეტის სიგრძისაგან დამოკიდებულებით მილში მყოფი ჰაერი, ისევე როგორც სიმი, გარკვეული სიხშირეებით იწყებს რხევას.

მოძრავი ორკესტრი

ვთქვათ, გზის პირას ხის ქვეშ ისვენებთ და ამ დროს გვერდით საბარგო მანქანამ ჩაგიქროლათ, რომელზეც ორკესტრი უკრავს. ან საწინააღმდეგო შემთხვევა — ავტომანქანით ჩაიარეთ იმ სოფლებზე, სადაც გახურებული ზეიმია. ორივე შემთხვევაში მსმენელის ყურთან გაიელვებს რამდენიმე მუსიკალური ფრაზა. ხომ არ იცვლება ბგერა, როდესაც ჩვენ მას მოძრაობისას ვისმენთ?

ჯერ მივაქციოთ ყურადღება შოფრის მუსიკალურ შთაბეჭდილებებს, როდესაც იგი ორკესტრს უახლოვდება. თუ ავტომანქანა ბგერის ტალღის შემხვედრი მიმართულებით მოძრაობს, მაშინ ჰაერის შეკუმშვათა რიცხვი, რომელიც შოფრის ყურამდე დროის ერთეულში აღწევს, რასაკვირველია, მეტი იქნება, ვიდრე იმ შემთხვევაში, როდესაც მანქანა ადგილზე დგას.

ეს იგივეა შოფრის შემხვედრი მიმართულებით ბგერის ტალღა კი არა, მორბენალ სპორტსმენთა რიგი რომ მოძრაობდეს. ანალოგიის სისრულისათვის დავუშვათ, რომ მორბენლები ერთმანეთს შორის ერთნაირ დისტანციას (ეს ტალღის სიგრძეა) იცავენ და უცვლელი სიჩქარით მორბიან.

რასაკვირველია, ავტომანქანას ერთ წამში მაშინ უფრო მეტი მორბენალი ჩაურბენს, როცა იგი შემხვედრი მიმართულებით მოძრაობს. მანქანისა და მორბენლების ფარდობითი სიჩქარე ტოლია $c+u$. რამდენჯერაც ფარდობითი სიჩქარე გაიზარდა, იმდენჯერვე გაიზრდება იმ სპორტსმენთა რიცხვიც, რომლებიც დროის ერთეულში გაირბენენ ავტომანქანის გვერდით.

ამრიგად, მოძრავი დამკვირვებლის მიერ გაზომილი $\nu_{\text{მოძ}}$

სიხშირის ფარდობა უძრავი დამკვირვებლის მიერ გაზომილ ν სიხშირესთან სიჩქარეთა ფარდობის ტოლია:

$$\frac{\nu_{მოძრ}}{\nu}=\frac{c+u}{c},$$

ან სხვა ფორმით

$$\nu_{მოძრ}=\nu\left(1+\frac{u}{c}\right).$$

როგორც მიღებული ფორმულა გვიჩვენებს, ავტომანქანის და ორკესტრის დაახლოებისას ბგერის სიხშირე იზრდება. თუ მანქანა მოძრაობს 70 კმ/სთ სიჩქარით, მაშინ ბგერის სიხშირე 6% გაიზრდება.

როცა მანქანა შორდება ორკესტრს, მაშინ u სიჩქარის ნიშანი შებრუნებულით უნდა შეიცვალოს. ასეთი ფარდობითი მოძრაობისას ბგერის სიხშირე შემცირდება. ამრიგად, როდესაც მანქანა ორკესტრს ჩაუქროლებს, ბგერის სიხშირე $2\times6=12\%$ შეიცვლება. 100 ჰც სიხშირე აღიქმება როგორც 106 ან 94 ჰც სიხშირე, ეს კი სიხშირის დაახლოებით ნახევარი ტონით შეცვლაა. მუსიკის ცოტათი გამოცდილი მსმენელიც კი შეამჩნევს ამ ცვლილებას.

თუ $u=-c$ ე. ი. მსმენელი ბგერის წყაროს ბგერის გავრცელების სიჩქარით შორდება, მაშინ $\nu_{მოძრ}=0$, ან, უბრალოდ რომ ვთქვათ, იგი ბგერას ველარ გაიგონებს. თუ დაშორების სიჩქარე გადააჭარბებს ბგერის გავრცელების სიჩქარეს, მაშინ სმენადობა გაჩნდება და ბგერის სიხშირე დაშორების სიჩქარის ზრდის მიხედვით გაიზრდება. ფორმულაში გაჩნდება ნიშანი მინუსი. მას უშუალო მნიშვნელობა არა აქვს, რადგანაც სიხშირე დადებითი სიდიდეა. მაგრამ მინუსის გაჩენისას თვით მოვლენა შეიძენს გარკვეული სახით შებრუნებულ ხასიათს. ბგერის სიჩქარეზე მეტი სიჩქარით დაშორებისას მსმენელი განუწყვეტლივ ეწევა ბგერას, ჯერ იმას, რომელიც გზად წავიდა, ვთქვათ ერთი წამის წინ, შემდეგ იმას, რომელიც ორი წამის წინ წავიდა, შემდეგ მგზავრის ყურს აღწევს ბგერა, რომელიც სივრცეში სამი, ოთხი და ა. შ. წამის წინ გაემგზავრა. ამრიგად, მგზავრი ყველა ბგერას შებრუნებული რიგით მოისმენს.

დავუბრუნდეთ სიხშირის შეცვლის საერთო ფორმულას. შეიძლება თუ არა იგივე ფორმულა მოძრავი ორკესტრისათვის გამოვიყენოთ? უთუოდ შეიძლება, მხოლოდ საჭიროა იგი სწორად გამოვიყენოთ.

მოძრავი დამკვირვებლის შემთხვევისათვის გამოყვანილ ფორმულაში შედის ორი სიხშირე — ბგერის სიხშირე გარემოში, რომელიც ცხადია, თანხვდება უძრავი დამკვირვებლის მიერ აღქმულ ბგერის სიხშირეს ან უძრავი ინსტრუმენტის მიერ გამოსხივებულ სიხშირეს, და ბგერის $\nu_{\text{მოძრ}}$ სიხშირე, რომელიც ერთ წამში მოძრავი სხეულის მიერ ჰაერისათვის გადაცემული ან ჰაერიდან მოძრავ სხეულამდე მოსული რხევების რიცხვის ტოლია.

ამრიგად, თუ პირველ მაგალითში გამოსხივებული და მიღებული სიხშირეები შესაბამისად არის გარემოს ν სიხშირე და $\nu_{\text{მოძრ}}$ სიხშირე მოძრაობაში, მეორე მაგალითში, პირიქით, მიღებული (აღქმული) სიხშირე არის ν, ხოლო გამოსხივებული $\nu_{\text{მოძრ}}$.

მოძრავი დამკვირვებლისათვის $\nu_{\text{მიღ}}=\nu_{\text{ნამდვ}}\left(1+\frac{u}{c}\right)$.

ბგერის მოძრავი წყაროსათვის $\nu_{\text{მიღ}}=\frac{\nu_{\text{ნამდვ}}}{1+\frac{u}{c}}$.

ამასთან, მხედველობაში უნდა ვიქონიოთ, რომ პირველ შემთხვევაში დადებითი სიჩქარე შეესაბამება დაახლოებას, ხოლო მეორეში — ბგერის წყაროს დაშორებას დამკვირვებლისაგან.

აშკარაა, ორივე ფორმულა იძლევა სიჩქარის მიხედვით სიხშირის გადანაცვლების ცვლილების მსგავს სვლას. თუ, მაგალითად, $\frac{u}{c}=0{,}2$, მაშინ დამკვირვებლის მოძრაობისას წყაროს შემხვედრი მიმართულებით სიხშირე 20% იზრდება, ხოლო წყაროს მოძრაობისას დამკვირვებლის შემხვედრი მიმართულებით — 25%.

ჩვენ აქამდე უსიტყვოდ ვგულისხმობდით, რომ ორკესტრი და მსმენელი იმ ხაზის გასწვრივ მოძრაობენ, რომელიც ბგე-

რის გავრცელების მიმართულებას ემთხვევა. რა შეიცვლება იმ შემთხვევაში, თუ მსმენელი მოძრაობს არა შემხვედრი მიმართულებით, არამედ გვერდზე გაუვლის ორკესტრს? ცხადია, მნიშვნელობა აქვს მხოლოდ ავტომანქანის სიჩქარის მდგენელს ბგერის გავრცელების მიმართულების გასწვრივ. დამკვირვებლის მოძრაობას ბგერის ტალღის ფრონტის გასწვრივ, ანუ ბგერის გავრცელების მიმართულების მართობულად, არავითარი მნიშვნელობა არა აქვს.

იგივე ითქმის ორკესტრის მოძრაობაზე. ამ შემთხვევაში ფორმულების გამოყენებისას ფორმულაში შემავალი მოძრაობის სიჩქარე უნდა ავიღოთ არა აღქმის მომენტში, არამედ ბგერის ტალღის გამოსხივების მომენტში.

თუ დამკვირვებელიც და ბგერის წყაროც ჰაერის მიმართ მოძრაობს, მაშინ ფორმულები ერთიანდება. აღქმული ბგერის სიხშირე ამ შემთხვევაში ტოლია

$$\nu_{\text{მიღ}}=\frac{1+\dfrac{u}{c}}{1-\dfrac{v}{c}}\,\nu_{\text{ნამდვ}},$$

სადაც u დამკვირვებლის სიჩქარეა, ხოლო v ბგერის წყაროს სიჩქარე.

ბგერის სიხშირის ცვლილებას დამკვირვებლის ან ბგერის წყაროს მოძრაობისას დოპლერის ეფექტი ეწოდება.

ბგერის ენერგია

ჰაერის ყველა ნაწილაკი, რომელიც გარს ეკვრის ბგერის გამომცემ სხეულს, რხევით მდგომარეობაში იმყოფება. როგორც V თავში გამოვარკვიეთ, სინუსის კანონით მერხევ მატერიალურ წერტილს აქვს გარკვეული და უცვლელი სრული ენერგია.

როდესაც მერხევი წერტილი წონასწორობის მდებარეობაზე გადის, მისი სიჩქარე მაქსიმალურია, რადგანაც წერტი-

ლის გადანაცვლება ამ მომენტში ნულის ტოლია, ამიტომ მთელი ენერგია კინეტიკურ ენერგიას წარმოადგენს:

$$E = \frac{mv^2_{\text{მაქს}}}{2}.$$

მაშასადამე, როგორც 113-ე გვერდზე გამოვარკვიეთ, სრული ენერგია რხევის სიჩქარის ამპლიტუდური მნიშვნელობის კვადრატის პროპორციულია.

ეს სამართლიანია ჰაერის ნაწილაკებისთვისაც, რომლებიც ბგერის ტალღაში ირხევიან. მაგრამ ჰაერის ნაწილაკი რაღაც გაურკვეველი ცნებაა. ამიტომაც ბგერის ენერგიას მოცულობის ერთეულისათვის ანგარიშობენ. ამ სიდიდეს შეიძლება ბგერის ენერგიის სიმკვრივე ვუწოდოთ.

რადგანაც ერთეული მოცულობის მასა არის სიმკვრივე ν ამიტომ ბგერის ენერგიის სიმკვრივე

$$w = \frac{\rho v^2_{\text{მაქ.}}}{2}.$$

ზემოთ ჩვენ ვილაპარაკეთ კიდევ ერთ მნიშვნელოვან ფიზიკურ სიდიდეზე, რომელიც სინუსის კანონის თანახმად იმავე სიხშირით ირხევა, რა სიხშირითაც სიჩქარე. ეს ბგერის, ანუ ჭარბი წნევაა. რაგანაც აღნიშნული სიდიდეები პროპორციულია, შეიძლება ვთქვათ, რომ ენერგიის სიმკვრივე ბგერის წნევის ამპლიტუდური მნიშვნელობის პროპორციულია.

მოვიყვანეთ აგრეთვე ბგერის რხევისათვის ამპლიტუდის მნიშვნელობა ხმამაღალი ლაპარაკის დროს. სიჩქარის ამპლიტუდა 0,02 სმ/წმ ტოლი იყო. ჰაერის 1 სმ ^{3} დაახლოებით 0,001 გ-ძ იწონის. ამრიგად, ენერგიის სიმკვრივე ტოლია

$$\frac{1}{2} \cdot 10^{-3} \cdot (0{,}02)^2 \cdot \frac{\text{ერგ}}{\text{სმ}^3} = 2 \cdot 10^{-7}\, \frac{\text{ერგ}}{\text{სმ}^3}.$$

ვთქვათ, ირხევა ბგერის წყარო. იგი გამოასხივებს ბგერის ენერგიას გარემომცველ ჰაერში. ენერგია თითქოს „გამოედინება“ მბგერი სხეულისაგან. ბგერის გავრცელების ხაზის მართობად განლაგებულ ყოველ ფართში წამის განმავლობაში გადის ენერგიის გარკვეული რაოდენობა. ამ რაოდენობას ფართში გასული ენერგიის ნაკადი ეწოდება. თუ გარდა ამისა

აღებულია 1 სმ² ტოლი ფართი, მაშინ გასული ენერგიის რაოდენობას ბგერის ტალღის ინტენსივობას უწოდებენ.

ადვილი გასაგებია, რომ ბგერის I ინტენსივობა ენერგიის w სიმკვრივისა და ბგერის c სიჩქარის ნამრავლის ტოლია. წარმოვიდგინოთ 1 სმ სიმაღლის და 1 სმ² ფუძის მქონე პატარა ცილინდრი, რომლის მსახველები ბგერის გავრცელების მიმართულების პარალელურია. ასეთი ცილინდრის შიგნით მოთავსებული ენერგია w სავსებით გამოვა იქიდან $1/c$ დროის შემდეგ. ამრიგად, ფართის ერთეულში დროის ერთეულის განმავლობაში გაივლის $\frac{w}{\frac{1}{c}}$ ანუ wc ენერგია. ენერგია თითქოს თვითონ მოძრაობს ბგერის სიჩქარით.

ხმამაღალი ლაპარაკის დროს ბგერის ინტენსივობა მოსაუბრეთა მახლობლად დაახლოებით ტოლი იქნება (ჩვენ გამოვიყენებთ ზემოთ მიღებულ რიცხვს) $2\cdot10^{-7}\cdot3\cdot10^{4}=$ $=0{,}006\ \frac{\text{ერგი}}{\text{სმ}^2\ \text{წმ}}$.

ბგერის შესუსტება მანძილის მიხედვით

მჟღერი ინსტრუმენტისაგან ბგერის ტალღა, რასაკვირველია, ყველა მიმართულებით ვრცელდება.

წარმოვიდგინოთ ბგერის წყაროსთან სხვადასხვა რადიუსის ორი სფერო. რასაკვირველია, პირველ სფეროში გამავალი ბგერის ენერგია მეორე სფერულ ზედაპირშიც გავა. თუ ბგერის ინტენსივობას I აღვნიშნავთ, მაშინ სფეროში გამავალი ტალღის ენერგია შეიძლება ასე ჩავწეროთ: $I\cdot4\pi r^2$, რადგანაც $4\pi r^2$—r რადიუსის მქონე სფეროს ზედაპირის ფართია. თუ პირველიდან მეორე სფერომდე ენერგია არ დაიკარგა, მაშინ $I_1\cdot4\pi r_1{}^2=I_2\cdot4\pi r_2^2$.

მაშასადამე, ტალღის I_1 და I_2 ინტენსივობა ბგერის წყაროსგან r_1 და r_2 მანძილებზე მანძილების კვადრატების უკუპროპორციულად შეეფარდება ერთმანეთს. რადგანაც ბგერის ინტენსივობა ენერგიის სიმკვრივის პროპორციულია, ამიტომ

ინტენსივობა ისევე როგორც ენერგიის სიმკვრივე, რხევის ამპლიტუდის კვადრატის პროპორციულია. აქედან გამომდინარეობს, რომ ბგერის წყაროდან r_1 და r_2 მანძილებზე ბგერის ტალღის ამპლიტუდები ერთმანეთს მანძილის უკუპროპორციულად ეფარდება. ბგერის ინტენსივობა წყაროდან მანძილის კვადრატის უკუპროპორციულად მცირდება, ხოლო ამპლიტუდა მანძილის პირველი ხარისხის უკუპროპორციულია. სინამდვილეში ბგერა რამდენადმე უფრო სწრაფად კლებულობს, რადგანაც ენერგიის ნაწილი გზაზე შთაინთქმება. ეს იმის გამო, რომ გარემოს ნაწილაკების რხევისას ენერგიის გარკვეული ნაწილი ბლანტი ხახუნის გადალახვაზე იხარჯება. მაგრამ ეს დანაკარგი შედარებით დიდი არ არის და მთავარი მიზეზი იმისა, რომ შორ მანძილზე უფრო ცუდად გვესმის, ვიდრე ახლოს, შებრუნებული კვადრატების კანონია.

ხმამაღლა და ხმადაბლა

ადამიანის გრძნობის ორგანოები მრავალმხრივ უფრო სრულყოფილია, ვიდრე საუკეთესო ხელსაწყოები. იგივე ითქმის სმენაზეც. ჩვენ გვაქვს უნარი ბგერის სახით შევიგრძნოთ ტალღები, რომელთა ინტენსივობა 10^{-9} ერგი/სმ^2·წმ-დან 10^4 ერგ/სმ^2. წმ-დეა. ამრიგად, უძლიერესი ბგერა უსუსტესისაგან ათ ტრილიონჯერ განსხვავდება.

რას წარმოადგენს უსუსტესი ბგერა, რომლის შეგრძნებაც ადამიანს შეუძლია? ოდნავ გასაგონი ფაჩუნი ქმნის დაფის აპკზე წნევას, რომელიც $2\cdot10^{-4}$ დნ/სმ^2, ანუ დაახლოებით გრამის ორი მეათმილიონედი ნაწილის ტოლია. საუკეთესო მიკროსასწორებსაც კი არ გააჩნია ისეთი მგრძნობიარობა, როგორიც ადამიანის ყურს.

თუ ბგერას გადააქვს 10^4 ერგ/სმ^2 წმ-ზე მეტი ენერგია, მაშინ ადამიანს უკვე აღარ ესმის იგი, მაგრამ ტკივილის გრძნობას განიცდის. წნევა დაფის აპკზე ამ დროს 0,2 გ-ძ/სმ^2 აღწევს. ყური მტკივნეულად გრძნობს სწორედ წნევის ტალღას, ე. ი. შეკუმშვისა და გაიშვიათების სწრაფად მონაცვლე ბიძგებს. ხოლო თუ აღნიშნული სიდიდით (0,2 გ-ძ) იზრ-

დება ჰაერის მუდმივი წნევა, აძას ყური, რასაკვირველია, „ვერ შეამჩნევს“. ატმოსფეროს ნორმალური წნევა, რომელიც და ახლოებით 1 კგ-ძ/სმ² ტოლია, 0,2 გ-ძ-ზე მეტით გაიზრდებ მეორე სართულიდან ქუჩაში რომ ჩახვიდეთ.

იმ ტალღის ენერგია, რომელსაც ძლიერი ბგერა მიაქვს უზარმაზარ რიცხვჯერ მეტია იმ ტალღის ენერგიაზე, რომელ საც ჩვენამდე ჩურჩული და ფაჩუნი მოაქვს. ამიტომაც ბგერის ხმამაღლობის შეფასება ენერგიის სიდიდით პრაქტი კულად ძალიან მოუხერხებელია. წარმოიდგინე, რომ თა ნამშრომელმა, რომელიც ქუჩის ხმაურთან ბრძოლის საშუ ალებებს ეძებს უნდა წაიკითხოს მოხსენება ქალაქის საბჭო სესიაზე და აღნიშნოს, რამდენად შემცირდება ხმაური, თუ ტრამვაი ტროლეიბუსით ან ავტობუსით შეიცვლება, თუ შოფრებს აეკრძალებათ ქუჩაში საყვირების მიცემა და ა. შ სურათი თვალსაჩინო რომ იყოს, საჭიროა პლაკატების გამო ყენება. როგორც სხვადასხვაგვარი დიაგრამების აგებისას პლაკატზე შეიძლება დაიხატოს სვეტები, რომელთა სიმაღ ლეც ხმაურის ხარისხს გამოხატავს. მაგრამ ხმამაღალია თუ არა ბგერა, ეს რომ ენერგიის სიდიდით განისაზღვროს, გადა ულახავ წინააღმდეგობას წავაწყდებით: სიწყნარე და ხმაურ ერთმანეთისგან იმდენად განსხვავდება, რომ მათი გამოსახვ ერთ დიაგრამაზე საერთო მასშტაბით გაცილებით უფრო ძნელია, ვიდრე ერთ პლაკატზე სპილოსა და ბუზის ნატურა ლური სიდიდით დახატვა.

ასეთ შემთხვევაში ფიზიკაში მიმართავენ ეგრეთ წოდებულ ლოგარითმულ მასშტაბს.

თუ რომელიმე სიდიდე იზრდება 10, 100, 1000-ჯერ და ა. შ., მაშინ მისი ლოგარითმი იზრდება 1-ით, 2-ით, 3-ით და ა. შ. მაშასადამე, თუ ვისარგებლებთ არა ბგერის ტალღის ენერგიით, არამედ ამ სიდიდის ლოგარითმით, ყოველთვის შეიძლება „დავტიოთ“ ერთ პლაკატზე საავიაციო მოტორის ხმაური და კოღოს ბზუილი.

ბგერის ხმამაღლობის სკალას შემდეგნაირად ქმნიან. პი რობით ირჩევენ ხმამაღლობის გარკვეულ ნულოვან დონეს რომელსაც 10^{-9} ერგ/სმ². წმ ტოლად ღებულობენ. ასეთ ძალის ბგერა არ ესმის საუკეთესო სმენის მქონე ადამიანსაც

კი. შემდეგ საზღვრავენ, ჩვენთვის საინტერესო ბგერის E ენერგია რამდენჯერ არის მეტი ამ საწყისი E_0 დონის სიდიდეზე, ანუ პოულობენ $\frac{E}{E_0}$ ფარდობას.

სწორედ ამ ფარდობის ათობითი ლოგარითმია მიღებული ბგერის ხმამაღლობის ზომად. ხმამაღლობის ერთეულს ბელი ეწოდება; მაგრამ ჩვეულებრივ იყენებენ ბელის მეათედ ნაწილს, რომელსაც დეციბელი (დბ) ეწოდება. ხმამაღლობა დეციბელებში $= 10 \lg \frac{E}{E_0}$.

დეციბელის რაობაზე შეიძლება ვიმსჯელოთ ქვემოთ მოყვანილი ტაბულის მიხედვით. ტაბულაში ნაჩვენებია, სხვადასხვა ბგერების ხმამაღლობის სიდიდეები ბგერის წყაროდან რამდენიმე მეტრის მანძილზე:

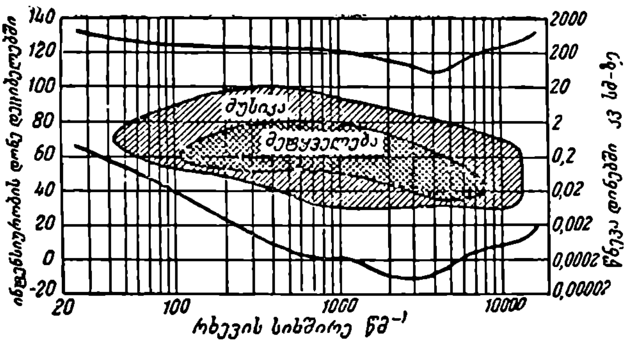
ფოთლების შრიალი	10	დეციბელი
წყნარი ქუჩა	30	„
მიმავალი ავტომანქანა . . .	50	„
ხმამაღალი ლაპარაკი . . .	70	„
ხმაურიანი ქუჩა	90	„
თვითმფრინავი	100	„

ლოგარითმების ცხრილი საშუალებას მოგვცემს ნათლად წარმოვიდგინოთ დეციბელი. მაგალითად ბგერის ძალის 1 დბ-ით გაზრდა შეესაბამება ბგერის ინტენსივობის $10^{0,1} = 1{,}26$-ჯერ, ე. ი. 26%-ით გადიდებას. ბგერის ინტენსივობის ორჯერ გადიდება შეესაბამება ხმამაღლობის 3 დბ-ით შეცვლას, ხუთჯერ გადიდება — 7 დბ-ით შეცვლას, ათჯერ — 10 დბ-ით შეცვლას.

თუ ბგერის წყაროდან მანძილი ორჯერ გადიდდება, მაშინ ბგერის ინტენსივობა ოთხჯერ შემცირდება, ბგერის ძალა კი — 6 დბ-ით. ვთქვათ, მეღერი სიმიდან ერთი მეტრის მანძილზე ვიმყოფებოდით და დავშორდით მას 10 მ-ით. ტალღის ინტენსივობა, რომელიც ყურს აღწევს, 100-ჯერ შემცირდება, ხოლო ბგერის ძალა —20 დბ-ით.

ადრე ჩვენ ვილაპარაკეთ სმენადი სიხშირეების დიაპაზონის შემოსაზღვრულობაზე. ამას დავუმატოთ ისიც, თუ რამ-

დენად მგრძნობიარეა ყური წყნარი და ხმამაღალი ბგერის მიმართ, და მაშინ შევძლებთ ნორმალური ადამიანისათვის ტიპიური სმენადობის დიაგრამის შედგენას (ნახ. 121). ამ



ნახ. 121

გრაფიკის ჰორიზონტალური ღერძის გასწვრივ გადაზომილია ბგერის სიხშირე, ვერტიკალური ღერძის გასწვრივ — ბგერის ენერგია. ნახატზე ნაჩვენებია სმენადობის ზღვარი და ტკივილის შეგრძნების ზღვარი. სმენის არე მდებარეობს სმენადობის არის შიგნით.

ბგერები, რომლებიც არ გვესმის

ბგერის 20.000 ჰც სიხშირე წარმოადგენს ზღვარს, რომლის ზევითაც ადამიანის ყური ველარ შეიგრძნობს გარემოს მექანიკურ რხევებს. სხვადასხვა ხერხით შეიძლება უფრო მაღალი სიხშირეების წარმოქმნა, ადამიანი მათ ვერ გაიგონებს, ხელსაწყოები კი შეძლებენ მათ ჩაწერას. მაგრამ მარტო ხელსაწყოებს როდი შეუძლია ასეთი რხევების ფიქსაცია. ბევრ ცხოველს — ღამურას, ფუტკარს, ვეშაპსა და დელფინს (როგორც ჩანს, საქმე ცოცხალი არსების ზომაში არ არის) — შე-

უძლია შეიგრძნოს თვით 100.000 ჰც-მდე სიხშირის მექანიკური რხევები.

ამჟამად ხერხდება მილიარდ ჰერცამდე სიხშირის რხევების მიღება. ასეთ რხევებს, თუმცა ისინი არ ისმის, ულტრაბგერით რხევებს უწოდებენ, რომ ბგერასთან მათ ნათესაობას გაუსვან ხაზი.

უდიდესი სიხშირის ულტრაბგერებს კვარცის ფირფიტების დახმარებით ღებულობენ. ასეთ ფირფიტებს კვარცის მონოკრისტალებიდან ჭრიან. მათ შემდეგი საინტერესო თვისება აქვთ: თუ ფირფიტას ელექტრულ ძაბვას მოვდებთ, იგი შეიკუმშება ან გაიჭიმება. ხოლო თუ ცვლად ელექტრულ ძაბვას მოვდებთ, მაშინ მიმდევრობით შეკუმშვას და გაჭიმვას ე. ი. რხევას დაიწყებს.

ასეთი წესით ხერხდება ულტრაბგერის მძლავრი ნაკადების მიღება, რომელთა ინტენსივობა რამდენიმე ათასი ჯოულია 1 სმ^2-ზე წამში. საინტერესოა ამ მნიშვნელობას შევადაროთ სმენადი ბგერის ინტენსივობა. როცა ქვემეხი ისვრის, უშუალოდ მის მახლობლად ბგერის ინტენსივობა აღწევს მხოლოდ 0,005 ჯოულს 1 სმ^2-ზე წამში.

ულტრაბგერის ენერგია იმდენად დიდია, რომ იგი შეხებით შეიგრძნობა. თუ ხელს ჩაყოფთ სითხეში, რომელიც ულტრაბგერით რხევებს ასრულებს, მწვავე ტკივილს იგრძნობთ.

ულტრაბგერას შეუძლია ნივთიერების საინტერესო გარდაქმნა, ამიტომ მას ფართოდ იყენებენ სრულიად სხვადასხვა დარგებში. ერთ-ერთი ასეთი გარდაქმნათაგანია — ნივთიერების დაწვრილმანება. თუ ტყვიის ან სპილენძის ნაჭერს სითხეში ჩავდებთ და ზედ ულტრაბგერით ვიმოქმედებთ, ლითონი დაქუცმაცდება და უწმინდეს ტივტივარს (ან როგორც ამბობენ, სუსპენზიას) წარმოქმნის. ლითონი იმ შემთხვევაში დაქუცმაცდება, თუ ნაწილაკის ზომა ტალღის სიგრძეზე მეტია.

როცა ნივთიერების ნაწილაკები მცირეა, მაშინ ულტრაბგერა საწინააღმდეგოდ იმოქმედებს. თუ ულტრაბგერით ვიმოქმედებთ ბოლით სავსე შენობაში, შეიძლება ძალიან სწრაფად გავწმინდოთ ჰაერი. თურმე ულტრაბგერის გავლენით

ბოლის ნაწილაკები ერთმანეთს ეკვრის (ამ მოვლენას კოაგულაცია ეწოდება), ათეულ და ასეულჯერ მძიმდება და იატაკზე ილექება.

განსაკუთრებით საინტერესოა ულტრაბგერის მოქმედება ბიოლოგიურ ობიექტებზე. მრავალი, განსაკუთრებით კი ძაფისებური ფორმის უჯრედი, ულტრაბგერის გავლენით იშლება. ბაქტერიები იღუპება ან არსებით ცვლილებებს განიცდის. ულტრაბგერით შეიძლება რძის გასტერილება.

ულტრაბგერის გამოყენების საინტერესო დარგია ბზარებისა და სხვა დეფექტების ძიება უზარმაზარი სისქის (თვით ათეულ მეტრამდე) ლითონის სხმულებში. თუ ულტრაბგერის სხივის გზაზე ბზარი ან ნიჟარა აღმოჩნდება, სხივები შიგ არ ატანს და საწინააღმდეგო მიმართულებით აირეკლება. ამ არეკვლას ხელსაწყოთი იჭერენ და ულტრაბგერის მიერ დეფექტამდე და უკან მოგზაურობაზე დახარჯული დროის მიხედვით საზღვრავენ დეფექტის განლაგების სიღრმეს.

საინტერესოდ იყენებენ ულტრაბგერას ღამურები. იმისათვის, რომ ღამურამ შეძლოს არსებობა სრულ სიბნელეში, ბუნებამ იგი განსაკუთრებით სრულყოფილი ექოლოკატორით აღჭურვა, რომელიც ულტრაბგერის სიხშირეებზე მუშაობს. ფრენის დროს ღამურა გამოსცემს სიგნალებს სიხშირით 25.000—50.000 ციკლი წამში, რომლებიც ადამიანის ყურს არ ესმის. თვითეული სიგნალი დაახლოებით წამის 10—15 მეათასედ ნაწილს გრძელდება. ღამურას სხეულის მიმართ გარკვეული მიმართულებით გაგზავნილი ულტრაბგერის სიგნალი ხვდება დაბრკოლებას, ირეკლება მისგან და უკან ბრუნდება. ღამურას სმენის ორგანოებიც არაჩვეულებრივად აქვს განვითარებული — მას ძალუძს გაიგონოს არეკლილი სიგნალი, გინდაც ის საწყის სიგნალზე ორიათასჯერ უფრო სუსტი იყოს. უფრო მეტიც, ღამურას შეუძლია გაარჩიოს თავისი არეკლილი სიგნალი გარეშე ხმაურისაგან, გინდაც ეს ხმაური სიძლიერით რამდენიმე ათასჯერ აღემატებოდეს მის მიერ გაგზავნილი სიგნალის ექოს. სიგნალის მიცემის მომენტიდან მის დაბრუნებამდე გასული დროის მიხედვით ღამურა საზღვრავს (რასაკვირველია, ინსტინქტურად), რა მანძილზეა დაბრკოლება.

ვთქვათ, მეორე სართულზე ოთახის სიღრმეში ხართ და ლაპარაკობთ. ფანჯარა ღიაა. ფანჯრის გარეთ თქვენი ამხანაგია. გაიგონებს თუ არა იგი თქვენს ხმას? რასაკვირველია, გაიგონებს, თუ საკმარისად ხმამაღლა ილაპარაკებთ, მაგრამ მაინც გაცილებით უარესად, ვიდრე იმ შემთხვევაში, კიბეზე რომ ამოვიდეს და ფანჯრის პირდაპირ გაჩერდეს. ბგერის ტალღები ფანჯრიდან გასვლისას თითქოს ყველა მიმართულებით მიედინება, მაგრამ როგორღაც უხალისოდ. ეს გვიჩვენებს, რომ ბგერის ტალღები ყველაზე უკეთ წინ, სწორი ხაზების გასწვრივ ვრცელდება, მაგრამ რამდენადმე განზედაც იხრება. ეხება თუ არა ეს ნებისმიერი ბგერის ტალღებს? თურმე, არა.

არსებით როლს ასრულებს ტალღის სიგრძესა და ნახვრეტის ზომებს შორის თანაფარდობა. თუ ტალღის სიგრძე ნახვრეტთან შედარებით დიდია, მაშინ ნახვრეტიდან გამოსვლისას ტალღები ისე „იღვრება“ ყველა მიმართულებით, თითქოს თვით ნახვრეტი იყოს ბგერის წყარო. პირიქით, თუ ტალღის სიგრძე ბევრად ნაკლებია ნახვრეტზე, ბგერა სხივების გასწვრივ ვრცელდება და იქ, სადაც ბგერის წყაროდან დამკვირვებლამდე გავლებული სწორი ხაზი დაბრკოლებას (ჩვენს შემთხვევაში — კედელს) შეხვდება, წარმოიშობა „ჩრდილი“: ბგერა თითქმის არ ისმის.

ჩვენს მაგალითში ადამიანის ხმის საშუალო სიხშირეს — 1.000 ჰც-ს — შეესაბამება ტალღის სიგრძე 30 სმ. ამიტომაც ასეთი ტალღები ფანჯრის მეტრიან ღიობში წინ უფრო ხალისით ვრცელდება, მაგრამ გვერდებზეც შესამჩნევად იხრება.

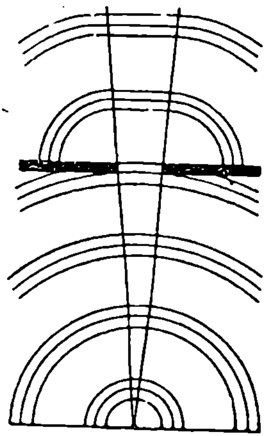
თუ როგორ უვლის გარს ბგერის ტალღები დაბრკოლებას, ამის ნახატზე გამოსახვა ძალიან ძნელია.

გაცილებით ადვილია იმის ჩვენება, თუ როგორ იქცევიან მსგავს სიტუაციაში ზედაპირული წყლის ტალღები. ამ ტალღებზე ჩვენ ცოტა მოგვიანებით ვილაპარაკებთ. მათი თვისებები რამდენადმე თავისებურია. მაგრამ რაც შეეხება ტალღების მიერ დაბრკოლებათა გარშემოვლას, ამ შემთხვევაში, რო-

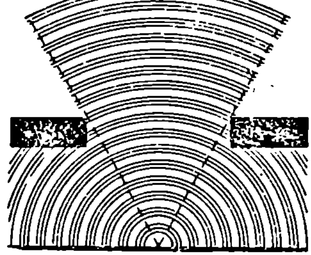
გორც წყლის, ისე ბგერის ჰაერის ტალღები ერთნაირად იქცევიან.

ნახ. 122 და 123 გვიჩვენებს სხვადასხვა სიგრძის წყლის ტალღების გავლას ერთსა და იმავე ნახვრეტში. 122-ე ნახატზე ტალღის სიგრძე გაცილებით მეტია ნახვრეტის ზომაზე. ამ შემთხვევაში ტალღა თითქმის მთლიანად ავსებს ეკრანის უკანა არეს. 123-ე ნახატზე გამოსახულია ძალიან მცირე სიგრძის ტალღა. ახლა ტალღა სხივების გასწვრივ ვრცელდება. გეომეტრიული ჩრდილის არეში ტალღა თითქმის არ შედის.

ამრიგად, ირკვევა, რომ როდესაც ბგერის ტალღების სიგრძე მნიშვნელოვნად ნაკლებია იმ საგნების ზომებზე, რომლებსაც ის გზად ხვდება, ბგერა ისე იქცევა,



ნახ. 122.



ნახ. 123.

თითქოს ის ჰაერის რხევები კი არა, ჰაერში მოძრავი ნაწილაკების ნაკადი იყოს. ძირითადი განსხვავება ჩვეულებრივი ნაწილაკებისაგან ის არის, რომ ჩვეულებრივ ნაწილაკებს შეუძლიათ ნებისმიერი სიჩქარით მოძრაობა, ბგერა კი ყოველთვის ერთნაირი სიჩქარით ვრცელდება.

ბგერის ტალღურ ბუნებას ის გარემოება ამჟღავნებს, რომ იგი ყოველთვის რამდენადმე მაინც იხრება სწორი ხაზიდან. როგორც უკვე ვთქვით, ეს გადახრა მით უფრო ნაკლებია, რაც ნაკლებია ტალღის სიგრძე, მაგრამ იგი ყოველთვის არსებობს და პრინციპში შეიძლება გაიზომოს კიდეც. ამ გადახრას

ბგერის დიფრაქცია ეწოდება. დიფრაქციის საშუალებით შეიძლებოდა დაგვემტკიცებინა, რომ ბგერა ტალღური მოძრაობაა, მაგრამ ეს უკვე უშუალოდ ვიცით (ბგერის მიღების ხერხიდან). დიფრაქციის შესწავლით შეიძლებოდა ბგერის ტალღების სიგრძის გაზომვა, მაგრამ ჩვენთვის ესეც ცნობილია ბგერის წყაროს რხევის სიხშირიდან.

ბგერის არეკვლა

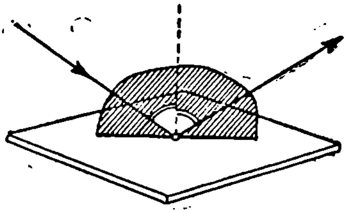
ამ პარაგრაფში ჩვენ ვიგულისხმებთ, რომ ბგერის ტალღის სიგრძე საკმაოდ მცირეა და, მაშასადამე, ბგერა სხივების გასწვრივ ვრცელდება. რა ხდება, როდესაც ასეთი ბგერის სხივი ჰაერიდან მყარ ზედაპირს ეცემა? ცხადია, ამ დროს ბგერა ირეკლება. მაგრამ საით?

ბგერის გავრცელების ანალოგია მატერიალური ნაწილაკების მოძრაობასთან გვიჩვენებს, რომ ასეთი არეკვლა ისევე უნდა წარიმართოს, როგორც ბურთის არეკვლა კედლიდან, მხოლოდ იმ განსხვავებით, რომ ხახუნის პროცესების შედეგად დაჯახების დროს ბურთის სიჩქარე მცირდება, მაშინ როცა ბგერის გავრცელების სიჩქარე, რომელიც მხოლოდ ჰაერის გარემოს თვისებებზეა დამოკიდებული, ცხადია, არ იცვლება. ხახუნი აქ გამოიხატება არა ბგერის სიჩქარის შეცვლით, არამედ არეკვლის დროს ბგერის ტალღების ენერგიის ნაწილის სითბოში გადასვლით.

რამდენადაც ბგერის არეკვლა პრინციპულად არ განსხვავდება დრეკადი დაჯახებისაგან, ბგერის არეკვლის კანონი შემდეგნაირად შეიძლება ჩამოვაყალიბოთ: ბგერის სხივის დაცემის კუთხე, ანუ სხივისა და ზედაპირის იმ უბნის ნორმალის (პერპენდიკულარის) მიერ შექმნილი კუთხე, რომელსაც ის ხვდება, არეკვლის კუთხის ტოლია. ამასთან, არეკლილი სხივი დაცემულ სხივსა და ზედაპირისადმი ნორმალზე გამავალ სიბრტყეში მდებარეობს. ამ სიბრტყეს სხივის დაცემის სიბრტყე ეწოდება.

ამრიგად, თუ გსურთ გაიგოთ, რა მიმართულებით აირეკლება სხივი, შემდეგნაირად უნდა მოიქცეთ. სხივის დაცემის

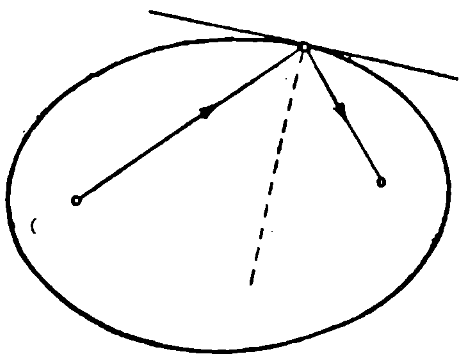
ადგილზე გაავლეთ ნორმალი, გაზომეთ დაცემის კუთხე და ააგეთ დაცემის სიბრტყე. შემდეგ ამ სიბრტყეში გადაზომეთ ნორმალის მეორე მხარეს დაცემის კუთხის ტოლი კუთხე; მიღებული სწორი ხაზი იქნება არეკლილი სხივი (ნახ. 124).



ნახ. 124.

ახლა ერთი საინტერესო ამოცანა ამოვხსნათ.

როგორც ვიცით, ბგერა წყაროდან ყველა მიმართულებით ვრცელდება და დაშორებულ წერტილში ბგერის ენერგიის მხოლოდ მცირე ნაწილი აღწევს. როგორი უნდა იყოს ამრეკლი ზედაპირი იმისათვის, რომ წყაროს ბგერა კვლავ ერთ წერტილში შეკრიბოს? ამრეკლი ზედაპირის ფორმა ისეთი უნდა იყოს, რომ მასზე ერთი წერტილიდან (ბგერის წყაროდან) სხვადასხვა კუთხეებით დაცემული სხივები კვლავ ერთ წერტილში ირეკლებოდნენ. რას წარმოადგენს ასეთი ზედაპირი?



ნახ. 125.

ჩვენ უკვე ვიცით, რა არის ელიფსი. 164-ე გვერდზე ვილაპარაკეთ ამ შესანიშნავი მრუდის შესახებ და აღვნიშნეთ მისი განსაკუთრებული თვისება: ელიფსის ერთი ფოკუსიდან

მრუდის რომელიმე წერტილამდე მანძილი პლუს მეორე ფოკუსიდან იმავე წერტილამდე მანძილი ელიფსის ყველა წერტილისათვის ერთი და იგივეა. წარმოიდგინეთ, რომ ელიფსი მთავარი დიამეტრის ირგვლივ ბრუნავს. მბრუნავი მრუდი შემოწერს ელიფსოიდურ ზედაპირს, ან, უბრალოდ, ელიფსოიდს. ელიფსოიდის ფორმა კვერცხს მოგვაგონებს.

ელიფსს შემდეგი გეომეტრიული თავისებურება აქვს (ნახ. 125). თუ ავაგებთ მის ერთ-ერთ წერტილზე დაყრდნობილ კუთხეს, რომლის გვერდები ელიფსის ფოკუსებზე გაივლის, მაშინ ამ კუთხის ბისექტრისა ელიფსის ნორმალი იქნება (ე. ი. ელიფსის ამ წერტილში მხებისადმი პერპენდიკულარული იქნება). მაშასადამე. თუ ბგერის სხივი ელიფსოიდის ერთი ფოკუსიდან გამოვა, მაშინ ზედაპირიდან არეკვლის შემდეგ, იგი მეორე ფოკუსში მივა. ასე მოიქცევა ერთი ფოკუსიდან გამოსული ყველა სხივი და მთელი ბგერის ნაკადი, რომელიც ერთი ფოკუსიდან გამოვიდა, მეორეში მოიყრის თავს.

ამ ტიპის მრუდი ზედაპირების ასეთი თვისება ჯერ კიდევ ძველად იყო ცნობილი. შუა საუკუნეებში, ინკვიზიციის ეპოქაში, როდესაც თვითეული ადამიანის ზრახვებზე კონტროლი სახელმწიფოებრივი მოღვაწეობის ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს მხარედ ითვლებოდა, საუბრის ჩუმად მოსასმენად თაღოვან ზედაპირს იყენებდნენ. ორი ადამიანი, რომელიც ხმადაბლა უზიარებდა ერთმანეთს თავის აზრს, ვერც კი იფიქრებდა, რომ თაღოვანი ჭერის გამო სამიკიტნოს მეორე კუთხეში მთვლემარე ბერს ისევე კარგად ესმოდა მათი თვითოეული სიტყვა, როგორც თვითონ მოსაუბრეებს.

ელიფსოიდური ზედაპირის აგება ძნელია. მაგრამ სფერული ზედაპირის მცირე უბნები ფორმით დიდად არ განსხვავდება ელიფსოიდის უბნებისგან.

თუ ასეთი სფერული „სარკის“ წინ მბგერ სხეულს დავდგამთ, მისგან გამომავალი ბგერის სხივები არეკვლის სხვა არეში კვლავ შეიკრიბება, თუმცა არა ერთ წერტილში, როგორც ნამდვილ ელიფსოიდში, არამედ სივრცის მცირე არეში.

ასეთი ცდის ჩატარება ჩვეულებრივი მათლაფითაც კი შეიძლება. თუ მათლაფის მახლობლად მოვათავსებთ საათს,

რომლის წიკწიკი ერთი მეტრის მანძილზე ყურს პრაქტიკულად უკვე აღარ ესმის, მაშინ მათლაფისგან საკმაოდ შორს შეიძლება ვიპოვოთ წერტილი, რომელშიაც საათის წიკწიკი ისე ხმამაღლა ისმის, გეგონებათ საათი ყურთან გქონდეთ მიტანილი. იგივე მოვლენას იყენებენ თეატრში სუფლიორის ჯიხურის მოწყობისას. სუფლიორის მდგომარეობა და ჯიხურის ფორმა ყველაზე უკეთ შეეფერება ბგერის არეკვლას სცენის მიმართულებით.

ბგერის არეკვლა შენობის კედლებიდან ძალიან აინტერესებთ თეატრების, საკონცერტო შენობებისა და ყრილობათა დარბაზების მშენებლებს. სამშენებლო ტექნიკის ამ დარგს, რომელიც დახურულ შენობებში საუკეთესო სმენადობის პრობლემას სწავლობს, არქიტექტურული აკუსტიკა ეწოდება.

ტალღები, რომლებიც ზედაპირზე ვრცელდება

წყალქვეშა ფლოტის მეზღვაურებმა არ იციან, რა არის ქარიშხალი ზღვაზე. უძლიერესი შტორმების დროს ზღვის დონის ქვემოთ რამდენიმე მეტრზე შტილი სუფევს. ზღვის ტალღები ერთ-ერთი მაგალითია ტალღური მოძრაობისა, რომელიც სხეულის მხოლოდ ზედაპირს მოიცავს.

ხანდახან შეიძლება გვეჩვენოს, რომ ზღვის ტალღები წყლის მასების ნაკადია. მაგრამ ეს ასე არ არის. თუკი დავაკვირდებით, როგორ ქანაობს ტალღებზე ნავი, როცა მენიჩბეები ისვენებენ, ადვილად დავრწმუნდებით წყლის ნაწილაკების რხევით მოძრაობაში. ნავი ირწევა ზევით, ქვევით, ცოტა წინ, ცოტა უკან, მაგრამ თითქმის ისევ ადგილზე დგას. უფრო ზუსტი დაკვირვება გვიჩვენებს, რომ წყლის ნაწილაკები წრეხაზებზე მოძრაობენ. წყლის ყოველი ნაწილაკი წრეხაზთან მიახლოებულ ტრაექტორიას აღწერს. წრეხაზების სიბრტყე ტალღების გავრცელების მიმართულებას ემთხვევა, ე. ი. ტალღის ფრონტის გარდიგარდმოა განლაგებული.

ზღვის ღელვის სურათი სხვადასხვაგვარი შეიძლება იყოს — წყლის ზედაპირის წვრილად დანაოჭება, მსხვილი ტალღები,

ერთმანეთის მიმდევრობით ხშირ-ხშირად ან იშვიათად მომავალი ტალღები. ფიზიკოსის ენით რომ ვთქვათ, ტალღები შეიძლება სხვადასხვა ამპლიტუდისა და სიგრძისა იყოს.

როგორც ზემოთ იყო ნათქვამი, სიღრმის ზრდასთან ერთად ღელვა სწრაფად კლებულობს. ზედაპირს ქვემოთ მყოფი წყლის ნაწილაკები სიღრმის ზრდასთან ერთად სულ უფრ ნაკლები ამპლიტუდით ირხევიან. ტალღის სიგრძის ნახევრის სიღრმეზე რხევის ამპლიტუდა 20-ჯერ ეცემა, ხოლო ტალღის სიგრძის სიღრმეზე თითქმის ალარავითარი მოძრაობა არ რჩება.

აქამდე ჩვენ ვლაპარაკობდით ტალღებზე, რომელთა გავრცელების სიჩქარე მხოლოდ გარემოს თვისებებზე იყო დამოკიდებული. ზედაპირული ტალღების შემთხვევაში სხვა მდგომარეობაა: სხვადასხვა სიხშირის რხევები სხვადასხვა სიჩქარით ვრცელდება. გავრცელების სიჩქარე და რხევის პერიოდი მარტივი თანაფარდობით არის დაკავშირებული: $c=\frac{gT}{2\pi}$, სადაც g სიმძიმის ძალის აჩქარებაა; სავსებით ბუნებრივია ამ ფორმულაში სიმძიმის ძალის g აჩქარების გამოჩენა, წყლის ზედაპირს ხომ სწორედ სიმძიმის ძალა აძლევს ბრტყელ ფორმას. ამ ფორმულის თანახმად 1 ჰც სიხშირის დროს ტალღები დაახლოებით 1,5 მ/წმ სიჩქარით რბიან. ფორმულა სამართლიანია ტალღებისათვის ღია ზღვაში; ნაპირის მახლობლად და საერთოდ მცირე სიღრმეში ეს მარტივი თანაფარდობა რთულდება.

რადგანაც $\lambda=cT$, ამიტომ $c=\sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$. მაშასადამე, ზღვის რომელიმე უბანზე ძლიერი ღელვის წარმოშობისას დაშორებულ ადგილებს ჯერ ყველაზე გრძელი ტალღები აღწევენ, ვინაიდან მათი გავრცელების სიჩქარე უდიდესია.

როგორ გადასცემენ ბგერას მყარი სხეულები

ბგერის გადაცემა თხევადი სხეულებისა და გაზების საშუალებით მნიშვნელოვნად განსხვავდება მყარი სხეულების საშუალებით ბგერების გადაცემისაგან. განსხვავება იმით გამო-

იხატება, რომ მყარ სხეულებში გასწვრივ ტალღებთან ერთად შეიძლება განივი ტალღებიც წარმოიშვას.

ეს ტერმინი თვითონ ლაპარაკობს თავის თავზე — განივ ტალღას შემდეგი თავისებურება აქვს: ტალღურ პროცესში მონაწილე ნაწილაკები ირხევიან არა ტალღის გავრცელების, არამედ განივი მიმართულებით — გავრცელების მიმართულების მართობულად.

ბგერის ტალღა გაზებსა და სითხეებში ერთმანეთის მონაცვლე შეკუმშვათა და გაიშვიათებათა ტალღაა. ასეთი ტალღა შეიძლება მხოლოდ გასწვრივი იყოს — ნაწილაკების განივ რხევებს არ ძალუძთ მოცულობის ადგილობრივი ცვლილებების გამოწვევა, ე. ი. არ შეუძლიათ შეკუმშვა და გაიშვიათება გამოიწვიონ. შეუძლებელია განივი ტალღა სითხესა და გაზში არსებობდეს, რადგანაც ეს გარემოებები წინააღმდეგობას უწევენ შეკუმშვას და გაჭიმვას, მაგრამ ძვრას კი არა. მყარი სხეული წინააღმდეგობას უწევს არა მარტო თავის მოცულობის ცვლილებას, არამედ ფორმის ცვლილებასაც, ამიტომ გასწვრივ ტალღებთან ერთად მყარ სხეულში განივი ტალღებიც შეიძლება წარმოიშვას.

განივი ტალღის გავრცელების დროს მყარ სხეულში წარმოიშობა ძვრის ტალღა — სხეულის ნაწილაკები ტალღის გავლენით მონაცვლეობით იძვრის მისი გავრცელების მიმართულებისგან სხვადასხვა მხარეს. ხოლო გასწვრივ ტალღებს მყარ გარემოში თან ახლავს შეკუმშვა და გაიშვიათება, ისევე როგორც ტალღებს სითხეებსა და გაზებში.

გასწვრივი და განივი ტალღები ბგერას ერთნაირად კარგად გადასცემენ, მაგრამ გადაცემის სიჩქარე სხვადასხვაგვარი აქვთ. გასწვრივი ტალღები ყოველთვის განივზე სწრაფად ვრცელდება.

აი დამახასიათებელი რიცხვები. ფოლადში განივი ტალღების სიჩქარე დაახლოებით 3000 მ/წმ-ა, ხოლო გასწვრივის — 6000 მ/წმ. გავრცელების ნაკლები სიჩქარე აქვს ბგერას რბილ ტყვიაში — 700 მ/წმ განივი ტალღებისათვის და 2200 მ/წმ გასწვრივისათვის.

განსაკუთრებით დიდია ფარდობა გასწვრივი და განივი ტალღების სიჩქარეებს შორის რეზინში. რეზინი ძალიან სუსტ

წინაღმდეგობას უწევს ფორმის შეცვლას, მაგრამ ძნელად იცვლის თავის მოცულობას. განივი ტალღები რეზინში ვრცელდება სულ 30 მ/წმ სიჩქარით — 10-ჯერ უფრო ნელა, ვიდრე ბგერა ჰაერში.

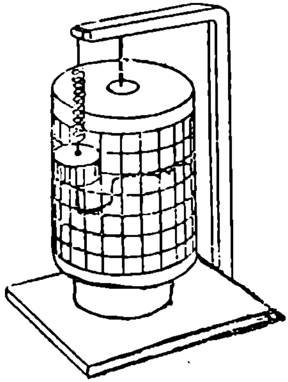
ამ ორი ტიპის ტალღებს გარდა, მყარ სხეულში ვრცელდება აგრეთვე ზედაპირული ტალღებიც. მაგრამ ისინი სულ არ ჰგვანან ზღვის ტალღებს, რომელთათვისაც გადახრილი ნაწილაკების დამბრუნებელ ძალას სიმძიმის ძალა წარმოადგენს. ტალღები მყარი სხეულის ზედაპირზე გაპირობებულია სხვა, მყარი სხეულის ნაწილაკების შემაკავშირებელი ძალებით. ამიტომ, ბუნებრივია, რომ ზედაპირული ტალღების სიჩქარე დრეკად თვისებებზეა დამოკიდებული. ზედაპირული ტალღების სიჩქარე განივი ტალღების გავრცელების სიჩქარის დაახლოებით 0,9 ნაწილს შეადგენს. ისევე როგორც სითხეში, მერხევი ნაწილაკების ტრაექტორიები ტალღის ფრონტის გარდიგარდმო განლაგებულ სიბრტყეში მდებარეობს. წერტილები მოძრაობს ელიფსის მსგავს შეკრულ მრუდებზე. ზედაპირიდან დაშორების მიხედვით ელიფსის სახე იცვლება, რხევის ამპლიტუდა მცირდება და ტალღა მიილევა.

მიწისძვრის მაცნენი

დედამიწა კარგად ატარებს ბგერას. შუა საუკუნეების თითქმის ყოველ რომანში იპოვით ადგილს, სადაც გაჭენებულ ცხენზე ამხედრებული რაინდის დევნაა აღწერილი. აი, მხედარმა უეცრად გააჩერა ცხენი, ჩამოქვეითდა და ყური დედამიწას დაადო: „მოგვდევენ, უნდა ვიჩქაროთ!“ მართლაც ცხენის ფლოქვების ცემა დედამიწაზე კილომეტრზე შორს გადაეცემა. დედამიწა, ისევე როგორც ყოველი დრეკადი სხეული, ბგერის გამტარია.

ბგერის ტალღები დედამიწაში ვრცელდება და გვაწვდის ცნობებს მიწისძვრის შესახებ, აგრეთვე გვაცნობს დედამიწის სიღრმეში მიმდინარე პროცესებს. მიწისძვრის დროს წარმოშობილ ბგერის ტალღებს სეისმური ეწოდება. სეისმური ტალღის არსებობა, მისი ამპლიტუდა, სიჩქარე, სიგრძე, რხევის სიხშირე განისაზღვრება სპეციალური მეტად მგრძნობიარე ხელსაწყოებით — სეისმოგრაფებით.

სეისმოგრაფი რთული ხელსაწყოა. მაგრამ მისი მოქმედების პრინციპის გაგება ადვილია. სეისმოგრაფის მთავარი ნაწილია ზამბარაზე დაკიდებული მძიმე ტვირთი. ნიადაგის ვერტიკალური გადანაცვლებისას ტვირთიანი ზამბარის დამაგრების წერტილი ისე გადაინაცვლებს, როგორც 126-ე ნახატზეა ნაჩვენები. დიდი ინერციის გამო დასაწყისში ტვირთი ადგილზე რჩება. ტვირთზე დამაგრებულია კალამი, ხოლო სადგამთან — ქაღალდი. როცა სადგამი გადაინაცვლებს, კალამი ქაღალდზე ვერტიკალურ ხაზს გაავლებს. სეისმური ტალღის ჩასაწერად საჭიროა ქაღალდის გადაადგილება.



ნახ. 126.

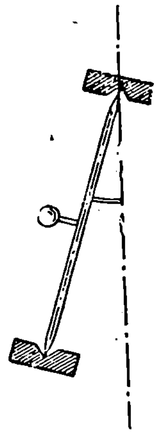
გარდა ნიადაგის ვერტიკალურ გადააადგილებათა ჩამწერი სეისმოგრაფებისა, იყენებენ აგრეთვე ჰორიზონტალურ სეისმოგრაფებსაც. ჰორიზონტალური სეისმოგრაფის მოქმედების პრინციპი ნაჩვენებია 127-ე ნახატზე. ხელსაწყოს მთავარ ნაწილს წარმოადგენს თითქმის ვერტიკალური ღერო. ექსცენტრული ტვირთი ამ ღეროს ქანქარად აქცევს, რომელსაც ღეროს ღერძის მახლობლად შეუძლია მობრუნება. თუ ნიადაგი დამშვიდებულია, ქანქარას ტვირთი უმდაბლეს მდებარეობაშია. ჰორიზონტალური მიმართულების ბიძგი იწვევს ქანქარას ღერძის გადანაცვლებას, იმ დროს, როდესაც მძიმე ტვირთი დასაწყისში ინერციით ადვილზე რჩება. ქანქარას მობრუნების რეგისტრირება თვითმწერი მოწყობილობით ხორციელდება.

თუკი დავდგამთ ერთ ვერტიკალურ და ორ ჰორიზონტალურ სეისმოგრაფს, რომლებიც ურთიერთმართობ სიბრტყეებში ირხევიან, მაშინ შეიძლება ჩაიწეროს ნებისმიერი გადანაცვლების სიდიდე და მიმართულება.

სიტყვა „მიწისძვრასთან“ ერთად, ჩვეულებრივ, თვალწინ წარმოგვიდგება, როგორ ინგრევა სახლები, როგორ ცვივა

ხეები გაჩენილ ნაპრალებში, იღუპება ხალხი. ასეთი დიდი მიწისძვრები იშვიათია. ტერმინს „მიწისძვრა“ მკვლევარი სეისმოლოგები ხმარობენ ყოველგვარი მიწისქვეშა მოვლენის აღსანიშნავად, რომელსაც შეუძლია აამოძრაოს დედამიწის ქერქის რხევების ჩამწერი სეისმოგრაფის კალამი. ასეთ მიწისძვრებს სეისმოგრაფებს გარდა ვერავინ ამჩნევს. ერთი წლის განმავლობაში მსგავსი მიწისძვრა დედამიწის ზურგზე დაახლოებით ასი ათასჯერ ხდება. როგორც ირკვევა, „მიწისქვეშა სამეფოში“ ფრიად საქმიანი ცხოვრებაა!

მიწისძვრის კერიდან ყველა მიმართულებებით გავრცელებულ სეისმურ ტალღას სხვადასხვა ქალაქებსა და ქვეყნებში დადგმული მრავალი სეისმოგრაფი იღებს. თვითეული მიწისქვეშა ბიძგის შესახებ ცნობებს სამჯერ იღებენ, რადგანაც მიწისძვრის ადგილიდან ტალღების ზემოთ ნახსენები სამივე ტიპი გაეშურება სამოგზაუროდ. დამკვირვებლამდე პირველად გასწვრივი ტალღა მიაღწევს, შემდეგ — განივი და სულ ბოლოს — ზედაპირული.



ნახ. 127

ამავე დროს ზედაპირული ტალღები სეისმოლოგისათვის ყველაზე უფრო არსებითია, რადგანაც (ადვილად გასაგები მიზეზის გამო) ისინი ყველაზე უფრო ინტენსიურია.

398-ე გვერდზე ჩვენ აღვნიშნეთ, რომ ბგერის ტალღის ინტენსივობა ბგერის წყაროდან მანძილის კვადრატის უკუპროპორციულად იცვლება. მაგრამ ეს არ ეხება ზედაპირულ ტალღებს. ავაგოთ ბგერის წყაროსთან არა ორი სფერო, არამედ ორი წრეხაზი. წრეხაზზე გამავალი ტალღის ენერგია პროპორციულია $I \cdot 2\pi r$, სადაც I ინტენსივობაა. მაშასადამე, ენერგია თუ არ იკარგება, ზედაპირული ტალღის ინტენსივობა ეცემა როგორც $\dfrac{1}{r}$ და არა როგორც $\dfrac{1}{r^2}$. ამიტომაც დამკვირვებელთან ეს ტალღები მნიშვნელოვნად ნაკლებად შესუსტებული მოდიან, ვიდრე გასწვრივი და განივი სივრცული ტალღები.

სეისმური ტალღების გამოკვლევა მარტო მიწისძვრის კე-

რის დადგეხას როდი ეძსახურება, ამ ტალღების დახმარებ
შეიძლება დედამიწის აგებულების შესასწავლი დიდი და ს
ინტერესო მუშაობის ჩატარებაც, დედამიწის სიღრმიდან მ
მავალი სიგნალები საშუალებას გვაძლევს, მისი აღნაგობის შ
სახებაც ვიმსჯელოთ. საქმე ისაა, რომ სეისმური ტალღებ
სიჩქარე სხვადასხვა სიღრმეზე სხვადასხვაა. დედამიწის ზედ
პირის მახლობლად გასწვრივი ტალღების სიჩქარე 5,5 კმ/
რიგისაა, განივის — 3,3 კმ/წმ რიგის. იმავე დროს დედამიწ
ცენტრში სეისმური ტალღების გავრცელების სიჩქარე 11—1
კმ/წმ აღწევს.

როცა ცნობილია აგებულების რა თავისებურებები ახდ
ნენ გავლენას ტალღების გავრცელების სიჩქარეზე, მკვლევ
რები აკეთებენ დასკვნებს დედამიწის ბირთვის აღნაგობაზ
დადგენილია, მაგალითად, რომ განივი ტალღები ვერ აღწევ
დედამიწის ბირთვის სიღრმეში. აქედან დაასკვნიან, რომ დ
დამიწის ბირთვი თხევადია, რადგანაც თხევად სხეულებში გ
ნივი ტალღები არ გადის.

დარტყმითი ტალღა

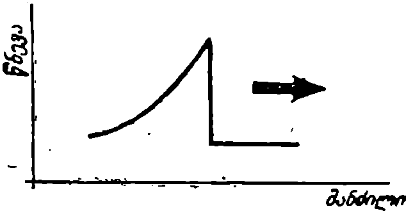
სიტყვასთან „ტალღა“ საყოფაცხოვრებო პრაქტიკაში და
კავშირებულია წარმოდგენა პერიოდული პროცესის შესახებ
რომლის თვალსაჩინო მაგალითსაც ზღვის ღელვა წარმოად
გენს. „ტალღებზე“ რწევა მობანავეთა საყვარელი გართობაა

ფიზიკაში სიტყვა „ტალღას“ უფრო ფართო აზრით იყე
ნებენ და ლაპარაკობენ ტალღის გავრცელებაზე იმ შემთხვე
ვაშიც, როდესაც წნევის ადგილობრივი მატება ან კლებ
ერთჯერადი დარტყმით, აფეთქებით ან ჰაერის შეწოვით არის
გამოწვეული.

ძალზე თავისებური სახე აქვს აფეთქებით შექმნილ ჰა
ერის ტალღას (ჩვენ უკვე ვთქვით, რომ შეიძლება ჰაერის
ტალღის ფოტოგრაფირება, ამიტომ სიტყვა „სახე“ წნევის
ტალღისათვის სავსებით შესაფერისია).

128-ე ნახატზე გამოსახულია ასეთი აფეთქების ტალღის
მყისიერი პროფილი — მრუდი გამოხატავს წნევის განაწილე

გას ტალღის გავრცელების რომელიმე მიმართულების გასწვრივ. ტალღის პროფილი დგება თანდათანი აღზევებით და შეეულად მოკვეთით მთავრდება. ტალღის მოძრაობის მიმართულება სქემაზე მარცხნიდან მარჯვნივ არის ნაჩვენები. ფრონტის მარჯვნივ მყოფი ჰაერის უბნები განსახილავ მომენტში უძრავია — ტალღა ჯერ არ მისულა იქამდე.



ნახ. 128.

აღწერილი აფეთქების, ან, როგორც მას უწოდებენ, დარტყმითი ტალღის ძირითადი თავისებურება არის წნევის მკვეთრი ნახტომი „ფრონტზე"; უძრავ წერტილებს წნევის მაქსიმუმი პრაქტიკულად მყისიერად იტაცებს: ჰაერის ნაწილაკი ცოტა ადრე ატმოსფერული წნევის პირობებში იმყოფებოდა, ხოლო შემდეგ მომენტში წნევა ამ წერტილში მაქსიმალურად გაიზარდა. დარტყმითი ტალღის შემდგომი მოძრაობისას წნევა ჩვენთვის საინტერესო წერტილში თანდათანობით ეცემა გორაკის მარცხენა დამრეცი ფერდობის პროფილის შესაბამისად.

128-ე ნახატზე გამოსახულია წნევის განაწილება ტალღის გავრცელების რომელიმე ხაზის გასწვრივ. ტალღა ვრცელდება სივრცეში და ფრონტს ზედაპირი წარმოადგენს.

დარტყმითი ტალღის ფრონტს თან მიაქვს არა მარტო წნევის, არამედ სიმკვრივისა და ტემპერატურის ნახტომიც.

წნევისა და ტემპერატურის შეცვლის გარდა დარტყმით ტალღას თან მოძრაობაც მიაქვს. ბგერით ტალღაშიც იწყებს ჰაერი მოძრაობას ტალღის გავრცელების ხაზის გასწვრივ, მაგრამ იქ ეს მოვლენა ნაკლებად შესამჩნევია. დარტყმით ტალღაში ჰაერი იმდენად ძლიერად წარიტაცება, რომ სიტყვა

„წარიტაცება“ ამ შემთხვევაში მეტისმეტად რბილადაც ჟღერს. დარტყმითი ტალღა ქმნის უძლიერეს ქარს, გრიგალს... მძლავრ დარტყმით ტალღაში მოძრაობის გამოსახატავად ვერც კი შეარჩევთ შესაფერის სიტყვას.

თვისებათა ნახტომი განსაკუთრებით მკვეთრია — სრული უძრაობიდან მოძრაობის მაქსიმალურ სიჩქარეზე გადასვლა ხორციელდება გზის მონაკვეთზე, რომელიც გაზის მოლეკულის თავისუფალი განარბენის რამდენიმე სიგრძის ტოლია. ჰაერისათვის ეს სანტიმეტრის მეასიათასედი ნაწილების რიგის სუბმიკროსკოპული სიდიდეა. ნახტომის დრო წამის მეათმილიარდედი (10^{-10}) ნაწილებით იზომება. წნევის, სიმკვრივის, ტემპერატურისა და მოძრაობის სიჩქარის მდგომარეობის სწორედ ასეთი, მართლაც რომ მყისიერი ცვლილება წარმოადგენს დარტყმითი ტალღის ნიშანთვისებას.

აფეთქების ძალის მიხედვით წნევის ნახტომი, რომელიც თან მიაქვს დარტყმით ტალღას, ან, სხვა სიტყვებით, ფრონტის სიმაღლე, შეიძლება ფრიად სხვადასხვაგვარი იყოს: დარტყმითი ტალღის მისვლის მომენტში წნევა რამდენიმე პროცენტიდან რამდენიმე ათეულჯერ იზრდება.

ყველა სიდიდის ნახტომების მნიშვნელობა დარტყმითი ტალღის ფრონტზე ერთმანეთთან არის დაკავშირებული. როცა ვიცით წნევის ნახტომის სიდიდე, შეიძლება გამოვიანგარიშოთ სიმკვრივის, ტემპერატურისა და მოძრაობის სიჩქარეების ნახტომების სიდიდეებიც. ფრონტის სიმაღლე განსაზღვრავს აგრეთვე დარტყმითი ტალღის გავრცელების სიჩქარეს. სუსტი დარტყმითი ტალღების სიჩქარე არ განსხვავდება ჩვეულებრივი ბგერის ტალღის გავრცელების სიჩქარისაგან. ფრონტის სიმაღლის ზრდასთან ერთად იზრდება დარტყმითი ტალღის გავრცელების სიჩქარეც.

მოვიყვანთ რიცხობრივ მონაცემებს „მცირე“ დარტყმითი ტალღისათვის, რომელიც წნევას ერთნახევარჯერ ადიდებს. ირკვევა, რომ წნევის ასეთი ზრდა იწვევს ჰაერის სიმკვრივის 30%-ით ზრდას და ტემპერატურის 35°-ით მატებას. ასეთი დარტყმითი ტალღის ფრონტის სიჩქარე დაახლოებით 400 მ/წმ ტოლია. უკვე წნევის შედარებით მცირე ნახტომის შემთხვევაში, როდესაც იგი 1,5-ჯერ იზრდება, დარტყმითი

ტალღა თან წარიტაცებს ჰაერს დაახლოებით 100 მ/წმ, ანუ 360 კმ/სთ სიჩქარით. ქარის ასეთი სიჩქარე არც ერთ გრიგალს არა აქვს.

მაგრამ არსებობს აფეთქებები, რომლებსაც განუზომლად უფრო ძლიერი დარტყმითი ტალღების წარმოქმნა ძალუძთ. თუ ტალღას წნევის ათჯერადი ზრდა მიაქვს თან, მაშინ ტალღის ფრონტზე სიმკვრივე ოთხჯერ იზრდება, ტემპერატურა კი — 500°-ით. ქარის სიჩქარე ამ დროს 725 მ/წმ აღწევს. ასეთი დარტყმითი ტალღის გავრცელების სიჩქარე უკვე 1 კმ/წმ ტოლია.

ძლიერი აფეთქებებით წარმოშობილი ტალღები ათეულ კილომეტრებზე ვრცელდება. თვისებათა ნახტომი, რომელიც თან მიაქვს დარტყმით ტალღას, მკვეთრ დარტყმასავით მოქმედებს ტალღის გზაზე შემხვედრ დაბრკოლებებზე. სუსტი დარტყმითი ტალღები ამსხვრევენ ფანჯრის მინებს, ანგრევენ სახლების კედლებს, ფესვებიანად გლეჯენ ხეებს. ნაღმსატყორცნის დამანგრეველი მოქმედება ბევრად არის დამოკიდებული დარტმითი ტალღების მოქმედებაზე.

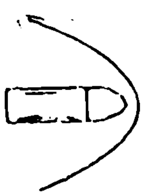
დარტყმითი ტალღების დამანგრეველი მოქმედება მკვეთრად არის დამოკიდებული მრავალ გარემოებასა და განსაკუთრებით ტალღის მოქმედების ხანგრძლივობაზე. გარკვეული წარმოდგენა რომ ვიქონიოთ ტალღის დამანგრეველი მოქმედების კავშირზე მის ძირითად პარამეტრთან — წნევის მატებასთან, აღვნიშნავთ, რომ დარტყმითი ტალღა სულ 2% სიმაღლის ფრონტით ამსხვრევს მინებს, ხოლო ტალღა, რომელსაც წნევის ორმაგი მატება მიაქვს, სქელ კედლებს ანგრევს.

ზებგერითი სიჩქარით მოძრაობა

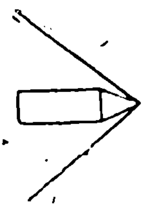
დარტყმითი ტალღები, როგორც ითქვა, ზებგერითი სიჩქარით ვრცელდება, ირკვევა, რომ მყარი სხეულების მოძრაობა ჰაერში ზებგერითი სიჩქარით აგრეთვე იწვევს დარტყმითი ტალღების წარმოქმნას. ამიტომაც თანამედროვე ავიაციისათვის დარტყმით ტალღებს მეტად დიდი მნიშვნელობა აქვს.

330 მ/წმ, ანუ 1200 კმ/სთ-ზე მეტი სიჩქარით მოძრაობა დიდი ხანი არ არის, რაც ავიაციაში რეალური გახდა. ბგერის ბარიერზე — ასე ეწოდება 1200 კმ/სთ სიდიდის ტოლი სიჩქარის ზღვრულ მნიშვნელობას — მეტი სიჩქარის მქონე თვითმფრინავებსა და თვითმფრინავი ჭურვების მოძრაობა ძალზე მკვეთრად განსხვავდება ბგერის ბარიერის მეორე მხარეზე მდებარე მოძრაობებისაგან. ეს განსხვავება გამოიხატება ზებგერითი სიჩქარით მოძრავი სხეულის წინ დარტყმითი ტალღის წარმოშობით.

ნახ. 129-ზე ნაჩვენებია დარტყმითი ტალღის სქემა, რომელსაც მომრგვალებული ფორმის ჭურვი ქმნის. ტალღის ფრონტი წარმოადგენს მრუდ ზედაპირს, რომელიც მოძრავი სხეულის წინ გადის. მოძრაობის ხაზიდან დაშორებასთან ერთად ფრონტი ჩამორჩება და შორდება ჭურვს.



ნახ. 129.



ნახ. 130.

რამდენადმე განსხვავებული სახე აქვს დარტყმით ტალღას წაწვეტებული სხეულის წინ. ეს წაწვეტებული სხეული ყველასათვის კარგად ცნობილი ჭურვის ფორმისაა. ნახ. 130 გვიჩვენებს, რომ დარტყმითი ტალღა ჭურვის „ცხვირზე ზის“; ტალღის ფრონტმა კონუსური ფორმა მიიღო.

ზებგერითი სიჩქარით მოძრავი ჭურვი შეიძლება ფოტოგრაფირებულ იქნეს. ჰაერის სიმკვრივის მკვეთრი განსხვავება ჭურვის ირგვლივ მკვეთრად მოხაზავს მის მიერ წარმოქმნილი დარტყმითი ტალღის ფრონტს. რაც უფრო სწრაფად მოძრაობს ჭურვი, მით უფრო მახვილია კონუსი.

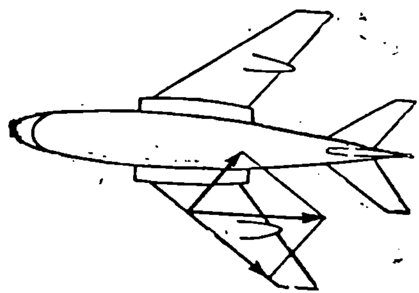
დარტყმითი ტალღა წარმოადგენს წინააღმდეგობის მთავარ წყაროს, რომელსაც ზებგერითი სიჩქარით მოძრავი სხეული ხვდება. ხოლო ბგერის სიჩქარეზე ნაკლები სიჩქარით მოძრაობის დროს წინააღმდეგობა, როგორც ვთქვით, ძირითადად ტურბულენტური მოძრაობის წარმოშობის გამო იქმნება. ამიტომაც სხეულის ყველაზე უფრო ხელსაყრელი ფორმა ამ ორი ტიპის მოძრაობისათვის სხვადასხვაა. ის, რაც

სწრაფი მოძრაობისათვის ხელსაყრელია, არ არის ხელსაყრელი უფრო ნელი მოძრაობისათვის და პირიქით.

ცხვირწაწვეტებული სხეული ტურბულენტობას უწყობს ხელს და, მაშასადამე, აძლიერებს მოძრაობის წინააღმდეგობას ბგერაზე ნაკლები სიჩქარით მოძრაობის დროს. პირიქით, ჭურვის წაწვეტებული ფორმა დარტყმითი ტალღის წინააღმდეგობას ამცირებს.

ბლაგვცხვირიანი სხეული ამცირებს ტურბულენტობას და ამიტომ ბგერაზე ნაკლები სიჩქარის დროს უფრო ხელსაყრელია, ვიდრე წაწვეტებული. ბგერის ბარიერის გავლის შემდეგ ეს ფორმა უკვე ნაკლებად ხელსაყრელი ხდება, რადგანაც წინააღმდეგობის ძირითად წყაროდ დარტმყითი ტალღა გვევლინება. ამიტომაც ქვემეხების ჭურვები ცხვირწაწვეტებულია — ისინი ხომ ზებგერითი სიჩქარით მოძრაობენ.

ისეთი სხეულისათვის, რომელიც ჰაერს ზებგერითი სიჩქარით აპობს, დარტყმითი ტალღისა და მასთან ერთად წინააღმდეგობის ძირითადი წყაროს ლიკვიდირება, სამწუხაროდ, შეუძლებელია. თვითმფრინავებისა და ჭურვების კონსტრუქტორთა ამოცანაა შეასუსტონ დარტყმითი ტალღით შექმნილი წინააღმდეგობა.



ნახ. 131

ჭურვებისა და თვითმფრინავის კორპუსების წინააღმდეგობას ფორმის წაწვეტებით ამცირებენ. ფრთებს რაღა ვუყოთ? ზესწრაფმა თვითმფრინავებმა უკანასკნელი ათეული წლის განმავლობაში ახალი მოხაზულობა მიიღეს: ფრთები კორპუსს მიუახლოვდა, თვითმფრინავმა ისრისებური ფორმა მიიღო. ეს სწორედ დარტყმითი ტალღების წინააღმდეგობასთან საბრძოლველად გაკეთდა (ნახ. 131).

იმის მაგივრად, რომ ვიმსჯელოთ თუ როგორ აპობს თვითმფრინავი ჰაერს, პირიქით, ვილაპარაკოთ იმაზე, თუ

როგორ სცემს ჰაერის ნაკადი თვითმფრინავს. ეს ხომ ერთი და იგივეა.

131-ე ნახატზე გამოსახულია თვითმფრინავი, რომელსაც ფრთა ნაკადისადმი ირიბად აქვს დაყენებული. ჰაერის ვექტორული სიჩქარე ფრთის მახლობლად შეიძლება ორ ვექტორად დავშალოთ, რომელთაგან ერთს მივმართავთ ფრთის გასწვრივ, ხოლო მეორეს — მის გარდიგარდმო. ფრთის სიგრძის გასწვრივ ჰაერი თავისუფლად სრიალებს და ეს გასწვრივი მოსრიალე მოძრაობა არ შეიძლება წინააღმდეგობის მნიშვნელოვან წყაროდ იქცეს. ძირითად წინააღმდეგობას ფრთა განიცდის ფრთის გარდიგარდმო ჰაერის მოძრაობისაგან. მაგრამ სიჩქარის განივი მდგენელი, რომლითაც ჰაერი ფრთის შემხვედრი მიმართულებით მოძრაობს, შეიძლება მნიშვნელოვნად ნაკლები იყოს შუბლურ სიჩქარეზე. შეიძლება ისიც მოხდეს, რომ თვითმფრინავის ზებგერითი სიჩქარით მოძრაობისას ჰაერის განივი სიჩქარე მისი ფრთების მიმართ ბგერის ბარიერზე ნაკლები იყოს. განივი სიჩქარის ეს შემცირება გამოიწვევს დარტყმითი ტალღების შესუსტებას და წინააღმდეგობის შემცირებას. აი რატომ აძლევენ ზესწრაფ თვითმფრინავებს ისრისებურ ფორმას.

უნდა ითქვას, რომ თვითმფირნავების კონსტრუქტორების წინაშე ძნელი ამოცანა დგას — საჭიროა გამოიძებნოს კომპრომისი ფორმებს შორის, რომლებიც მოხერხებულია ზებგერული და ჩვეულებრივი სიჩქარეებისათვის. ასეთი კომპრომისი აუცილებელია უბრალო მიზეზის გამო — თვითმფრინავის აფრენა და დაჯდომა შედარებით მცირე სიჩქარით ხდება.

ამჟამად არსებობს რეაქტიული თვითმფრინავები, რომლებიც საათში მრავალი ათასი კილომეტრის სიჩქარით ფრენენ. კონსტრუქტორები კი აგრძელებენ თავიანთ მუშაობას, რომ კიდევ უფრო მაღალ სიჩქარეს მიაღწიონ. ამ გზაზე ახალი სიძნელეები იბადება. ბგერის ბარიერის გადალახვის შემდეგ ინჟინრებს სითბური ბარიერი დახვდათ.

სწრაფად მოძრავი თვითმფრინავი ან ჭურვი კუმშავს თავის წინ მყოფ ჰაერს. შეკუმშვა ტემპერატურის მატებას იწვევს. ჰაერი, რომელსაც მოძრავი სხეული აწობს, თბება, მაშასადამე, თბება თვითმფრინავის კედლებიც.

ტემპერატურის მატება ჰაერის სიჩქარის კვადრატის პროპორციული აღმოჩნდა. რაც უფრო მეტია სიჩქარე, მით მეტად თბება ჰაერი. ბგერის ბარიერის მიღწევის მომენტისათვის ჰაერის ტემპერატურა თვითმფრინავის წინ სულ 60°-ით მატულობს. ამას ჯერ კიდევ არა აქვს დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა. მაგრამ როდესაც თვითმფრინავის მოძრაობის სიჩქარე ორჯერ აღემატება ბგერის სიჩქარეს, ჰაერი უკვე 240°-ით თბება, ბგერის გასამკეცებული სიჩქარის მიღწევისას იგი 820°C აღწევს და ა. შ. ადვილი მისახვედრია, რომ ეს გათბობა მნიშვნელოვან ტექნოლოგიურ გართულებებს იწვევს.

მოყვანილი რიცხვებიდან ჩანს, რა სწრაფად იზრდება ტემპერატურა მოძრაობის სიჩქარის მატებისას. 10 კმ/წმ რიგის სიჩქარით მოძრაობის დროს ტემპერატურა იმდენად მნიშვნელოვნად იზრდება, რომ ნებისმიერი სხეული დნება და გაზად იქცევა. სამყაროს სივრციდან დედამიწის ატმოსფეროში განუწყვეტლივ ცვივა მეტეორული სხეულები — სხვადასხვა ზომის ქვები და კენჭები. ისინი წამში რამდენიმე ათეული კილომეტრი სიჩქარით მოძრაობენ. დედამიწის ზედაპირიდან 150 — 200 კმ მანძილზე, სადაც ატმოსფერო ნაკლებადაა გაიშვიათებული, ეს სხეულები მნიშვნელოვნად თბება, ხოლო 130—60 კმ რიგის სიმაღლეებზე მათი ტემპერატურა იმდენად იზრდება, რომ ისინი ორთქლდება. ჩვენ შეუიარაღებელი თვალით ვამჩნევთ გავარვარებულ კენჭს ღამით ცაზე. იმ მომენტში, როდესაც მას ვხედავთ, გვეჩვენება, რომ ვარსკვლავი ჩამოვარდა ციდან. „ვარსკვლავის ვარდნა“ დიდხანს არ გრძელდება: წამის ნაწილი — და კენჭი აორთქლებულია.

წვა და აფეთქება

იმისათვის, რომ წვა დაიწყოს, როგორც ცნობილია, საჭიროა წვად საგანთან ანთებული ასანთის მიტანა. მაგრამ ასანთიც არ ინთება თავისთავად, იგი კოლოფს უნდა გავუსვათ. ამრიგად, ქიმიური რეაქციის დასაწყებად საჭიროა წინასწარი გათბობა.

ამის მიზეზი გასაგებია. ქიმიური რეაქცია მოლეკულის გადაკეთებაა და ამ გადაკეთებისათვის აუცილებელია ატომების ენერგიული სითბური მოძრაობა. ამიტომ ქიმიური რეაქციების სიჩქარე დიდად არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე. როგორც წესი, ტემპერატურის აწევა 10°-ით რეაქციის სიჩქარეს 2—4-ჯერ ზრდის.

თუ ტემპერატურის 10°-ით გადიდება 3-ჯერ დააჩქარებს რეაქციას, 100°-ით ტემპერატურის გადიდება $3^{10} \approx 60.000$-ჯერ დააჩქარებს მას, 200°-ით — უკვე $3^{20} \approx 4 \cdot 10^{9}$-ჯერ, ხოლო 500°-ით — 3^{50}-ჯერ, ანუ დაახლოებით 10^{24}-ჯერ.

გასაკვირი არ არის, რომ რეაქცია, რომელიც 500°C ტემპერატურის პირობებში ნორმალური სიჩქარით მიმდინარეობს, ოთახის ტემპერატურაზე საერთოდ განუხორციელებელია. ცეცხლის წაკიდება საწყის მომენტში ქმნის რეაქციისათვის აუცილებელ ტემპერატურას. შემდგომ მაღალ ტემპერატურას უკვე რეაქციის დროს გამოყოფილი სითბო იცავს.

საწყისი ადგილობრივი გახურება საკმარისი უნდა იყოს იმისათვის, რომ რეაქცის დროს გამოყოფილი სითბო სჭარბობდეს გარემომცველი ცივი გარემოსათვის სითბოს გადაცემას. ამიტომაც ყოველ რეაქციას აქვს თავისი, როგორც ამბობენ, აალების ტემპერატურა. წვა იწყება მხოლოდ მაშინ, როცა საწყისი ტემპერატურა აალების ტემპერატურას აღემატება. მაგალითად, ხის აალების ტემპერატურა არის 610°C, ბენზინისა — დაახლოებით 200°C, თეთრი ფოსფორის — 50°C.

შეშის, ნახშირის ან ნავთობის წვა ამ ნივთიერებათა ჰაერის ჟანგბადთან შეერთების ქიმიური რეაქციაა. ამიტომაც ეს რეაქცია ზედაპირიდან ვრცელდება: ვიდრე გარეგანი ფენა არ დაიწვება, შემდეგს არ შეუძლია წვაში მონაწილეობის მიღება. სწორედ ამით აიხსნება წვის შედარებით ნელი მსვლელობა.

ნათქვამის სამართლიანობაში ადვილად დაგვარწმუნებს პრაქტიკა. თუ საწვავს დავაქუცმაცებთ, შეიძლება მნიშვნელოვნად გავზარდოთ წვის სიჩქარე. ამ მიზნით მრავალი ღუმლის დანადგარში ნახშირის მტვერს საცეცხლეში აფრქვევენ.

სულ სხვანაირად არის საქმე იმ შემთხვევაში, როდესაც ჰაერის ატმოსფერო არ არის საჭირო, და ყველაფერი, რაც

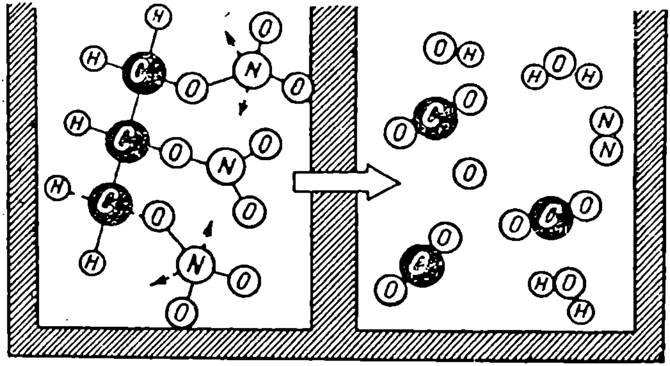
აუცილებელია რეაქციისათვის, ნივთიერების შიგნით იმყოფება. ასეთი ნივთიერების მაგალითს წარმოადგენს წყალბადის ნარევი ჟანგბადთან (მას მგრგვინავ გაზს უწოდებენ). რეაქცია მიმდინარეობს არა ზედაპირიდან, არამედ ნივთიერების შიგნით. წვის შემთხვევისგან განსხვავებით, რეაქციის დროს წარმოშობილი მთელი ენერგია თითქმის მყისიერად გამოიყოფა, ამის შედეგად იზრდება წნევა, რასაც მოსდევს აფეთქება მგრგვინავი გაზი კი არ იწვის. არამედ ფეთქდება.

ამრიგად, ფეთქებადი ნივთიერება თვითონ უნდა შეიცავდეს რეაქციისათვის საჭირო ატომებს ან მოლეკულებს. გასაგებია, რომ შეიძლება დამზადდეს ფეთქებადი გაზების ნარევი. არსებობს აგრეთვე მყარი ფეთქებადი ნივთიერებებიც. ისინი სწორედ იმიტომ არიან ფეთქებადი, რომ შეიცავენ სითბოსა და სინათლის მომცემი ქიმიური რეაქციისათვის საჭირო ყველა ატომს.

აფეთქების დროს მიმდინარე ქიმიური რეაქცია დაშლის რეაქციაა, მოლეკულის ნაწილებად გახლეჩის რეაქცია. 132-ე ნახატზე მაგალითისათვის ნაჩვენებია აფეთქების რეაქცია — ნიტროგლიცერინის მოლეკულების ნაწილებად გახლეჩა. როგორც სქემის მარჯვენა ნაწილზე ჩანს, საწყისი მოლეკულისგან წარმოიქმნება ნახშირჟანგა გაზის, წყლისა და აზოტის მოლეკულები. რეაქციის პროდუქტების შემადგენლობაში ვპოულობთ წვის ჩვეულებრივ პროდუქტებს, მაგრამ წვა მიმდინარეობს ჰაერის ჟანგბადის მოლეკულების მონაწილეობის გარეშე — წვისათვის ყველა აუცილებელი ატომი ნიტროგლიცერინის მოლეკულის შიგნით იმყოფება.

როგორ ვრცელდება აფეთქება ფეთქებად ნივთიერებაში, მაგალითად, მგრგვინავ გაზში? როდესაც ფეთქებად ნივთიერებას ცეცხლს უკიდებენ, წარმოიშობა ადგილობრივი გახურება. რეაქცია მიმდინარეობს გახურებულ მოცულობაში. მაგრამ რეაქციის დროს გამოიყოფა სითბო, რომელიც სითბოს გადაცემის გზით გადადის ნარევის მეზობელ ფენებში. ეს სითბო საკმარისია იმისათვის, რომ მეზობელ ფენაშიც დაიწყოს რეაქცია. გამოყოფილი სითბოს ახალი რაოდენობა გადადის მგრგვინავი გაზის შემდგომ ფენებში და, ამგვარად, სითბოს გადაცემასთან დაკავშირებული სიჩქარით რეაქცია

შთელ ნივთიერებაში გავრცელდება. ასეთი გადაცემის სიჩქარე — 20—30 მ/წმ სიდიდის რიგისაა. რასაკვირველია, ეს ძალიან სწრაფი პროცესია. გაზით სავსე მეტრიანი მილი წა-



ნახ. 1 32.

შის ერთი მეოცედი ნაწილის განმავლობაში ფეთქდება, ე. ი. თითქმის მყისიერად, იმ დროს, როცა ხის ან ნახშირის ნაჭრების წვის სიჩქარე ზედაპირიდან და არა მოცულობის შიგნით წუთში სანტიმეტრებით იზომება, ე. ი. რამდენიმე ათასჯერ ნაკლებია.

მიუხედავად ამისა ამ აფეთქებასაც შეიძლება ნელი ვუწოდოთ, რამდენადაც არსებობს სხვა აფეთქება, რომელიც რამდენიმე ასეულჯერ უფრო სწრაფია, ვიდრე აღწერილი.

სწრაფ აფეთქებას დარტყმითი ტალღა იწვევს. თუ ნივთიერების რომელიმე ფენაში მკვეთრად იზრდება წნევა, მაშინ ამ ადგილიდან იწყება დარტყმითი ტალღის გავრცელება. როგორც ვიცით, დარტყმითი ტალღა იწვევს ტემპერატურის მნიშვნელოვან ნახტომს. მეზობელ ფენაში მისვლისას დარტყმითი ტალღა ზრდის მის ტემპერატურას. ტემპერატურის აწევა დასაბამს აძლევს აფეთქების რეაქციას, ხოლო აფეთქება იწვევს წნევის მატებას და ხელს უწყობს დარტყმით ტალღას, რომლის ინტენსივობა ამის გარეშე სწრაფად დაეცემოდა მისი გავრცელების მიხედვით. ამრიგად დარტყმითი ტალღა იწვევს აფეთქებას, ხოლო აფეთქება თავის მხრივ ხელს უწყობს დარტყმით ტალღას.

ჩვენს მიერ აღწერილ აფეთქებას დეტონაცია ეწოდება. რადგანაც დეტონაცია ნივთიერებაში დარტყმითი ტალღის სიჩქარით (1 კმ/წმ) ვრცელდება, ამიტომ იგი მართლაც „ნელ" აფეთქებაზე რამდენიმე ასეულჯერ უფრო სწრაფია.

რომელი ნივთიერებები ფეთქდება „ნელა", და რომელი „სწრაფად"? საკითხის ასე დასმა არ შეიძლება: ერთი და იგივე ნივთიერება სხვადასხვა პირობებში შეიძლება „ნელაც" აფეთქდეს და დეტონაციითაც, ზოგ შემთხვევაში კი „ნელი" აფეთქება დეტონაციაში გადავიდეს.

ზოგიერთი ნივთიერება, მაგალითად, იოდოვანი აზოტი, ჩალის ღეროს შეხებით, მცირე გათბობით, ან სინათლის გაელვებით ფეთქდება. ტროტილი კი არ აფეთქდება, თუნდაც ძირს დავაგდოთ, ანდა შაშხანა ვესროლოთ. მის ასაფეთქებლად ძლიერი დარტყმითი ტალღაა საჭირო.

არსებობს ნივთიერებები, რომლებიც კიდევ უფრო ნაკლებად მგრძნობიარენი არიან გარეგანი ზემოქმედების მიმართ. ამიაკის გვარჯილისა და ამონიუმის სულფატის ნარევი ფეთქებად ნივთიერებად არ ითვლება, მას სასუქად იყენებენ. მაგრამ 1921 წელს გერმანიაში, ოპაუს ქიმიურ ქარხანაში, მოხდა ტრაგიკული შემთხვევა. დატკეპნილი ნარევის დაქუცმაცებისათვის იქ აფეთქების ხერხი გამოიყენეს. ამის შედეგად ჰაერში ავარდა საწყობი და მთელი ქარხანა. ამ უბედურებაში არ შეიძლებოდა ქარხნის ინჟინრების დადანაშაულება: დაახლოებით ოცმა ათასმა აფეთქებამ ჩაიარა ნორმალურად და მხოლოდ ერთხელ შეიქმნა დეტონაციისათვის ხელსაყრელი პირობები.

ნივთიერებები, რომლებიც მხოლოდ დარტყმითი ტალღის გავლენით ფეთქდება, ხოლო ჩვეულებრივ პირობებში მდგრად მდგომარეობაშია და რომელთათვის ცეცხლიც კი არ არის საშიში, ფრიად მოსახერხებელია აფეთქების საქმის ტექნიკისათვის. ასეთი ნივთიერებების დამზადება და შენახვა დიდი რაოდენობით შეიძლება. მაგრამ ამ ინერტული ფეთქებადი ნივთიერებების ასამოქმედებლად საჭიროა აფეთქების დამწყებები ან, როგორც ამბობენ, ინიციატორები. ასეთი მაინიცირებელი ფეთქებადი ნივთიერებები აუცილებელია როგორც დარტყმით ტალღების წყარო.

მაინიცირებელი ნივთიერების მაგალითად შეიძლება მოვიყვანოთ ტყვიის აზიდი, ანუ მგრგვინავი სინდიყი. თუ ასეთი ნივთიერების მარცვალს თუნუქის ფურცელზე მოვათავსებთ და ცეცხლს წავუკიდებთ, მარცვალი აფეთქდება და თუნუქს გახვრეტს. მსგავსი ნივთიერებების აფეთქება ყოველგვარ პირობებში დეტონაციურია.

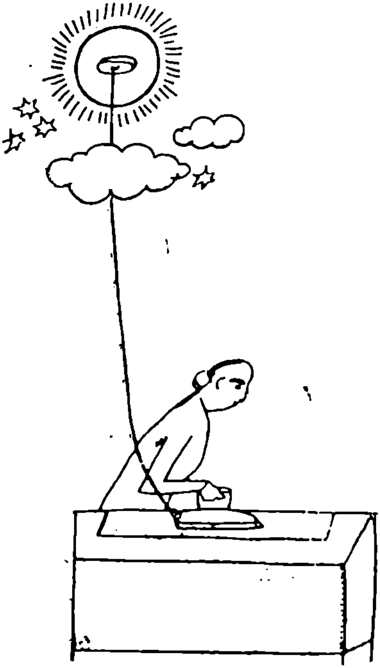
თუ ტყვიის აზიდის მცირე რაოდენობას მეორადი ფეთქებადი ნივთიერების მუხტზე მოვათავსებთ და ცეცხლს მოვუკიდებთ, მაშინ ინიციატორის აფეთქება მეორადი ფეთქებადი ნივთიერების დეტონაციისათვის საკმარის დარტყმით ტალღას იძლევა. პრაქტიკაში აფეთქება ხორციელდება კაფსული-დეტონატორის (1—2 გ მაინიცირებელი ნივთიერების) საშუალებით. კაფსულს შეიძლება ცეცხლი მივუნთოთ გარკვეული მანძილიდან, მაგალითად გრძელი ზონარის დახმარებით (ბიკფორდის ზონარი); კაფსულიდან მიღებული დარტყმითი ტალღა ააფეთქებს მეორად ფეთქებად ნივთიერებას.

რიგ შემთხვევებში ტექნიკას ესაჭიროება დეტონაციური მოვლენებთან ბრძოლა. ავტომობილის მოტორის ძრავაში ჩვეულებრივ პირობებში ბენზინისა და ჰაერის ნარევის „ნელი აფეთქება" მიმდინარეობს. მაგრამ ხანდახან დეტონაციაც წარმოიშობა. სისტემატური დარტყმითი ტალღები მოტორში სრულიად დაუშვებელია, რადგანაც მათი მოქმედებით მოტორის ცილინდრის კედლები მალე გამოვა მწყობრიდან.

დეტონაციასთან საბრძოლველად საჭიროა ან სპეციალური ბენზინის გამოყენება (ეგრეთ წოდებული მაღალი ოქტანის რიცხვის მქონე ბენზინი), ან ბენზინში სპეციალური ნივთიერებების — ანტიდეტონატორების ჩარევა, რომლებიც დარტყმითი ტალღის განვითარების საშუალებას სპობენ. ერთ-ერთ გავრცელებულ ანტიდეტონატორს წარმოადგენს ტეტრაეთილტყვია (ტეტ). ეს ნივთიერება ძლიერ მშხამავია და ინსტრუქცია აფრთხილებს მძღოლებს, რომ ასეთი ბენზინი აუცილებლად ფრთხილად იხმარონ.

დეტონაციის თავიდან აცილება საჭიროა საარტილერიო ქვემეხის კონსტრუირებისას. გასროლისას ლულის შიგნით არ უნდა წარმოიშვას დარტყმითი ტალღები. წინააღმდეგ შემთხვევაში ქვემეხი მწყობრიდან გამოვა.

XVI. ᲔᲜᲔᲠᲒᲘᲐ ᲩᲕᲔᲜᲡ ᲘᲠᲒᲕᲚᲘᲕ



ᲠᲝᲒᲝᲠ ᲒᲐᲠᲓᲐᲕᲥᲛᲜᲐᲗ ᲔᲜᲔᲠᲒᲘᲐ ᲛᲣᲨᲐᲝᲑᲐᲓ

ადამიანს ესაჭიროება მანქანები, ამისათვის უნდა შეგვეძლოს მოძრაობის შექმნა — დგუშების გადაადგილება, ბორბლების დატრიალება, მატარებლის ვაგონების ზიდვა. მანქანების მოძრაობა მუშაობას მოითხოვს. როგორ მივიღოთ მუშაობა?

ამ საკითხზე თითქმის უკვე ვიმსჯელეთ: მუშაობა ენერგიის ხარჯზე მიიღება. სხეულს ან სხეულთა სისტემას უნდა გამოვართვათ ენერგია, მაშინ მივიღებთ მუშაობას.

რეცეპტი სწორია, მაგრამ ჩვენ ჯერ არ შევხებივართ საკითხს, თუ როგორ შევასრულოთ ასეთი გარდაქმნა. განა ყოველთვის შეიძლება სხეულისათვის ენერგიის გამორთმევა? როგორი პირობებია ამისთვის საჭირო? ახლა ვნახავთ, რომ ჩვენს ირგვლივ თითქმის მთელი ენერგია სრულიად უსარგებლოა: მისი მუშაობად გარდაქმნა შეუძლებელია. ასეთი ენერგიის მითვლა ჩვენი ენერგეტიკული მარაგისათვის ყოვლად შეუძლებელია. მოდით გავერკვეთ ამაში.

წონასწორობის მდებარეობიდან გადახრილი ქანქარა ადრე თუ გვიან გაჩერდება; გადაბრუნებული ველოსიპედის ბორბალი რომ ხელით დავატრიალოთ, ერთ ხანს იბრუნებს, მაგრამ, ბოლოს და ბოლოს, ისიც შეწყვეტს მოძრაობას. თავისთავად მოძრავი ყველა ჩვენი გარემომცველი სხეული საბოლოოდ ჩერდება[1]. ამ მნიშვნელოვან კანონს გამონაკლისები არა აქვს.

თუ გვაქვს ორი სხეული — თბილი და ცივი, მაშინ სითბო პირველიდან მეორეს მანამდე გადაეცემა, ვიდრე ორივე სხეულის ტემპერატურა არ გათანაბრდება. როცა სითბოს გადაცემა შეწყდება, სხეულების მდგომარეობა აღარ შეიცვლება და სითბური წონასწორობა დამყარდება.

სხეულები თავისთავად არასოდეს არ გამოდიან წონასწორობის მდგომარეობიდან. არ შეიძლება, მაგალითად, ღერძზე ჩამოცმულმა ბორბალმა თავისთავად დაიწყოს ბრუნვა. არც ასე ხდება ხოლმე, რომ მაგიდაზე დადგმული სამელნე თავისთავად გათბეს.

წონასწორობისადმი მისწრაფება იმას ნიშნავს, რომ მოვლენებს აქვთ ბუნებრივი მსვლელობა: სითბო ცხელი სხეულიდან ცივისაკენ გადადის, მაგრამ თავისთავად არ შეუძლია ცივი სხეულიდან ცხელში გადავიდეს.

მერხევი ქანქარას მექანიკური ენერგია ჰაერის წინააღმდეგობისა და დაკიდების წერტილში ხახუნის გამო სითბოში გადავა. მაგრამ არავითარ პირობებში არ დაიწყებს ქანქარა რხევას გარემოში არსებული სითბოს ხარჯზე. სხეულები

---

[1] აქ, რასაკვირველია, მხედველობაში არა გვაქვს თანაბარი გადატანითი მოძრაობა და სისტემის, როგორც მთლიანის, თანაბარი ბრუნვა.

წონასწორობის მდგომარეობაში მოდიან, მაგრამ ამ მდგომარეობიდან თავისთავად გამოსვლა არ შეუძლიათ.

ბუნების ეს კანონი თვალნათლივ გვიჩვენებს, ჩვენს ირგვლივ მყოფი ენერგიის რა ნაწილია სრულიად უსარგებლო. ეს იმ სხეულების მოლეკულების სითბური მოძრაობის ენერგიაა, რომლებიც წონასწორობის მდგომარეობაში იმყოფებიან. ასეთ სხეულებს არ ძალუძთ თავიანთი ენერგიის მექანიკურ მოძრაობად გარდაქმნა.

ენერგიის ეს ნაწილი უზარმაზარია. ვიანგარიშოთ ამ „მკვდარი" ენერგიის სიდიდე. თუ ტემპერატურას 1°-ით შევამცირებთ, მაშინ ერთი კილოგრამი მიწა, რომლის სითბოტევადობა 0,2 კკალ/კგ, 0,2 კკალ დაკარგავს. შედარებით მცირე რიცხვია. მაგრამ ვივარაუდოთ, რამდენ ენერგიას მივიღებდით, მხოლოდ ერთი გრადუსით რომ გაგვეცივებინა ასეთი ნივთიერება დედამიწის სფეროს მასაში, რომელიც $6 \cdot 10^{24}$ კგ ტოლია. გადამრავლებით მივიღებთ გრანდიოზულ რიცხვს: $1{,}2 \cdot 10^{24}$ კკალ. თქვენ, რომ ამ სიდიდის წარმოდგენა შეგეძლოთ, აქვე ვიტყვით, რომ ამჟამად ყოველწლიურად მსოფლიოს ელექტროსადგურების მიერ გამომუშავებული ენერგია 10^{15}—10^{14} კკალ. ტოლია, ე. ი. მილიარდჯერ ნაკლებია.

გასაკვირი არ არის, რომ ამგვარი გამოთვლები ჰიპნოზივით მოქმედებს მცირემცოდნე გამომგონებლებზე. ზემოთ ჩვენ ვილაპარაკეთ მარადიული ძრავის („პერპეტუუმ მობილე") აგების ცდებზე. ეს ძრავა მუშაობას არაფრისგან ქმნიდა. ენერგიის მუდმივობის კანონიდან გამომდინარე დებულებებზე დაყრდნობით შეუძლებელია ამ კანონის უარყოფა მარადიული ძრავის შექმნით (ახლა ჩვენ მას პირველი გვარის მარადიულ ძრავას ვუწოდებთ). ასეთსავე შეცდომას უშვებენ ცოტა უფრო ხერხიანი გამომგონებლები ისეთი ძრავების კონსტრუქციების შექმნისას, რომლებიც მხოლოდ და მხოლოდ გარემოს გაცივების ხარჯზე წარმოქმნიან მექანიკურ მოძრაობას. ამ, სამწუხაროდ განუხორციელებელ, ძრავას მეორე გვარის პერპეტუუმ მობილეს უწოდებენ. აქაც ლოგიკური შეცდომაა დაშვებული. გამომგონებელი ეყრდნობა ფიზიკის კანონებს, რომლებიც გამომდინარეობენ იმ კანონიდან,

რომ ყველა სხეული მიისწრაფვის წონასწორობის მდგომარეობისაკენ, და ამ კანონების მეშვეობით ცდილობს უარყოს საფუძვლები, რომლებზეც ისინია დაფუძნებული.

ამრიგად, მხოლოდ გარემოსათვის სითბოს წართმევით არ შეიძლება მუშაობის ჩატარება, სხვა სიტყვებით, ერთმანეთის მიმართ წონასწორობაში მყოფი სხეულების სისტემა ენერგეტიკულად უნაყოფოა.

მაშასადამე, მუშაობის მისაღებად უპირველეს ყოვლისა საჭიროა ვიპოვოთ სხეულები, რომლებიც წონასწორობაში არ არიან თავიანთ მეზობლებთან. მხოლოდ მაშინ მოხერხდება სითბოს ერთი სხეულიდან მეორესათვის გადაცემა ან სითბოს მექანიკურ მუშაობად გარდაქმნა.

ენერგიის ნაკადის შექმნა — აი მუშაობის მიღების აუცილებელი პირობა. ამ ნაკადის „გზაზე“ შესაძლებელია სხეულების ენერგიის მუშაობად გარდაქმნა.

ამიტომ ადამიანისათვის სასარგებლო ენერგიის მარაგს მიეკუთვნება მხოლოდ იმ სხეულების ენერგია, რომლებიც არ არიან წონასწორობაში გარემომცველ გარემოსთან.

მისწრაფება უწესრიგობისაკენ

თავის ნებაზე მიშვებული სხეულები წონასწორობისაკენ ისწრაფვიან. სხეულთა ბუნებრივ მდგომარეობას წარმოადგენს მექანიკური და სითბური წონასწორობა. ბუნების ამ უმნიშვნელოვანესი კანონის პრაქტიკულ შედეგს ჩვენ საკმაოდ დაწვრილებით გავეცანით.

მაგრამ როგორია ამ კანონის შინაგანი აზრი? რატომ წარმოადგენს მთელი სამყარო გზას წონასწორული მდგომარეობისაკენ? რატომ უახლოვდებიან თავის ნებაზე მიშვებული სხეულები ისეთ მდგომარეობას, რომელშიც მექანიკური მოძრაობა წყდება, ხოლო სხეულთა ტემპერატურა თანაბრდება? ეს საკითხი ძალზე მნიშვნელოვანი და საინტერესოა და პასუხის გასაცემად შორიდან დაგვჭირდება დაწყება.

ჩვეულებრივი შემთხვევები, ყოველ ნაბიჯზე რომ გვხვდება, ალბათურ შემთხვევებს წარმოადგენს, პირუკუ, არაალბა-

თუ შემთხვევებს ისეთებს უწოდებენ, რომლებიც გარემოებათა იშვიათი დამთხვევის შედეგია.

არაალბათური მოვლენა არ საჭიროებს რაიმე ზებუნებრივი ძალების გამოვლინებას. მასში არაფერი არ არის შეუძლებელი, ან ისეთი, რაც ბუნების კანონებს ეწინააღმდეგება. მაგრამ ბევრ შემთხვევაში ჩვენ მაინც სრულიად დარწმუნებული ვართ, რომ არაალბათური პრაქტიკულად იგივეა, რაც შეუძლებელი.

დაათვალიერეთ ლატარიის მოგებათა ცხრილი. დაითვალეთ, რამდენ ბილეთსა აქვს ოთხიანით, ხუთიანით ან ექვსიანით დამთავრებული ნომერი. თქვენ სრულიად არ გაიკვირვებთ, როდესაც ნახავთ, რომ თვითეულ ციფრს მოგებული ობლიგაციების დახლოებით ერთი მეათედი შეესაბამება.

მაგრამ შეიძლება თუ არა, რომ ხუთიანით დამთავრებული ბილეთების ნომრების რიცხვი ერთი მეათედი კი არა, ერთი მეხუთედი იყოს? ნაკლებად ალბათურია, იტყვით თქვენ. მოგებული ბილეთების ნახევარს რომ ჰქონდეს ასეთი ნომრები? არა, ეს სრულიად არაალბათურია... და, მაშასადამე, შეუძლებელიც.

თუ დავფიქრდებით, რა პირობებია საჭირო იმისათვის, რომ მოვლენა ალბათური იყოს, შემდეგ დასკვნამდე მივალთ: მოვლენის ალბათობა დამოკიდებულია იმ ხერხთა რიცხვისაგან, რომლებითაც მისი განხორციელება შეიძლება. რაც უფრო მეტია ხერხთა რიცხვი, მით უფრო ხშირია ასეთი მოვლენა.

უფრო ზუსტად რომ ვთქვათ, ალბათობა არის მოცემული მოვლენის განხორციელების ხერხთა რიცხვის ფარდობა ყველა შესაძლებელ მოვლენათა განხორციელების ხერხთა რიცხვთან.

მუყაოს ათ პატარა რგოლზე დაწერეთ ციფრები 0-დან 9-მდე და პარკში ჩაყარეთ. ახლა ამოიღეთ ერთი რგოლი, დაინიშნეთ ნომერი და ისევ პარკში ჩააგდეთ. ეს ძალზე წააგავს ლატარიის გათამაშებას. დაბეჯითებით შეიძლება ითქვას, რომ ერთსა და იმავე ციფრს 7-ჯერაც კი ვერ ამოიღებთ ზედიზედ, გინდაც ამ მოსაწყენ საქმიანობას მთელი საღამო დაუთმოთ. რატომ? შვიდი ერთნაირი ციფრის ამოღება ისეთი მოვლენაა,

რომელიც ათი ხერხით შეიძლება განხორციელდეს (7 ნული, 7 ერთიანი, 7 ორიანი და ა. შ.). სულ კი მუყაოს შვიდი რგოლის ამოღების 10^7 შესაძლებლობა არსებობს. ამიტომაც ზედიზედ შვიდი ერთნაირციფრიანი რგოლის ამოღების ალბათობა ტოლია $10/10^7=10^{-6}$, ანუ სულ ერთი მემილიონედისა.

თუ პატარა ყუთში თეთრ და შავ მარცვალებს ჩავყრით და ნიჩბით ავურევთ, ძალიან მალე მარცვლები ყუთში თანაბრად განაწილდება. თუ ყუთიდან ალალბედზე ერთ მუჭა მარცვალს ამოვიღებთ, თეთრი და შავი მარცვლების დაახლოებით ერთნაირ რიცხვს აღმოვაჩენთ. რამდენიც არ უნდა ვურიოთ, ყოველთვის ასეთ შედეგს მივიღებთ — თანაბრობა დაცული იქნება. მაგრამ რატომ არ ხდება მარცვლების განცალკევება? რატომ არის, რომ რაც არ უნდა დიდხანს ვურიოთ, მაინც ვერ მოვახერხებთ შავი მარცვლების ზემოთ ამოტანას და თეთრების ქვევით ჩატანას? იმიტომ, რომ აქაც ალბათობასთან გვაქვს საქმე. ისეთი მდგომარეობა, როცა მარცვლები უწესრიგოდ არის განაწილებული, ანუ თეთრი და შავი მარცვლები თანაბრად არის არეული, შეიძლება ხერხთა უზარმაზარი რიცხვით განხორციელდეს, მაშასადამე, ამ მდგომარეობას ყველაზე უფრო დიდი ალბათობა აქვს. პირუკუ, ისეთი მდგომარეობა, რომლის დროსაც ყველა თეთრი მარცვალი ზევით არის, ხოლო შავები ქვევით, ერთადერთია. ამიტომაც მისი განხორციელების ალბათობა სულ უმნიშვნელოა.

ტოპრაკში მოთავსებული მარცვლებიდან ადვილად გადავალთ სხეულების შემადგენელ მოლეკულებზე. მოლეკულების ქცევა შემთხვევას ემორჩილება. ეს განსაკუთრებით მკაფიოდ ჩანს გაზების მაგალითზე. როგორც ვიცით, გაზის მოლეკულები უწესრიგოდ ეჯახებიან ერთმანეთს და ყველა შესაძლო მიმართულებით მოძრაობენ ხან ერთი, ხან მეორე სიჩქარით. ეს მარადიული სითბური მოძრაობა განუწყვეტლივ იწვევს მოლეკულების გადაჯგუფ-გადმოჯგუფებას, მათ შერევას ისევე, როგორც ნიჩაბი ყუთში ჩაყრილი მარცვლების შემთხვევაში.

ოთახი, რომელშიც ჩვენ ვიმყოფებით, ჰაერით არის სავსე.

რატომ არ შეიძლება რომელიმე მომენტში მოლეკულები ოთახის ქვედა ნახევრიდან ზემოთა ნახევარში გადავიდნენ — ჰერის მახლობლად? ასეთი პროცესი არ არის შეუძლებელი — იგი ძალზე არაალბათურია. მაგრამ რას ნიშნავს არაალბათური? აღნიშნული მოვლენა მოლეკულების უწესრიგო განაწილებაზე მილიარდჯერ ნაკლებ ალბათურიც რომ იყოს, ვინმე მაინც მოესწრებოდა მას. მაგრამ იქნებ სწორედ ჩვენ მოვესწროთ?

გამოთვლა გვიჩვენებს, რომ ასეთი მოვლენა 1 სმ^3 მოცულობის ჭურჭლისათვის $10^{30\,000\,000\,000\,000\,000}$ § 0-ში ერთხელ გვხვდება. ნამდვილად არა ღირს განვასხვავოთ სიტყვები „უკიდურესად არაალბათური“ და „შეუძლებელი“. დაწერილი რიცხვი ხომ წარმოუდგენლად დიდია; იგი რომ გავყოთ ატომების რიცხვზე, არამცთუ მარტო დედამიწის ზურგზე, მთელ მზის სისტემაშიც კი იგი მაინც უზარმაზარი დარჩება.

მაშ როგორი იქნება გაზის მოლეკულების მდგომარეობა? ყველაზე უფრო ალბათური. ხოლო ყველაზე უფრო ალბათური იქნება მდგომარეობა, რომელიც ხერხთა უდიდესი რიცხვით ხორციელდება. ანუ მოლეკულების უწესრიგო განაწილება, როცა მოლეკულების დაახლოებით ერთნაირი რაოდენობა მოძრაობს მარცხნივ და მარჯვნივ, ზევით და ქვევით, როცა ყოველ მოცულობაში მოლეკულების ტოლი ერთნაირი რაოდენობაა, სწრაფი და ნელი მოლეკულების ერთნაირი რაოდენობაა ჭურჭლის ზედა და ქვედა ნაწილებში. ყოველი გადახრა ასეთი უწესრიგობიდან, ე. ი. მოლეკულების თანაბარი და უწესრიგო შერევიდან ადგილებისა და სიჩქარეების მიხედვით, ამცირებს ალბათობას, ან უფრო მოკლედ, არაალბათურ მოვლენას წარმოადგენს.

პირუკუ, მოვლენები, რომლებიც დაკავშირებული არიან შერევასთან, წესრიგისგან უწესრიგობის შექმნასთან, ადიდებენ მდგომარეობის ალბათობას.

მაშასადამე, სწორედ ეს მოვლენები განსაზღვრავენ მოვლენების ბუნებრივ მსვლელობას. კანონი მეორე გვარის პერპეტუუმ მობილეს შეუძლებლობის შესახებ, კანონი ყველა სხეულის წონასწორული მდგომარეობისკენ მისწრაფების შე-

სახებ, თავის ახსნას პოულობს. რატომ გადადის მექანიკური მოძრაობა სითბურში? იმიტომ, რომ მექანიკური მოძრაობა მოწესრიგებულია, ხოლო სითბური — უწესრიგო. წესრიგიდან უწესრიგობაში გადასვლა ზრდის მდგომარეობის ალბათობას.

ფიზიკოსები ხშირად სარგებლობენ დამხმარე სიდიდით, რომელსაც ენტროპია ეწოდება. ენტროპია ახასიათებს წესრიგის ხარისხს და მარტივი ფორმულით არის დაკავშირებული მდგომარეობის განხორციელების ხერხთა რიცხვთან. ფორმულას არ მოვიყვანთ, ვიტყვით მხოლოდ, რომ რაც მეტია ალბათობა, მით მეტია ენტროპიაც.

ბუნების ამ კანონში ნათქვამია: ყველა ბუნებრივი პროცესი ისე მიმდინარეობს, რომ მდგომარეობის ალბათობა იზრდება. სხვა სიტყვებით, ბუნების იგივე კანონი შეიძლება ჩამოყალიბდეს როგორც ენტროპიის ზრდის კანონი.

ენტროპიის ზრდის კანონი ბუნების უმნიშვნელოვანესი კანონია. ამ კანონიდან გამომდინარეობს, კერძოდ, მეორე გვარის პერპეტუმ მობილეს შეუძლებლობაც, ან, რაც იგივეა, მტკიცება, რომ თავის ნებაზე მიშვებული სხეულები წონასწორობისაკენ ისწრაფვიან.

ენტროპიის ზრდის კანონს ხანდახან თერმოდინამიკის მეორე საწყისს უწოდებენ (თერმოდინამიკა არის მოძღვრება სითბოს შესახებ). ხოლო პირველი საწყისი? პირველი საწყისი არის ენერგიის მუდმივობის კანონი.

სახელწოდება „თერმოდინამიკის საწყისები" ბუნების ამ კანონებისათვის ისტორიულად ჩამოყალიბდა. ვერ ვიტყვით, რომ ყველაფრის ასე „ერთ ქვაბში მოქცევა" მაინცდამაინც მოხერხებული იყოს. ენერგიის მუდმივობის კანონი მექანიკური კანონია, რომელსაც განუხრელად ემორჩილებიან როგორც დიდი სხეულები, ისე ცალკეული ატომები და მოლეკულები. რაც შეეხება ენტროპიის ზრდის კანონს, როგორც ზემოთ თქმულიდან გამომდინარეობს, მისი გამოყენება შეიძლება მხოლოდ ნაწილაკთა საკმარისად დიდი დაჯგუფებების მიმართ, ხოლო ცალკეული მოლეკულებისთვის კი უბრალოდ არ შეიძლება მისი ჩამოყალიბება.

თერმოდინამიკის მეორე საწყისის სტატისტიკური ხასიათი სრულიადაც არ ამცირებს მის მნიშვნელობას (სწორედ ეს

რუდოლფ კლაუზიუსი (1822—1888) — გამოჩენილი გერმანელი ფიზიკოს-თეორეტიკოსი. კლაუზიუსმა პირველმა ჩამოაყალიბა მკაფიოდ თერმოდინამიკის მეორე კანონი: 1850 წ.—დებულების სახით, რომ შეუძლებელია თავისთავად გადაეცეს სითბო უფრო ცივი სხეულიდან უფრო თბილს, ხოლო 1865 წ. — მის მიერვე შემოღებული ენტროპიის ცნების დახმარებით. კლაუზიუსი ერთ-ერთი პირველთაგანი იყო მათ შორის, ვინც დაიწყო მრავალატომიანი გაზების სითბოტევადობისა და გაზების სითბოგამტარობის საკითხების შესწავლა. კლაუზიუსის შრომებმა გაზების კინეტიკური თეორიის დარგში ხელი შეუწყო სტატისტიკური წარმოდგენების განვითარებას ფიზიკური პროცესების შესახებ. კლაუზიუსს ეკუთვნის საინტერესო შრომები ელექტრული და მაგნიტური მოვლენების დარგში.

სტატისტიკურობა აღნიშნავს იმ გარემოებას, რომ საქმე ნაწილაკთა დიდ დაჯგუფებას ეხება). ენტროპიის ზრდის კანონი განსაზღვრავს პროცესების მიმართულებას. ამ აზრით ენტროპიას შეიძლება ბუნებრივი სიმდიდრის დირექტორ-განმკარგულებელი ვუწოდოთ, ხოლო ენერგიას ბუხჰალტრის მოვალეობის შემსრულებელი.

ვის ეკუთვნის პატივი ბუნების ამ მნიშვნელოვანი კანონის აღმოჩენისა? აქ არ შეიძლება მხოლოდ ერთი ადამიანის დასახელება. თერმოდინამიკის მეორე საწყისს თავისი ისტორია აქვს.

ისევე, როგორც თერმოდინამიკის პირველი საწყისის ისტორიაში, აქაც პირველ რიგში უნდა დავასახელოთ ფრანგი ინჟინერი და მეცნიერი სადი კარნო. 1824 წელს მან საკუთარი სახსრებით გამოსცა ნაბეჭდი შრომა სახელწოდებით „მოსაზრებები ცეცხლის მამოძრავებელ ძალაზე"? ამ შრომაში პირველად იყო მითითებული, რომ სითბოს არ შეუძლია ცივი სხეულიდან თბილში გადასვლა მუშაობის დახარჯვის გარეშე. კარნომ გვიჩვენა აგრეთვე, რომ სითბური მანქანის მარგი ქმედების მაქსიმალური კოეფიციენტი (იხ. ქვემოთ) განისაზღვრება მხოლოდ გამათბობელისა და მაცივარი გარემოს ტემპერატურათა სხვაობით.

ამ შრომას მხოლოდ კარნოს სიკვდილის შემდეგ, 1832 წელს, მიაქციეს ყურადღება სხვა ფიზიკოსებმა, მაგრამ მან მცირე გავლენა მოახდინა ფიზიკის შემდგომ განვითარებაზე, რადგან კარნოს მთელი თხზულება აგებული იყო ისეთი „ნივთიერების" აღიარებაზე, რომლის არც შექმნა შეიძლება და არც მოსპობა და რომელსაც „სითბომბადს" უწოდებდნენ.

მხოლოდ მას შემდეგ, რაც რობერტ მეიერის, ჯოულისა და ჰელმჰოლცის შრომების საფუძველზე დადგინდა სითბოსა და მუშაობის ექვივალენტურობის კანონი, დიდი გერმანელი ფიზიკოსი რუდოლფ კლაუზიუსი (1822—1888) მივიდა თერმოდინამიკის მეორე კანონამდე და მათემატიკურად ჩამოაყალიბა იგი. კლაუზიუსმა შემოიღო ენტროპიის განხილვა და გვიჩვენა, რომ თერმოდინამიკის მეორე საწყისის არსი დაიყვანება ენტროპიის გარდუვალ ზრდაზე ყველა რეალურ პროცესში.

თერმოდინამიკის მეორე საწყისი საშუალებას იძლევა ჩამოყალიბდეს ზოგადი კანონები, რომლებსაც უნდა ემორჩილებოდეს ყველა სხეული თავისი აგებულების მიუხედავად. მაგრამ რჩება კიდევ ერთი კითხვა: როგორ ვიპოვოთ კავშირი სხეულის აგებულებასა და მის თვისებებს შორის? ამ კითხვაზე პასუხს გვაძლევს ფიზიკის დარგი, რომელსაც სტატისტიკური ფიზიკა ეწოდება.

ცხადია, იმ ფიზიკური სიდიდეების გამოთვლის დროს რომლებიც მილიარდი ნაწილაკებისგან შემდგარი სისტემის თვისებებს ახასიათებენ, სრულიად აუცილებელია ახალი მიდგომა. შეუძლებელიც რომ არ იყოს, უაზრობა იქნებოდა თვალი გვედევნებინა ყველა ნაწილაკის მოძრაობისათვის და ეს მოძრაობა მექანიკის ფორმულების საშუალებით აგვეწერა. მაგრამ ნაწილაკთა სწორედ ეს უზარმაზარი რაოდენობა გვაძლევს საშუალებას სხეულების შესწავლისათვის ახალი „სტატისტიკური" მეთოდები გამოვიყენოთ. ეს მეთოდები ფართოდ სარგებლობენ მოვლენის ალბათობის ცნებით. სტატისტიკურ ფიზიკას საფუძველი ჩაუყარა შესანიშნავმა ავსტრიელმა ფიზიკოსმა ლუდვიგ ბოლცმანმა (1844—1906). ნაშრომთა სერიაში ბოლცმანმა გვიჩვენა, თუ რა სახით შეიძლება აღნიშნული პროგრამის განხორციელება გაზებისათვის.

1877 წელს ამ გამოკვლევათა ლოგიკური დაგვირგვინება იყო თერმოდინამიკის მეორე საწყისის სტატისტიკური განმარტება. ფორმულა, რომელიც აკავშირებს ენტროპიასა და სისტემის მდგომარეობის ალბათობას, ამოკვეთილია ბოლცმანის ძეგლზე.

ძნელია ბოლცმანის სამეცნიერო ღვაწლის გადაფასება. მან თეორიულ ფიზიკაში სრულიად ახალი გზები იპოვნა. ბოლცმანის გამოკვლევებს მეცნიერის სიცოცხლეში დასცინოდა გერმანიის კონსერვატიული პროფესურა: ატომური და მოლეკულური წარმოდგენები იმ დროს ბევრს გულუბრყვილოდ და არამეცნიერულად მიაჩნდა. ბოლცმანმა თავი მოიკლა და ამ აქტში, უდავოდ, მნიშვნელოვანი როლი შეასრულა გარემოცვამ.

სტატისტიკური ფიზიკის შენობა გამოჩენილმა ამერიკელმა ფიზიკოსმა ჯოზაია უილარდ გიბსმა (1839—1903) დაასრულა. მან განაზოგადა ბოლცმანის მეთოდები და გვიჩვენა, როგორ უნდა მიგვეყენებინა სტატისტიკური მეთოდი ყველა სხეულისათვის.

გიბსის უკანასკნელი ნაშრომი XX საუკუნის დასაწყისში გამოვიდა. ძალზე თავმდაბალი მკვლევარი თავის ნაშრომებს პატარა პროვინციული უნივერსიტეტის ჟურნალში ბეჭდავდა. კარგა ხანმა გაიარა, ვიდრე მისი შესანიშნავი გამოკვლევები ყველა ფიზიკოსისათვის გახდებოდა ცნობილი.

სტატისტიკური ფიზიკა გვიჩვენებს გზას, როგორ უნდა გამოვთვალოთ ნაწილაკთა მოცემული რიცხვისაგან შემდგარი სხეულების თვისებები. რასაკვირველია, არ უნდა ვიფიქროთ, რომ ეს გამოთვლის მეთოდები ყოვლისშემძლეა. თუ ატომების სხეულში მოძრაობა მეტისმეტად რთულია, როგორც, მაგალითად, სითხეებში, მაშინ რეალური გამოთვლა პრაქტიკულად განუხორციელებელი ხდება.

სიმძლავრე

იმაზე, თუ რა მუშაობის შესრულება შეუძლია მანქანას, აგრეთვე დახარჯულ მუშაობაზე მსჯელობისას სიმძლავრის ცნებით სარგებლობენ. სიმძლავრე დროის ერთეულში შესრულებული მუშაობაა.

სიმძლავრის გასაზომად ბევრი სხვადასხვა ერთეული არსებობს. CGS სისტემას შეესაბამება სიმძლავრის ერთეული ერგ/წმ. მაგრამ 1 ერგ/წმ მეტისმეტად უმნიშვნელო სიმძლავრეა და ამიტომაც პრაქტიკისათვის ეს ერთეული მოუხერხებელია. ბევრად უფრო გავრცელებულია სიმძლავრის ერთეული, რომელიც მიიღება ჯოულის წამზე გაყოფის შედეგად. ამ ერთეულს ვატი (ვტ) ეწოდება. 1 ვტ $=$ 1 ჯ/წმ $= 10^7$ ერგ/წმ.

თუ ეს ერთეულიც მცირეა, მას ათასზე ამრავლებენ და კილოვატით სარგებლობენ.

ძველ დროთაგან მემკვიდრეობით მივიღეთ სიმძლავრის ერთეული, რომელსაც ცხენის ძალა ეწოდება. ოდესღაც,

ტექნიკის განვითარების განთიადზე, ამ სახელწოდებას ღრმა აზრი ჰქონდა. 10 ცხენის ძალის მქონე მანქანა 10 ცხენს შესცვლისო — ასე ფიქრობდა მყიდველი, თუნდაც სიმძლავრის ერთეულებზე სულაც არ ჰქონდა წარმოდგენა.

რასაკვირველია, ცხენიც არის და ცხენიც. სიმძლავრის პირველი ერთეულის ავტორს მიაჩნდა, რომ „საშუალო" ცხენს შეუძლია ერთ წამში 75 კგმ მუშაობის შესრულება. სწორედ ასეთი ერთეულია მიღებული: 1 ც. ძ. = 75 კგმ/წმ.

საჯაგავ ცხენებს მეტი მუშაობის შესრულება შეუძლიათ, განსაკუთრებით ადგილიდან დაძვრის მომენტში. მაგრამ საშუალო ცხენის სიმძლავრე $^1/_2$ ცხენის ძალასთან უფრო ახლოა.

ცხენის ძალებს კილოვატებში თუ გადავიყვანთ, მივიღებთ: 1 ც. ძ. = 0,735 კვტ.

ყოველდღიურ ცხოვრებასა და ტექნიკაში სულ სხვადასხვა სიმძლავრის ძრავებს ვხვდებით. პატეფონის მოტორის სიმძლავრეა 10 ვტ, ავტომანქანა „ვოლგის" სიმძლავრეა 75 ც. ძ. = 55 კვტ, სამგზავრო თვითმფრინავის ილ-18 ძრავების სიმძლავრეა 16.000 ც. ძ. მცირე საკოლმეურნეო ელექტროსადგურს აქვს 100 კვტ სიმძლავრე. ამ მხრივ რეკორდულ კრასნოიარსკის ჰესს ექნება 5 მლნ კვტ სიმძლავრე.

სიმძლავრის ეს ერთეულები ენერგიის კიდევ ერთ ერთეულს — სახელდობრ კილოვატ-საათს გვიკარნახებენ, რომელიც კარგად არის ცნობილი ყველგან, სადაც ელექტროენერგიის მთვლელებია დადგმული. ერთი კილოვატ-საათი არის ერთი კილოვატი სიმძლავრით ერთი საათის განმავლობაში შესრულებული მუშაობა. ადვილია ამ ახალი ერთეულის გამოსახვა სხვა, უკვე ნაცნობი ერთეულების საშუალებით: 1კვტ-სთ = $3{,}6 \cdot 10^6$ ჯ = 861 კკალ = 367.000 კგმ. მკითხველმა შეიძლება იკითხოს: რა საჭირო იყო ენერგიის კიდევ ერთი ერთეული? ერთეულები ხომ ისედაც ბევრია! მაგრამ ენერგიის ცნებას იყენებენ ფიზიკის სხვადასხვა დარგში და ფიზიკოსები ამა თუ იმ დარგისათვის შესაფერის სულ ახალ-ახალ ენერგიის ერთეულებს ამკვიდრებდნენ. ბოლოს და ბოლოს, ამან მიგვიყვანა დასკვნამდე, რომ საჭიროა ფიზიკის ყველა დარგისათვის ენერგიის საერთო ერთეულის შემოღება, რაც

სწორედ ერთეულთა ახალი სისტემის სი-ს საშუალებით გაკეთდა (იხ. გვ. 15). მაგრამ ჯერ კიდევ ბევრი დრო გავა, ვიდრე „ძველი" ერთეულები ბედნიერ რჩეულს დაუთმობენ ადგილს, და ამიტომ ჯერჯერობით კილოვატ-საათი არ არის ენერგიის უკანასკნელი ერთეული, რომელსაც ფიზიკის შესწავლის პროცესში გავეცნობით.

მარგი ქმედების კოეფიციენტი

სხვადასხვა მანქანის საშუალებით ენერგიის წყაროები შეიძლება ვაიძულოთ სხვადასხვა სამუშაო შეასრულონ — ასწიონ ტვირთი, ამოძრაონ დაზგები, გადაიტანონ ტვირთი და გადაიყვანონ ხალხი.

შეიძლება გამოვითვალოთ მანქანისათვის გადაცემული ენერგიის რაოდენობა და მისგან მიღებული მუშაობის მნიშვნელობა. ყველა შემთხვევაში რიცხვი გამოსასვლელთან უფრო ნაკლები აღმოჩნდება, ვიდრე შესასვლელთან, — ენერგიის ნაწილი მანქანაში იკარგება.

ენერგიის ნაწილს, რომელიც მთლიანად იხარჯება მანქანაში ჩვენთვის საჭირო მიზნებისათვის, მანქანის მარგი ქმედების კოეფიციენტი (მქკ) ეწოდება. მქკ მნიშვნელობები ჩვეულებრივ პროცენტებში მოჰყავთ ხოლმე.

თუ მქკ 90% ტოლია, ეს იმას ნიშნავს, რომ მანქანა ენერგიის მხოლოდ 10% კარგავს. მქკ 10% ნიშნავს, რომ მანქანა იყენებს მის მიერ მიღებული ენერგიის მხოლოდ 10%.

თუ მანქანა მექანიკურ ენერგიას მუშაობად გარდაქმნის, მისი მქკ პრინციპში შეიძლება ძალიან გავზარდოთ. მქკ გადიდება ამ შემთხვევაში გარდუვალი ხახუნის ძალების წინააღმდეგ ბრძოლით შეიძლება. უნდა გაუმჯობესდეს საპოხი, გაკეთდეს უფრო სრულყოფილი საკისრები, შემცირდეს წინააღმდეგობა იმ გარემოს მხრივ, რომელშიაც მოძრაობა სრულდება — აი რა საშუალებებია საჭირო, რომ მქკ ერთს (100%) მიუახლოვდეს.

ჩვეულებრივ, მექანიკური ენერგიის მუშაობად გარდაქმნისას საშუალედო ეტაპად (როგორც, მაგალითად, ჰიდრო-

ელექტროსადგურებში) იყენებენ ელექტრულ გადაცემას. რა-საკვირველია, აქაც გვაქვს დამატებითი დანაკარგი. მაგრამ ეს დანაკარგები დიდი არ არის, და მექანიკური ენერგიის მუშა-ობად გარდაქმნისა და ელექტრული გადაცემის გამოყენების შემთხვევაში შეიძლება რამდენიმე პროცენტამდე დავიყვა-ნოთ.

სულ სხვაგვარად არის საქმე, როდესაც მანქანა ნივთიერე-ბის ქიმიურ ენერგიას იყენებს.

დღემდე არ არსებობს დიდი მასშტაბით მომუშავე ისეთი მანქანები, რომლებიც საწვავის ენერგიას უშუალოდ მექა-ნიკურ ან ელექტრულ ენერგიად გარდაქმნიდნენ. ამიტომაც აუცილებელია ქიმიური ენერგიის სითბურში გარდაქმნის სა-შუალედო ეტაპი. საწვავი ნივთიერებისაგან მუშაობის მისაღე-ბად იგი უნდა დაიწვას და რაიმე მოცულობის შიგნით (ღუ-მელში) შეიქმნას მაღალი ტემპერატურა. სითბური მანქანა სწორედ ღუმელისა და გარემომცველი გარემოს ტემპერატუ-რათა სხვაობაზე მუშაობს. იგი ართმევს სითბური ენერგიის ნაკადის ნაწილს და მას მუშაობად გარდაქმნის. მაგრამ მხო-ლოდ ნაკადის ნაწილს და არავითარ შემთხვევაში მთელ ნა-კადს.

თუ ტემპერატურათა სხვაობა დიდი არ არის, მაშინ ხერ-ხდება ენერგიის მხოლოდ პატარა ნაკადულის გვერდზე გა-დაგდება, ხოლო გარემოს ტემპერატურის პირობებში წყარო-სათვის სითბოს გამორთმევა სრულებით შეუძლებელია. თუ ტემპერატურათა სხვაობა დიდია, მაშინ შეიძლება სითბოს ნა-კადის გაცილებით უფრო არსებითი ნაწილი გარდაიქმნას მუ-შაობად.

სითბური ენერგიის სასარგებლო გამოყენება მით მეტი წარმატებით შეიძლება, რაც უფრო მეტია სითბოს ნაკადის წყაროსა და გარემომცველი გარემოს ტემპერატურათა სხვა-ობა.

ტემპერატურათა ეს სხვაობა უდებს საზღვარს სითბური მანქანების გაუმჯობესების შესაძლებლობებს. თუნდაც უზრუნველვყოთ მანქანაში ყველა დანაკარგის ლიკვიდირება, შევქმნათ იდეალური საკისრები, ვისარგებლოთ ბუნებაში არარსებული იდეალური სითბოსაიზოლაციო და სითბოგამ-

ტარი მასალებით, მქკ მაინც არ გახდება ერთის ტოლი, იგი მხოლოდ გარკვეულ მაქსიმუმს მიაღწევს. მქკ-ის ეს ზღვრული მნიშვნელობა სითბოს ნაკადის მუშაობად გარდაქმნის დროს, თუ ნაკადი მოედინება T, ტემპერატურის მქონე გახურებული სხეულიდან T_0 ტემპერატურის მქონე გარემოსაკენ, ტოლია:

$$1-\frac{T_0}{T}.$$

მაგალითად, თუ სითბოს ნაკადის წყაროს 100°C ტემპერატურა აქვს, ხოლო გარემოს 20°C, მაშინ მქკ მაქსიმალური მნიშვნელობა ტოლი იქნება 1—293/373, ანუ დაახლოებით 20%. თუ წყაროს ტემპერატურა 1000° იქნება, მაშინ უკვე 76% მივიღებთ.

ცხადია, უნდა ვცდილობდეთ საწვავი ისე დავწვათ, რომ რაც შეიძლება მაღალი ტემპერატურა მივიღოთ.

ნათქვამიდან გასაგებია, რამდენად არახელსაყრელია სითბოს ნაკადის გამოყენება მექანიკური მუშაობის შესასრულებლად. საუკეთესო თანამედროვე გაზის ტურბინებში (იხ. 455 გვ.) მხოლოდ დახლოებით 45% ტოლი მქკ მიღწევა ხერხდება. ყველაზე უკეთესი იქნებოდა ქიმიური ენერგიის უშუალოდ მექანიკურ მუშაობად გარდაქმნა გვესწავლა, ისე რომ სითბური ენერგიისათვის გვერდი აგვევლო. ჩვენ ვიცით, რომ პრინციპში ასეთი პირდაპირი გარდაქმნისას შეიძლებოდა თავიდან აგვეცილებინა ენერგიის კარგვა. მაგრამ, როგორც უკვე ითქვა, ეს ამოცანა ტექნიკას ჯერ კიდევ არ გადაუწყვეტია.

ენერგიის წყაროები დედამიწის ზურგზე

ენერგიის ყველა წყარო ტოლფასი არ არის. ზოგი მხოლოდ პრინციპულ ინტერესს წარმოადგენს, სხვებთან ცივილიზაციის არსებობაა დაკავშირებული. ზოგი წყარო პრაქტიკულად ამოუწურავია. სხვები გამოილევა უახლოესი ასეული, ან კიდევ ათეული წლების შემდეგ.

უკვე რამდენიმე მილიარდი წელია, რაც თავის მაცოცხლებელ სხივებს გზავნის დედამიწაზე ჩვენი პლანეტების სის-

ტემის მთავარი მეურვე — მზე. ენერგიის ამ წყაროს თამამად შეიძლება ამოუწურავი ვუწოდოთ. დედამიწის ზედაპირის ყოველი კვადრატული მეტრი მზისაგან დაახლოებით 1,5 კვტ საშუალო სიმძლავრის ენერგიას ღებულობს; წელიწადში ეს დაახლოებით 10 მილიონ კილოკალორია ენერგიას შეადგენს — სითბოს ამ რაოდენობას ქვანახშირის რამდენიმე ასეული კილოგრამი იძლევა. რამდენ სითბოს ღებულობს მზისაგან მთელი დედამიწა? თუ გამოვთვლით დედამიწის ფართს და გავითვალისწინებთ დედამიწის ზედაპირის არათანაბარ განათებას მზის სხივებით, მივიღებთ დაახლოებით 10^{14} კვტ. ეს 100 ათასჯერ მეტია იმ ენერგიაზე, რასაც ენერგიის ყველა წყაროსგან ღებულობს დედამიწაზე ყველა ფაბრიკა, ქარხანა, ელექტროსადგური, ავტომობილისა და თვითმფრინავის მოტორი, მოკლედ — 100 ათასჯერ მეტია იმ ენერგიის სიმძლავრეზე, რასაც ხარჯავს მთელი დედამიწის მოსახლეობა (ეს ენერგია მილიარდი კილოვატის რიგისაა).

მაგრამ, მიუხედავად მრავალი პროექტისა, მზის ენერგიას მაინც უმნიშვნელო რაოდენობით იყენებენ. მართალია, ჩვენმა გამოთვლამ უზარმაზარი რიცხვი მოგვცა, მაგრამ ენერგიის ეს რაოდენობა ხომ დედამიწის მთელ ზედაპირს ხვდება: მიუვალი მთების ფერდობებსაც, ოკეანეებსაც დედამიწის ზედაპირის უდიდესი ნაწილი რომ უჭირავთ, და უკაცრიელი უდაბნოს ქვიშებსაც.

გარდა ამისა, არცთუ ისე დიდია მცირე ფართზე მოხვედრილი ენერგიის რაოდენობა. თანაც საეჭვოა, რომ ხელსაყრელი იყოს ენერგიის ისეთი მიმღებების შექმნა, რომლებიც კვადრატული კილომეტრების ფართს დაიკავებენ. ბოლოს, ცხადია, რომ მზის ენერგიის სითბოდ გარდაქმნას აზრი აქვს ისეთ ადგილებში, სადაც ბევრი მზიანი დღეა.

მზის ენერგიის პირდაპირი გამოყენებისადმი ინტერესი უკანასკნელ ხანებში რამდენადმე გაძლიერდა იმასთან დაკავშირებით, რომ გაჩნდა მზის ენერგიის უშუალოდ ელექტრულში გარდაქმნის შესაძლებლობა. ასეთი შესაძლებლობა, ცხადია, ფრიად სახარბიელოა. მაგრამ აქამდე იგი მხოლოდ უმნიშვნელო მასშტაბით არის რეალიზებული.

შედარებით ცოტა ხნის წინათ აღმოაჩინეს მზის ენერგიის აკუმულატორი ჩვენს ზემოთ — ატმოსფეროს მაღალ ფენებში. აღმოჩნდა, რომ დედამიწის ზედაპირიდან 150-200 კმ სიმაღლეზე ჟანგბადი მზის სხივების გავლენით დისოცირებულ მდგომარეობაში იმყოფება: მისი მოლეკულები ატომებად არის დაშლილი. ამ ატომების ჟანგბადის მოლეკულებად გაერთიანებისას შეიძლება გამოიყოს 118 კკალ/მოლ ენერგია. როგორია ამ ენერგიის საერთო მარაგი? 50 კმ სისქის ფენაში აღნიშნულ სიმაღლეზე დაგროვილია 10^{13} კკალ ენერგია — იმდენი, რამდენიც თავისუფლდება რამდენიმე მილიონი ტონა ქვანახშირის სრული წვის დროს. სსრ კავშირში ქვანახშირის ამ რაოდენობას რამდენიმე დღეში იღებენ. თუმცა დიდ სიმაღლეებზე დისოცირებული ჟანგბადის ენერგია განუწყვეტლივ ივსება, ჩვენ აქ კვლავ მცირე კონცენტრაციის პრობლემას ვხვდებით: ამ ენერგიის პრაქტიკული გამოყენებისთვის მოწყობილობის გამოგონება არც ისე ადვილია.

დავუბრუნდეთ ენერგიის წყაროებს. დედამიწის ატმოსფეროს ჰაერის მასები განუწყვეტლივ მოძრაობენ. ციკლონები, გრიგალები, გამუდმებით მქროლი პასატური ქარები, მსუბუქი ბრიზები — მრავალგვარია ჰაერის ნაკადების ენერგიის გამოვლინება. ქარის ენერგიას ჯერ კიდევ ძველად იყენებდნენ იალქნიანი ხომალდებისა და ქარის წისქვილების ასამოძრავებლად. მთელი დედამიწის ჰაერის ნაკადების სრული საშუალო წლიური სიმძლავრე ტოლია არც მეტი არც ნაკლები 100 მლრდ კვტ-ისა.

მაგრამ დიდ იმედებს ნუ დავამყარებთ ქარზე, როგორც ენერგიის წყაროზე. გარდა იმისა, რომ ეს წყარო საიმედო არ არის — რამდენი უბედურება და იმედგაცრუება მოჰყოლია უქარო ამინდს იალქნიანი ხომალდების დროს, — მას იგივე ნაკლი აქვს, რაც მზის ენერგიას: ფართის ერთეულზე გამოყოფილი ენერგია შედარებით მცირეა; ქარის ტურბინის ფრთების ზომა, თუკი მას საქარხნო მასშტაბით ენერგიის საწარმოებლად დავამზადებთ, პრაქტიკულად განუხორციელებელი სიდიდისა უნდა იყოს. ასეთივე არსებით ნაკლს წარმოადგენს ქარის ძალის უთანაბრობა. ამიტომაც ქარის ენერგიას ან, როგორც მას პოეტურად ცისფერ ნახშირს უწოდე-

ბენ — იყენებენ მხოლოდ მცირე ძრავებში — „ქარძრავებში". ქარის დროს ისინი იძლევიან ელექტროენერგიას სასოფლო-სამეურნეო მანქანებისათვის, ანათებენ სახლებს. თუ ენერგიის ნაჭარბი წარმოიქმნება, იგი ინახება აკუმულატორებში (ასე ეწოდება ელექტროენერგიის საცავებს). ეს ნაჭარბი შეიძლება უქარო ამინდშიც გამოვიყენოთ. რასაკვირველია, ქარძრავაზე დანდობა არ შეიძლება — მას მხოლოდ დამხმარე ძრავის როლის შესრულება შეუძლია.

ენერგიის უფასო წყაროს წარმოადგენს აგრეთვე მოძრავი წყალი — ოკეანეთა მოქცევის ტალღა, რომელიც განუწყვეტლივ მოძრაობს ხმელეთისკენ, და მდინარეთა წყლის ნაკადები, რომლებიც ზღვებისა და ოკეანეებისაკენ მიედინება.

დედამიწის ყველა მდინარის სიმძლავრე მილიარდი კილოვატებით იზომება, მაგრამ ჯერჯერობით მხოლოდ 40 მლნ კვტ, ანუ 1% რიგის სიმძლავრეა გამოყენებული. სსრ კავშირის მდინარეების პოტენციალური სიმძლავრე 400 მლნ კვტ აღწევს, აქედან კი ჯერჯერობით გამოყენებულია მხოლოდ 20 მლნ კვტ.

ქვანახშირი, ნავთობი და ენერგიის სხვა წყაროები რომ ამოიწუროს და მხოლოდ თეთრ ნახშირზე — მდინარეების ენერგიაზე გადავიდეთ, მაშინ ამ ენერგიის სრული გამოყენების შემთხვევაში (თუ ვიგულისხმებთ, რომ აიგება ყველა შესაძლო ჰიდროელექტროსადგური დედამიწის ყველა მდინარეზე) აუცილებელი გახდება ენერგიის ხარჯვის შემცირება. ენერგიის ხარჯვა დედამიწაზე ამჟამად ერთ მილიარდ კილოვატს აღემატება — მხოლოდ ჰიდროენერგია კაცობრიობას ახლაც კი ძლივძლივობით ეყოფოდა.

კი მაგრამ მოქცევის ტალღა? მისი ენერგია ხომ ფრიად მნიშვნელოვანია, თუმცა მდინარეების ენერგიაზე დაახლოებით ათჯერ ნაკლებია. ამ ენერგიას ჯერჯერობით უმნიშვნელოდ იყენებენ: მოქცევათა პულსაციური ხასიათი აძნელებს მის გამოყენებას. თუმცა საბჭოთა და ფრანგმა ინჟინრებმა გამოძებნეს პრაქტიკული გზები ამ სიძნელის გადასალახავად. ამჟამად მოქცევის ელექტროსადგური უზრუნველყოფს გარანტირებული სიმძლავრის გაცემას მაქსიმალური ხარჯვის სა-

ათებში. საფრანგეთში აგებულია და უკვე მუშაობს საცდელი „მესი“ სენ მალო, ხოლო საბჭოთა კავშირში აშენდა სადგური კისლაია გუბაში, მურმანსკის რაიონში. ამ გამოცდილების საფუძველზე აიგება მომავალში თეთრი ზღვის ლუმბოვისა და მეზენის უბეებში მძლავრი ელექტროსადგურები, რომელთა დაპროექტება უკვე დაწყებულია. საფრანგეთში უკვე კარგახანია ამუშავდა 240 ათასი კვტ სიმძლავრის მოქცევის სადგური.

ოკეანეების წყალს დიდ სიღრმეზე აქვს ზედაპირული ფენების ტემპერატურისაგან 10—12-ით განსხვავებული ტემპერატურა. მაშასადამე, შეიძლება სითბური მანქანის აგება, რომლისთვისაც საშუალო განედებზე გამათბობლის როლს წყლის ზედა ფენა შეასრულებდა, ხოლო მაცივრისას — სიღრმის ფენა. ასეთი მანქანის მქკ 1—2% იქნება. მაგრამ ესეც, რასაკვირველია, ენერგიის მეტად არაკონცენტრირებული წყაროა.

მზე, ჰაერი და წყალი ენერგიის უფასო წყაროებია [1]. უფასო იმ აზრით, რომ მათი ენერგიიის გამოყენება არ იწვევს დედამიწაზე არსებულ ნებისმიერ ფასეულობათა შემცირებას. ქარძრავების მუშაობა არ ამცირებს ჰაერის რაოდენობას დედამიწის ზურგზე, ჰიდროელექტროსადგურების მუშაობა არ ამცირებს მდინარეების სიღრმეს, არ იხარჯება დედამიწაზე არსებული ნივთიერებების მარაგი აგრეთვე მზის მანქანების მუშაობის დროსაც.

ამ აზრით აქამდე აღწერილ ენერგიის წყაროებს დიდი უპირატესობა აქვთ სათბობთან შედარებით. სათბობი იწვება. ქვანახშირის, ნავთობის, ხის ენერგიის გამოყენება დედამიწის ფასეულობათა აუნაზღაურებელი განადგურებაა. ძალიან მიმზიდველი იქნებოდა ფოტოქიმიური ძრავის განხორციელება, ე. ი. ენერგიის მიღება ფოტოსინთეზის მექანიზმის საშუალებით. ასეთი ძრავა უზრუნველჰყოფს სათბობის ენერგიის დაგროვებას. ნებისმიერი მცენარის მწვანე ფოთოლი ქარხანაა, რომელიც წყლისა და ნახშირმჟავა გაზის მოლეკულე-

---

[1] რასაკვირველია, მზე არ შეიძლება გავათანაბროთ ენერგიის სხვა წყაროებთან. საბოლოო ანგარიშში მთელი ენერგია მზისგან მიიღება.

ბისაგან, მზის სხივების ენერგიის წყალობით, იმუშავებს ორგანულ ნივთიერებებს და აგროვებს ენერგიის დიდ მარაგს მოლეკულებში. აღნიშნულ პროცესს მცენარეებში მცირე მქკ აქვს ($\approx 1\%$), მაგრამ ამ პირობებშიც კი მცენარეების მიერ ყოველწლიურად დაგროვილი ენერგია $2 \cdot 10^{15}$ კვტ-სთ ტოლია, ანუ რამდენიმე ასეულჯერ აღემატება მთელი მსოფლიოს ელექტროსადგურების წლიურ გამომუშავებას. ფოტოსინთეზის მექანიზმი ჯერ კიდევ არ არის ამოცნობილი ბოლომდე, თუმცა ეჭვი არ გვეპარება, რომ მომავალში მოხერხდება არა მარტო ფოტოსინთეზის ხელოვნურ პირობებში განხორციელება, არამედ ამასთან მისი მქკ გადიდებაც. მაგრამ ამ დარგში ადამიანი ჯერ ვერ შეეჯიბრება ბუნებას, იგი იძულებულია მისი ძღვენით ისარგებლოს და დაწვას შეშა, ნავთობი, ნახშირი.

როგორია სათბობის მარაგი დედამიწის ზურგზე? ჩვეულებრივ სათბობს, ე. ი. ისეთს, რომელიც ცეცხლის წაკიდებით იწვის, მიეკუთვნება ქვანახშირი და ნავთობი. მათი მარაგი დედამიწაზე ძალიან მცირეა. ნავთობის თანამედროვე ხარჯვის პირობებში მისი დაზვერილი მარაგი უკვე მომავალი ათასწლეულის დასაწყისისათვის გამოილევა. ქვანახშირის მარაგი შედარებით მეტია. ნახშირის რაოდენობას დედამიწაზე გამოსახავენ ათი ათასი მილიარდი ტონით. ერთი კილოგრამი ქვანახშირი წვისას იძლევა 7.000 კკალ სითბოს. ამრიგად, ქვანახშირის საერთო ენერგეტიკული მარაგი გაიზომება 10^{20} კკალ რიგის რიცხვით. ეს რამდენიმე ათასჯერ აღემატება ენერგიის წლიურ დანახარჯს.

ათასი წლის სამყოფი ენერგიის მარაგი ძალიან მცირედ უნდა ჩაითვალოს. ათასი წელი ბევრია მხოლოდ ადამიანის სიცოცხლის ხანგრძლივობასთან შედარებით, ხოლო ადამიანის სიცოცხლე უმნიშვნელო წამია დედამიწის ცხოვრებასა და ცივილიზებული სამყაროს არსებობასთან შედარებით. გარდა ამისა, ენერგიის ხარჯვა მოსახლეობის ერთ სულზე განუწყვეტლივ იზრდება. ამიტომაც, სათბობის მარაგი ნავთობითა და ქვანახშირით რომ ამოიწურებოდეს, საქმის ვითარება დედამიწაზე ენერგეტიკული მარაგის თვალსაზრისით კატასტროფულად უნდა ჩაგვეთვალა.

ჩვენი საუკუნის ორმოციანი წლების დასაწყისში დამტკიცდა საწვავის სრულიად ახალი სახეობის — ბირთვული საწვავის პრაქტიკული გამოყენების შესაძლებლობა. ჩვენ ბირთვული საწვავის მნიშვნელოვანი მარაგი გვაქვს.

აქ არ არის იმის ადგილი, რომ ატომისა და მისი გულის — ატომის ბირთვის აღნაგობაზე შევჩერდეთ, ან აღვწეროთ, როგორ მიიღება ატომის ბირთვიდან შინაგანი ენერგია. ბირთვული ენერგიის გამოყოფა მხოლოდ მნიშვნელოვან მასშტაბებში ხორციელდება, ეგრეთ წოდებულ ატომის ელექტროსადგურებში. ბირთვული ენერგია გამოიყოფა სითბოს სახით, რომელსაც სრულიად ისევე იყენებენ, როგორც ქვანახშირზე მომუშავე ელექტროსადგურებში მიღებულ სითბოს.

ამჟამად სამრეწველო მასშტაბებით ორი ელემენტიდან შეგვიძლია ენერგიის გამოყოფა — ურანიდან და თორიუმიდან. ბირთვული საწვავის თავისებურება, რაც მის ძირითად ღირსებას წარმოადგენს, ენერგიის განსაკუთრებით დიდი კონცენტრირებულობაა. ბირთვული საწვავის ერთი კილოგრამი გამოჰყოფს ენერგიას, რომელიც 2,5 მილიონჯერ აღემატება ერთი კილოგრამი ქვანახშირის მიერ გამოყოფილ ენერგიას. ამიტომაც, მიუხედავად ამ ელემენტების სიმცირისა, ენერგეტიკულად გამოსახული მათი მარაგი დედამიწის ზურგზე საკმაოდ მნიშვნელოვანია. სავარაუდო გამოანგარიშება გვიჩვენებს, რომ ბირთვული საწვავის მარაგი გაცილებით მეტია ქვანახშირის მარაგზე. მაგრამ ურანისა და თორიუმის საწვავად გამოყენება არ წყვეტს კაცობრიობის ენერგეტიკული შიმშილისაგან განთავისუფლების პრინციპულ ამოცანას — მინერალების მარაგი დედამიწის ქერქში განსაზღვრულია.

მაგრამ ახლავე შეიძლება მივუთითოთ ენერგიის ჭეშმარიტად უსაზღვრო მარაგზე. აქ იგულისხმება ეგრეთ წოდებული თერმობირთვული რეაქციები. ისინი შესაძლებელია მხოლოდ ზემაღალი, ოცი მილიონი გრადუსის რიგის ტემპერატურის პირობებში. ასეთი ტემპერატურა კი ჯერჯერობით მხოლოდ ატომური აფეთქებების დროს მიიღება.

ამჟამად მკვლევართა წინაშე დგას ამოცანა, მაღალი ტემპერატურა მიიღონ არა აფეთქების გზით. პირველი ცდები

მილიონი გრადუსი ტემპერატურის მიღებისა წარმატებით დამთავრდა.

თუ ფიზიკოსები შეძლებენ გამოიყენონ არააფეთქების გზით მიღებული ათეული მილიონი გრადუსების ტოლი აუცილებელი ტემპერატურა, მაშინ წყალბადის ატომის ბირთვების შეერთების მართველი რეაქცია (სწორედ მას ეწოდება თერმობირთვული) შესაძლებელი გახდება. ამ რეაქციის დროს კილოგრამ საწვავზე უზარმაზარი ენერგია გამოიყოფა. იმისათვის, რომ ამჟამად კაცობრიობა უზრუნველყოფილი იყოს ენერგიით ერთი წლის ვადით, საკმარისი იქნება გამოიყოს თერმობირთვული ენერგია ათეული მილიონი ტონა წყლის გადამუშავებით.

მსოფლიო ოკეანეში თერმობირთვული ენერგიის ისეთი მარაგია, რომ იგი საკმარისია კაცობრიობის ყველა ენერგეტიკული ხარჯის დასაფარავად მზის სისტემის ასაკზე მეტი დროის განმავლობაში. აი სწორედ ეს არის ენერგიის ნამდვილად ულევი მარაგი.

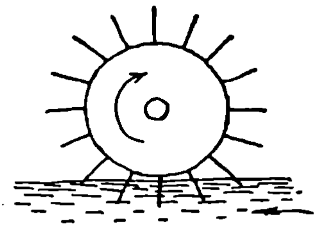
ძრავები

XX საუკუნის ადამიანი მიჩვეულია სხვადასხვაგვარი ძრავით სარგებლობას, რომლებიც მის მაგიერ უზარმაზარ სამუშაოს ასრულებენ, აადვილებენ შრომას, აათკეცებენ ადამიანის ძალას.

დღემდე ბევრი ქვეყნის სოფლის მეურნეობაში იყენებენ ქარის წისქვილებს. ეს უმარტივესი ძრავა, რომელიც ქარის ენერგიას იყენებს, უკვე მრავალი საუკუნის განმავლობაში ემსახურება ადამიანს. ასეთი ძრავის ფრთა ბრტყელია და ქარის მიმართულებისადმი გარკვეული კუთხით დგას. ჰაერის ნაკადი წრიულად განლაგებულ ფრთებს ეცემა და აბრუნებს ბორბალს.

ცხადია, ქარის ძრავა შეიძლება შევაბრუნოთ: თუ მას რაიმე მოტორი აბრუნებს, ფრთები შექმნიან ჰაერის მძლავრ ნაკადს ბრუნვის ღერძის მიმართულებით. თუ ასეთი სისტემა მოთავსებულია გლისერზე, თვითმფრინავსა ან შეეულმფრენ-

ზე, მაშინ ჩვენ მას საჰაერო ხრახნს ვუწოდებთ. ხრახნის მიერ გატყორცნილი ნაკადის რეაქცია ეწევა გლისერს ან თვითმფრინავს და ქმნის შეუღლმფრენის ამწევ ძალას.



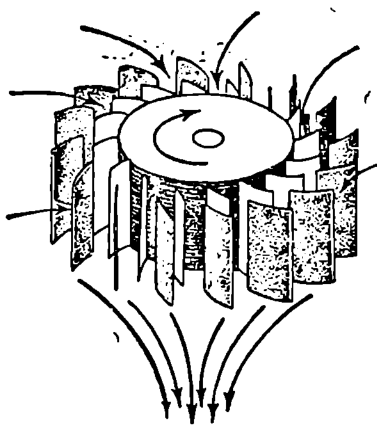
ნახ. 133.

საფიქრებელია, რომ პირველი ძრავა, რომელიც ადამიანმა თავისი საჭიროებისათვის გამოიყენა, იყო წყლის (ჰიდრავლიკური) ტურბინა მისი ყველაზე უფრო პრიმიტიული მოდიფიკაციის — წყლის ბორბლის სახით.

133-ე ნახატზე გამოსახულია ეგრეთ წოდებული წყლის ბორბალი. წყალში ჩაშვებულ ბორბლის ფრთას ეჯახება წყლის ნაკადი და გადასცემს მას თავისი კინეტიკური ენერგიის ნაწილს. ფრთა იწყებს მოძრაობას და რადგანაც ის მყარად არის ბორბალზე დამაგრებული, ბორბალიც ბრუნავს. მაგრამ მაშინვე შეატყობთ, რომ დროის ყოველ მომენტში ნაკადისადმი პერპენდიკულარულად შეიძლება მხოლოდ ერთი ფრთა იყოს გაჩერებული. დანარჩენები მომდინარე ნაკადთან მახვილ კუთხეებს ქმნიან და მისგან ნაკლებ ენერგიას ღებულობენ, ვიდრე პერპენდიკულარული ფრთა. ასეთი ბორბლის მარგი ქმედების კოეფიციენტი დიდი არ არის. მისი გადიდების გზა ნათელია: ისე უნდა მოვაწყოთ, რომ ბორბლის ყველა ფრთა მომდინარე ნაკადისადმი პერპენდიკულარულად იდგეს. ამ იდეის განხორციელება ხერხდება მიმმართველი აპარატის დახმარებით. 134-ე ნახატიდან ცხადია, რომ ამ შემთხვევაში ტურბინის წარმატებით მუშაობისათვის საჭიროა არსებობდეს წყლის დონეთა სხვაობა. ჩვენ მივდივართ თანამედროვე ჰიდროელექტროსადგურის სქემასთან, რომლის მძლავრი კაშხალიც უზარმაზარი ძალით ახეთქებს წყლის მასებს ტურბინის ფრთებს. თანამედროვე საინჟინრო ხელოვნების მაღალ დონეზე შესრულებული ჰიდრავლიკური ტურბინები დაპროექტებულია სიმძლავრეებისათვის, რომლებიც 100.000 კვტ აღემატება და ამასთან აქვთ 95% ტოლი მქკ. იმის გამო, რომ ეს სიმძლავრეები მიიღება საკმაოდ მცირე ბრუნვათა რიცხვით (წუთში 100 რიგის), ახალაგებული ჰიდ-

რავლიკური ტურბინები გაოცებას იწვევს თავისი ზომითა და წონით. მაგალითად, ლენინის სახ. ვოლგის ჰეს-ის ტურბინის მუშა ბორბლის სიმაღლე დაახლოებით 10 მ, წონა 420 ტ-ძ.

ტურბინის მნიშვნელოვანი უპირატესობაა წყლის გადატანითი მოძრაობის ბრუნვით მოძრაობად გარდაქმნის მეტისმეტი სიმარტივე. ამიტომ ამ პრინციპს ფართოდ იყენებენ ძრავებშიც, რომლებიც გარეგნულად სრულიად არ მოგვაგონებენ წყლის ბორბლებს. როდესაც ფრთებს ორთქლი აწვება, გვაქვს ორთქლის ტურბინა. ჩვენთვის უკვე ცნობილია, რომ მქკ



ნხ8. 134

გასადიდებლად აუცილებელია მომუშავე სხეულის ტემპერატურის გადიდება. თანამედროვე სითბურ ელექტროსადგურებზე (თეს) ტურბინებში უშვებენ ორთქლს, რომლის ტემპერატურაა 580°C და წნევა 240 ატმ. ასეთი ტურბინის მქკ თეორიული ზღვარი, თუ ჩავთვლით, რომ მაცივრის ტემპერატურა არის 20°C, ტოლია 66%. პრაქტიკულად მიიღება 42% ტოლი მქკ. ამრიგად, ორთქლის ტურბინები კარგი თანამედროვე ძრავებია. მათ აქვთ 300.000კვტ-მდე სიმძლავრე ერთ დანადგარში. ამგვარი ტურბინა საათში 900 ტ-მდე მაღალი წნევის ორთქლს ხარჯავს. მაგრამ ცხადია, ასეთი რაოდენობის ორთქლის მიღება რთული ტექნიკური ამოცანაა. მაღალი წნევის ორთქლის ქვაბები და საწვავის დამზადებისა და მიწოდების სისტემა თანამედროვე სითბური ელექტროსადგურის მოცულობის უმეტეს ნაწილს იკავებს. ამიტომაც სატრანსპორტო მიზნებით ორთქლის ტურბინებს მხოლოდ დიდ გემებზე — ტურბომავლებზე იყენებენ.

უკანასკნელ წლებში პრესაში ვხვდებით სიტყვა „ტურბო-

ელექტრომავალს". ამ სახელწოდების აზრი უბრალოდ ირკვევა: ასეთ გემზე ორთქლი ამოძრავებს ტურბინებს, ტურბინები თავის მხრივ — მუდმივი დენის მძლავრ გენერატორებს, ხოლო ხრახნები ელექტრომოტორების ლილვებზე თავსდება. ზედმეტად ხომ არ ვართულებთ საქმეს? რატომ არ შეიძლება ხრახნი პირდაპირ ტურბინის ლილვზე მოთავსდეს? აქ ჩვენ ახალ საკითხს ვხვდებით. ეს არის ძრავის წევის მახასიათებელი.

საქმე ისაა, რომ ორთქლის ტურბინა მაქსიმალურ სიმძლავრეს ანვითარებს მხოლოდ მკაცრად განსაზღვრული ბრუნვების რიცხვისათვის. მაგალითად, ჩვენი ელექტროსადგურების მძლავრი ტურბინები წუთში 3000 ბრუნს აკეთებენ. ბრუნვის შენელებისას სიმძლავრე მცირდება. ცხადია, ხრახნები პირდაპირ ტურბინის ლილვზე რომ იყვნენ, მაშინ ასეთი საძალო დანადგარის მქონე გემს სვლის მდარე თვისებები ექნებოდა. ხოლო მუდმივი დენის ელექტრომოტორს წევის იდეალური მახასიათებელი აქვს: რაც მეტია წინააღმდეგობის ძალები, მით მეტ წევის ძალვას ავითარებს ის, ამასთან ასეთ მოტორს შეუძლია დიდი სიმძლავრის მოცემა მცირე ბრუნვების დროს, ადგილიდან დაძვრის მომენტში.

ამრიგად, ტურბოელექტრომავლის ტურბინასა და ხრახნს შორის დაყენებული მუდმივი დენის გენერატორი და მოტორი ასრულებენ მაღალი ღირსებების მქონე უსაფეხურებო ავტომატურ გადაცემათა კოლოფის როლს. შეიძლება გვეჩვენოს, რომ ასეთი სისტემა მეტისმეტად დიდ ადგილს იკავებს, მაგრამ თანამედროვე ტურბოელექტრომავლების დიდი სიმძლავრეებისას ნებისმიერ სხვა სისტემას ასევე დიდი ადგილი დასჭირდებოდა და ნაკლებად საიმედო კი იქნებოდა.

ტურბოელექტრომავლის საძალო დანადგარი სხვა მხრივ შეიძლება მნიშვნელოვნად გაუმჯობესდეს: ფრიად ხელსაყრელია დიდი ზომის ორთქლის ქვაბები ატომური რეაქტორით შეიცვალოს. ამ შემთხვევაში მივიღებდით რეისში წასაღები საწვავის მოცულობის უზარმაზარ ეკონომიას.

მსოფლიოში გაითქვა სახელი პირველმა საბჭოთა ყინულმჭრელმა „ლენინმა". მისი ძრავების სიმძლავრე 44.000 ც. ძ. ტოლია. წყალწყვაა 16.000 ტ. ამ ტურბოელექტრომავლის

ბირთვული სამალო დანადგარი უზრუნველჰყოფს ცურვის ავტონომიურობას ერთ წელიწადზე მეტი ხნის განმავლობაში.

ამრიგად, ორთქლის ტურბინისათვის საჭიროა სითბოს ნაკადის მძლავრი გარეგანი წყარო. იქნება ეს ორთქლის ქვაბის საცეცხლე თუ ურანის რეაქტორი, — ტექნიკის განვითარების თანამედროვე დონეზე ამ წყაროებს იმდენად დიდი ზომა და წონა აქვთ, რომ ორთქლის ტურბინის დადგმა ავტომობილზე ან თვითმფრინავზე სრულიად არ არის მიზანშეწონილი: მეტისმეტად დიდი იქნება ერთ ცხენისძალაზე გაანგარიშებული ძრავისა და გამათბობლის წონა. ხომ არ შეიძლება თავიდან ავიცილოთ გარეგანი გამათბობელი და ტურბინის შიგნით გადავიტანოთ იგი?

ასეთი დანადგარი აგებულია და მას უკვე ფართოდ იყენებენ. ეს არის გაზის ტურბინა. იგი მუშაობს უშუალოდ მაღალი თბოუნარიანობის მქონე სათბობის წვის გახურებულ პროდუქტებზე. სწორედ ამით განისაზღვრება გაზის ტურბინის მნიშვნელოვანი უპირატესობა ორთქლის ტურბინასთან შედარებით და დიდი ტექნიკური სიძნელეები, რომლებიც დაკავშირებულია მისი საიმედო მუშაობის უზრუნველყოფასთან.

უპირატესობა აშკარაა: სათბობის საწვავი კამერა პატარა ზომისაა და შეიძლება ტურბინის გარსაცმის შიგნით მოთავსდეს, ხოლო, ვთქვათ, გაფრქვეული ნავთისა და ჟანგბადისაგან შემდგარი საწვავი ნარევის წვის პროდუქტებს ორთქლისათვის მიუღწეველი ტემპერატურა აქვთ. გაზის ტურბინაში წარმოქმნილი სითბოს ნაკადი ძალიან ინტენსიურია, რაც მაღალი მქკ მიღების საშუალებას იძლევა.

მაგრამ ამ უპირატესობებს ნაკლოვანებებიც ახლავს თან. ტურბინის ფოლადის ფრთები მუშაობს გაზის ნაკადში, რომლის ტემპერატურა 1200°C-მდეა და აუცილებლად სავსეა ნაცრის მიკროსკოპული ნაწილაკებით. ადვილი წარმოსადგენია, რა მაღალი მოთხოვნები უნდა წავუყენოთ მასალას, რომლისგანაც გაზის ტურბინები მზადდება. ხოლო მსუბუქი ავტომობილისათვის დაახლოებით 200 ც. ძ. სიმძლავრის გაზის ტურბინის აგების ცდისას უკვე სრულიად თავისებურ სიძნელეს ვაწყდებით: ტურბინა იმდენად მცირე ზომისა გა-

მოვიდა, რომ ჩვეულებრივი საინჟინრო გადაწყვეტა და ჩვეულებრივი მასალა სრულიად გამოუსადეგარი აღმოჩნდა. მაგრამ ეს ტექნიკური სიძნელეებიც დაძლიეს. გაზის ტურბინებიანი პირველი ექსპერიმენტული ავტომობილები გამოცდას გადიან.

უფრო ადვილი გამოდგა გაზის ტურბინის გამოყენება რკინიგზის ტრანსპორტზე. გაზის ტურბინიანი ლოკომოტივები — გაზტურბომავლები — უკვე ღებულობენ მოქალაქეობრივობის უფლებებს.

გაზის ტურბინას ფართო გზა მისცეს სულ სხვა ძრავებმაც, რომლებშიაც გაზის ტურბინა წარმოადგენს თუმცა აუცილებელ, მაგრამ მაინც დამხმარე შემადგენელ ნაწილს. ლაპარაკია ტურბორეაქტიულ ძრავაზე, რომელიც ამჟამად რეაქტიულ ავიაციაში ძრავის ძირითად ტიპს წარმოადგენს.

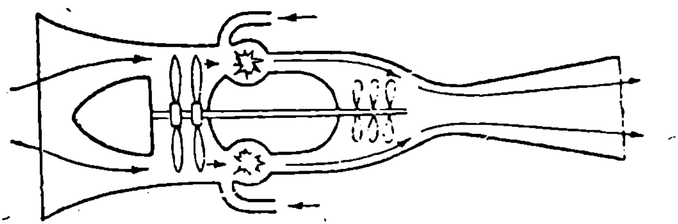
რეაქტიული ძრავის პრინციპი მეტად მარტივია. წვის მკვიდრ კამერაში იწვის საწვავი ნარევი; წვის პროდუქტები, რომლებსაც ძალიან დიდი სიჩქარე აქვთ (3000 მ/წმ — წყალბადის წვისას ჟანგბადში, საწვავის სხვა სახეებისათვის — რამდენადმე ნაკლები) გამოიტყორცნება თანდათან გაფართოებული საქშენიდან მოძრაობის საწინააღმდეგო მიმართულებით. წვის პროდუქტების შედარებით მცირე რაოდენობასაც კი ასეთი სიჩქარისას ძრავიდან დიდი იმპულსი მიაქვს.

რეაქტიული ძრავების შექმნით ადამიანმა მიიღო რეალური შესაძლებლობა განახორციელოს პლანეტებს შორის ფრენა.

ფართოდ გავრცელდა თხევადი საწვავით მომუშავე რეაქტიული ძრავები (თრძ). ასეთი ძრავის წვის კამერაში გარკვეული რაოდენობის საწვავს (მაგალითად, ეთილის სპირტს) და დამჟანგველს (ჩვეულებრივად, თხევად ჟანგბადს) შეაფრქვევენ. ნარევი იწვის, და ქმნის წევას. V-2 ტიპის მაღლივ რაკეტებში წევას 15 ტონის სიდიდე აქვს. რაკეტაში ასხამენ 8,5 ტ სათბობს და დამჟანგველს, რომლებიც 1,5 წუთის განმავლობაში იწვის. ეს რიცხვები საკმაოდ მჭევრმეტყველურია. თრძ მიზანშეწონილია მხოლოდ დიდ სიმაღლეზე ან დედამიწის ატმოსფეროს ფარგლებს გარეთ ფრენისათვის. აზრი არა აქვს ატმოსფეროს ქვედა ფენებში (20 კმ-მდე) საფრენად

განკუთვნილ თვითმფრინავში, სადაც საკმარისი ჟანგბადია, სპეციალური დამჟანგველის დიდი რაოდენობით ჩასხმას. მაგრამ მაშინ წამოიჭრება პრობლემა წვის კამერაში ჰაერის უზარმაზარი რაოდენობის დაჭირხნისა, რაც ინტენსიური წვისათვის არის აუცილებელი. ამ პრობლემის გადაწყვეტა ბუნებრივია: წვის კამერაში შექმნილი გაზის ნაკადის ენერგიის ნაწილი მძლავრი კომპრესორის ბრუნვას ხმარდება. ეს კომპრესორი ჭირხნის კამერაში ჰაერს.

ჩვენ უკვე ვთქვით, თუ რომელი ძრავის საშუალებით შეიძლება მუშაობის შესრულება გახურებული გაზის ნაკადის ენერგიის ხარჯზე, — ეს, რასაკვირველია, გაზის ტურბინაა. მთელ სისტემას ტურბორეაქტიული ძრავა ეწოდება (ნახ.



ნახ. 135.

135). ტრძ-ს არა ჰყავს კონკურენტები 800-დან 1200 კმ/სთ სიჩქარით ფრენისას.

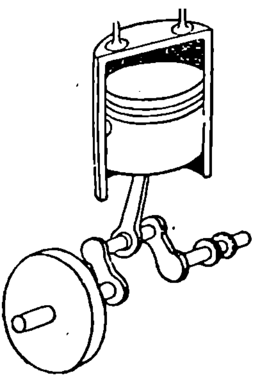
დიდ მანძილზე 600—800 კმ/სთ სიჩქარით ფრენისათვის ტრძ-ის ლილვზე დამატებით ჩვეულებრივ საავიაციო ხრახნს დგამენ. ეს ტურბოხრახნიანი ძრავაა (ტხრძ).

როდესაც ფრენის სიჩქარე დაახლოებით 2000 კმ/სთ ან მეტია, მაშინ თვითმფრინავის მიერ გაპობილი ჰაერის წნევა იმდენად ძლიერია, რომ კომპრესორი საჭირო აღარ არის. ამ დროს, ბუნებრივია, გაზის ტურბინაც არ არის საჭირო. ძრავა გადაიქცევა ცვლადი კვეთის მქონე მილად, რომლის მკაცრად განსაზღვრულ ადგილზეც იწვის სათბობი. ეს წინდენითი საჰაერო-რეაქტიული ძრავაა (წსრძ). გასაგებია, რომ წსრძ-ს არ შეუძლია თვითმფრინავის მიწიდან დაძვრა, იგი

მხოლოდ ფრენის ძალიან დიდი სიჩქარისას იძენს მუშაობის უნარს.

მცირე სიჩქარით ფრენის დროს რეაქტიული ძრავები სრულიად არ არის მიზანშეწონილი, რადგან ბევრ საწვავს ხარჯავენ.

დედამიწაზე, წყალში ან ჰაერში 0-დან 500 კმ/სთ-მდე სიჩქარით მოძრაობის დროს ადამიანს საიმედოდ ემსახურება შიგაწვის დგუშიანი ბენზინის ანუ დიზელის ძრავები. სახელწოდების შესაბამისად ასეთი ძრავის მთავარ ნაწილს წარმოადგენს ცილინდრი, რომლის შიგნითაც დგუში გადაადგილდება. დგუშის უკუმოქცევ-გადატანითი მოძრაობა ბარბაცა-მრუდმხარა სისტემის დახმარებით (ნახ. 136) ლილვის ბრუნვით მოძრაობად გარდაიქმნება.



ნახ. 136.

დგუშის მოძრაობა ბარბაცას საშუალებით მრუდმხარას გადაეცემა, რომელიც მუხლა ლილვის ნაწილს წარმოადგენს. მრუდმხარას მოძრაობა იწვევს სწორედ ლილვის ბრუნვას. პირუკუ, თუ მუხლა ლილვს ვაბრუნებთ, ეს გამოიწვევს ბარბაცების რხევას და ცილინდრების შიგნით დგუშების გადანაცვლებას.

ბენზინის ძრავის ცილინდრს აქვს ორი სარქველი, რომელთაგან ერთი საწვავი ნარევის შესაშვებად არის განკუთვნილი, ხოლო მეორე ნამუშევარი გაზების გამოსაშვებად. იმისათვის, რომ ძრავამ მუშაობა დაიწყოს, იგი რაიმე გარეშე წყაროს ენერგიით უნდა დავატრიალოთ. ვთქვათ, რაიმე მომენტში დგუში ქვევით წავიდა, შემშვები სარქველი კი ღიაა. ცილინდრში შეიწოვება გაფრქვეული ბენზინისა და ჰაერის ნარევი. შემშვები სარქველი ისეა ბლოკირებული ძრავის ლილვთან, რომ იმ მომენტში იხურება, როდესაც დგუში ქვედა განაპირა მდებარეობას აღწევს. ლილვის შემდგომი ბრუნვისას დგუში ზევით მიდის. სარქველების ავტომატური ამძრავი ამ სვლის განმავლობაში მათ დახურულ მდგომარეობაში აჩე-

რებს, ამიტომ საწვავი ნარევი იკუმშება. როდესაც დგუში ზედა მდებარეობაშია შეკუმშული ნარევი ინთება ელექტრული ნაპერწკლით, რომელიც ასანთი სანთლის ელექტროდებს შორის გაირბენს. ნარევი ინთება, წვის პროდუქტები ფართოვდება და ასრულებს მუშაობას — წნევის ძალით გადააადგილებს დგუშს ქვევით. ძრავის ლილვი მძლავრ ბიძგს ღებულობს, ლილვზე დამაგრებული მქნევარა მნიშვნელოვან კინეტიკურ ენერგიას იმარაგებს. ამ ენერგიის ხარჯზე სრულდება სამივე მომდევნო მოსამზადებელი ტაქტი: ჯერ გამოშვება, როდესაც გამომშვები სარქველი ღიაა, დგუში კი ზევით მიდის და ნამუშევარ გაზებს ცილინდრიდან დევნის, შემდეგ — ჩვენთვის უკვე ცნობილი შესრუტვა და შეკუმშვა, შემდეგ კი — ახალი აფეთქება და ძრავაც ამუშავდება.

ბენზინის ძრავებს აქვთ ცხენის ძალის ნაწილებიდან დაწყებული 4000 ც. ძ-მდე სიმძლავრე, 40%-მდე მქკ და 300 გ-მდე წონა ცხენის ძალაზე. ამ კარგი მაჩვენებლებით აიხსნება მათი ფართო გამოყენება ავტომობილებსა და თვითმფრინავებში.

როგორ უნდა გავადიდოთ ბენზინის ძრავების მქკ? მთავარი გზაა შეკუმშვის ხარისხის გადიდება. მაცივრის როლს ყველა სატრანსპორტო სითბური ძრავისათვის ხომ გარემომცველი ჰაერი ასრულებს. ამიტომაც მქკ გადიდება შეიძლება მხოლოდ მუშა ნარევის ტემპერატურის გადიდებით, ამისათვის კი ნარევი რაც შეიძლება უფრო მეტად უნდა შეიკუმშოს აალების წინ. მაგრამ ამ დროს სერიოზული შეფერხება გვეღობება წინ: ძლიერად შეკუმშული ნარევი დეტონირებს (იხ. გვ. 427). მუშა სვლა ძლიერი აფეთქების ხასიათს ღებულობს, რასაც ძრავის დაზიანება შეუძლია. საჭიროა საგანგებოდ ვიღონოთ რაიმე, რომ ბენზინის სადეტონაციო თვისებები შევამციროთ. ეს კი მნიშვნელოვნად აძვირებს ისედაც საკმაოდ ძვირ სათბობს (იხ. გვ. 428).

მუშა სვლის დროს ტემპერატურის გადიდება, დეტონაციის აცილება და საწვავის გაიაფება წარმატებით არის გადაჭრილი დიზელის ძრავაში.

დიზელის ძრავა კონსტრუქციით ძალიან მოგვაგონებს ბენზინისას, მაგრამ ის გათვალისწინებულია ბენზინზე უფრო

იაფი და დაბალი ხარისხის ნავთობის პროდუქტებისათვის. ციკლი იწყება ცილინდრში სუფთა ჰაერის შესრუტვით. შემდეგ ჰაერი იკუმშება დგუშით დაახლოებით 20-ატმ-მდე. ჰაერის ასეთი შეკუმშვა ძრავის ხელით დატრიალებით ძალიან ძნელი იქნებოდა. ამიტომაც დიზელს სპეციალური გამშვები მოტორის, ჩვეულებრივ, ბენზინის მოტორის საშუალებით ან შეკუმშული ჰაერით ამუშავებენ ხოლმე.

ძლიერი შეკუმშვის დროს ჰაერის ტემპერატურა ცილინდრში იმდენად იზრდება, რომ იგი საკმარისია საწვავი ნარევის აალებისათვის. მაგრამ როგორ შევიყვანოთ იგი ცილინდრში, სადაც მაღალი წნევაა შექმნილი? შემშვები სარქველი აქ არ გამოდგება. მას ცვლიან ფრქვევანათი, რომელიც პაწაწინა ნაჩვრეტიდან ჭირხნის საწვავს ცილინდრში. იგი აალდება შესვლისდა მიხედვით, რითაც აცილებულია დეტონაციის საფრთხე, რაც არსებითია ბენზინის ძრავისათვის. დეტონაციის საფრთხის აცილება საშუალებას გვაძლევს ავაგოთ მრავალ ათას ცხენისძალიანი ნელმავალი გემის დიზელები. მათი ზომა, ბუნებრივია, საკმაოდ იზრდება, მაგრამ დიზელი მაინც უფრო კომპაქტური რჩება, ვიდრე ორთქლის ქვაბისაგან და ტურბინისაგან შემდგარი აგრეგატი. დიზელისძრავიან გემებს ჩვენს ლიტერატურაში თბომავლებს ეძახიან.

გემს, რომელზეც დიზელსა და ხრახნს შორის მუდმივი დენის გენერატორი და მოტორი დგას, „დიზელელექტრომავალს“ უწოდებენ. დიზელიანი ლოკომოტივები — თბომავლები, რომლებიც ახლა ფართოდ ინერგება რკინიგზებზე, — იმავე სქემით არის აგებული, ამიტომაც მათ შეიძლება „დიზელელექტრომავლები“ ვუწოდოთ.

შიგა წვის დგუშიანმა ძრავებმა, რომლებიც ჩვენ უკანასკნელ რიგში განვიხილეთ, ძირითადი კონსტრუქციული ელემენტები — ცილინდრი, დგუში, ბრუნვითი მოძრაობის მიღება ბარბაცა-მრუდმხარა მექანიზმის საშუალებით — ორთქლის მანქანისგან ისესხეს. თვით ორთქლის მანქანა კი თანდათანობით ჩამოდის სცენიდან. ორთქლის მანქანისათვის შეიძლებოდა „გარე წვის დგუშიანი ძრავი“ გვეწოდებინა. სწორედ დიდი ზომის ორთქლის ქვაბის შეხამება გადატანითი მოძრაობის ბრუნვით მოძრაობად გარდამქმნელ არანაკლები ზომის

სისტემასთან არ აძლევს ორთქლის მანქანას საშუალებას კონკურენცია გაუწიოს თანამედროვე ძრავებს. ამაში დასარწმუნებლად, თვალი გავადევნოთ ორმაგი მოქმედების ორთქლის ქვაბის მუშაობას.

ქვაბიდან ორთქლი მკვეთარას კოლოფში გადადის. ამ კოლოფის შიგნით გადაადგილდება მკვეთარა — სპეციალური ფორმის სარქველი. ბერკეტების სისტემის საშუალებით მკვეთარა ისეა ბლოკირებული დგუშთან, რომ ბიძგებით გადაადგილდება და საშუალებას აძლევს ორთქლს ცილინდრის ხან ერთ, ხან მეორე ნაწილში შეაღწიოს. ამრიგად, ნებისმიერ მომენტში ცილინდრში არის მაღალი წნევის ორთქლი. თითქოს ორთქლის მანქანა ბენზინის ძრავაზე უკეთესი უნდა იყოს: იგი ხომ არ საჭიროებს მოსამზადებელ სვლებს, ყოველი მისი სვლა — მუშა სვლაა. მაგრამ ეს ზერელე მსჯელობა სწორი არ არის.

უნდა მოვიგონოთ, რომ ბენზინის ძრავის დამაკმაყოფილებელი მქკ გაპირობებულია იმ გაზების მაღალი ტემპერატურით, რომლებიც დგუშს გადააადგილებენ. ჩვენ უკვე ვიცით, რომ ორთქლის ტურბინის მქკ გადიდებისათვის იყენებენ მაღალი წნევის ორთქლს, რომელსაც ძალიან მაღალი ტემპერატურა აქვს. ამ ტემპერატურაზე ორთქლსადენები და ფრთები წითლად არის გავარვარებული. მაგრამ ტურბინის ფრთები ხომ თავისუფლად ბრუნავს ლითონის ზედაპირზე ხახუნის გარეშე... წარმოიდგინეთ, რა სიძნელის გადალახვა მოუხდებოდა მეოცნებეს, რომელიც განიზრახავდა „გაეუმჯობესებინა" ორთქლის ძრავა, ისე რომ წითლად გავარვარებულ დგუშს ასევე გავარვარებული ცილინდრის შიგნით ესრიალა. ამასთან, დგუში იმდენად მჭიდროდ უნდა ეკვროდეს ცილინდრს, რომ 600 ატმ ტოლი წნევათა ვარდნა დააკავოს. კიდეც რომ განხორციელდეს გამომგონებლობის სასწაული და ასეთი მანქანა აიგოს, მისი მქკ მაინც ნაკლები იქნება, ვიდრე ოთქლის ასეთივე პარამეტრებიანი ტურბინისა, რადგანაც უკანასკნელი გაცილებით მარტივად ბრუნავს, ხოლო ზომა და წონა მეტი აქვს, ვიდრე შიგა წვის ანალოგიურ ძრავას.

თანამედროვე ორთქლის მანქანების მქკ დაახლოებით 10%. ამჟამად წარმოებიდან მოხსნილი ორთქლმავლები სრუ-

ლიად უსარგებლოდ უშვებდნენ მილში მათ მიერ დამწვარი სათბობის 95%-ს.

ეს „რეკორდულად“ დაბალი მქკ აიხსნება იმ გარემოებით, რომ ორთქლის ქვაბის თვისებები გარდუვალად უარესდება, როცა მას ორთქლმავალზე დგამენ.

მაშ რატომღა იყენებდნენ ორთქლის მანქანებს ამდენ ხანს რკინიგზაზე? შერჩეული გადაწყვეტის მიმართ ერთგულების გარდა, ის გარემოებაც ასრულებდა როლს, რომ ორთქლის მანქანას ძალიან კარგი წევის მახასიათებელი აქვს: რაც მეტი ძალით ეწინააღმდეგება დატვირთვა დგუშის გადანაცვლებას, მით მეტი ძალით აწვება მას ორთქლი, ანუ ორთქლის მანქანის მიერ განვითარებული მბრუნავი მომენტი ძნელ პირობებში იზრდება, რასაც სწორედ ტრანსპორტისათვის აქვს მნიშვნელობა. მაგრამ, რასაკვირველია, ის გარემოება, რომ ორთქლის მანქანისათვის არ არის საჭირო წამყვან ღერძებზე ცვლადი გადაცემის რთული სისტემა, სრულიად ვერ გამოისყიდის მის ძირითად ნაკლს — დაბალ მქკ-ს.

სწორედ ამით აიხსნება, რომ ორთქლის მანქანის ადგილი სხვა ძრავებმა დაიკავა.

ფლუქტუაციები

დავუბრუნდეთ თერმოდინამიკის მეორე საწყისს — ბუნების დიდ კანონს, რომელიც მართავს ბუნებრივი მოვლენების მიმდინარეობას. ჩვენ ვნახეთ, რომ თავისთავადი პროცესები იწვევენ სისტემის უალბათეს მდგომარეობაში გადასვლას — ენტროპიის ზრდას. მას შემდეგ, რაც სისტემის ენტროპია მაქსიმალური გახდა, შემდგომი ცვლილებები სისტემაში წყდება — წონასწორობა მიღწეულია.

მაგრამ წონასწორობის მდგომარეობა სულაც არ ნიშნავს შინაგან უძრაობას. სისტემის შიგნით მიმდინარეობს ინტენსიური სითბური მოძრაობა. ამიტომაც, მკაცრად რომ ვთქვათ, ნებისმიერი ფიზიკური სხეული ყოველ მომენტში „უკვე ის აღარ არის, რაც იყო“, მოლეკულების ურთიერთგანლაგება ყოველ მომდევნო მომენტში ისეთი აღარ არის, როგორიც

წინა მომენტში. ამრიგად, ყველა ფიზიკური სიდიდის მნიშვნელობა ინახება „საშუალოდ“, ისინი ზუსტად კი არ არიან თავისი უალბათესი მნიშვნელობების ტოლი, არამედ მათ მახლობლად რხევას განიცდიან. წონასწორული უალბათესი მნიშვნელობებიდან გადახრას ფლუქტუაცია ეწოდება. სხვადასხვა ფლუქტუაციების მნიშვნელობები მეტად მცირეა. რაც უფრო დიდია ფლუქტუაცია, მით ნაკლებ ალბათურია იგი.

ფარდობითი ფლუქტუაციის საშუალო მნიშვნელობა, ანუ ჩვენთვის საინტერესო ფიზიკური სიდიდის იმ ნაწილის საშუალო მნიშვნელობა, რომლითაც ეს სიდიდე შეიძლება შეიცვალოს მოლეკულების ქაოსური სითბური მოძრაობის წყალობით, დაახლოებით წარმოდგენილია $\frac{1}{\sqrt{N}}$ გამოსახულებით, სადაც N არის შესასწავლი სხეულის ან მისი ნაწილის მოლეკულების რიცხვი. ამრიგად, ფლუქტუაციები შესამჩნევია მოლეკულების მცირე რიცხვისაგან შემდგარი სისტემებისათვის და სრულიად შეუმჩნეველია დიდი სხეულებისათვის, რომლებიც მილიარდობით მილიარდ მოლეკულებს შეიცავენ.

ფორმულა $\frac{1}{\sqrt{N}}$ გვიჩვენებს, რომ გაზის ერთ კუბურ სანტიმეტრში სიმკვრივე, წნევა, ტემპერატურა და ნებისმიერი სხვა თვისებები შეიძლება $\frac{1}{\sqrt{3\cdot 10^{19}}}$ ნაწილით, ანუ დაახლოებეთი 18^{-8}%-ის ფარგლებში იცვლებოდნენ. ასეთი ფლუქტუაციები მეტისმეტად მცირეა იმისათვის, რომ შესაძლებელი იყოს მათი ცდით აღმოჩენა.

სულ სხვაგვარად არის საქმე კუბური მიკრონის მოცულობაში. აქ $N = 3\cdot 10^{7}$ და ფლუქტუაციები უკვე პროცენტის მესამედის ტოლ გაზომვად სიდიდეებს აღწევენ.

ფლუქტუაცია წარმოადგენს „არანორმალურ“ მოვლენას იმ აზრით, რომ იგი იწვევს გადასვლას მეტად ალბათურიდან ნაკლებად ალბათური მდგომარეობისკენ. ფლუქტუაციის დროს სითბო ცივი სხეულიდან ცხელზე გადადის. ირღვევა:

მოლეკულების თანაბარი განაწილება, წარმოიშობა მოწესრიგებული მოძრაობა.

იქნებ ამ დარღვევებზე მოხერხდეს მეორე გვარის მარადიული ძრავის აგება?

წარმოვიდგინოთ, მაგალითად, გაიშვიათებულ გაზში მოთავსებული პატარა ტურბინა. ხომ არ შეიძლება ისე მოვახერხოთ, რომ ეს პატარა მანქანა მოქმედებას იწყებდეს რომელიმე ერთი მიმართულების ფლუქტუაციების გავლენით? მაგალითად, მობრუნდეს, თუ მარჯვნივ მოძრავი მოლეკულების რიცხვი მარცხნივ მოძრავი მოლეკულების რიცხვზე მეტი იქნება. ასეთი მცირე ბიძგები შეიძლებოდა შეგვეკრიბა და, ბოლოს და ბოლოს, მივიღებდით მუშაობას. მეორე გვარის მარადიული ძრავის განხორციელების შეუძლებლობის პრინციპი უარყოფილი იქნებოდა. მაგრამ, სამწუხაროდ, ასეთი მოწყობილობის განხორციელება პრინციპულად შეუძლებელია. თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ პაწაწინა ტურბინას მით უფრო დიდი საკუთარი ფლუქტუაციები აქვს, რაც უფრო მცირეა მისი ზომა, დავინახავთ, რომ ფლუქტუაციებს საერთოდ არ ძალუძთ რაიმე მუშაობის შესრულება. თუმცა ჩვენს ირგვლივ განუწყვეტლივ ირღვევა მისწრაფება წონასწორობისაკენ, ამ დარღვევებს არ ძალუძს შეცვალოს ფიზიკური პროცესების ულმობელი სვლა მდგომარეობის ალბათობის, ანუ ენტროპიის ზრდის მიმართულებით.

ენტროპია და სამყაროს განვითარება

მდინარეები ქვევით მიედინება, ქვები მთებიდან გორდება, მოძრაობა ჩერდება ხახუნის გამო — წყდება ყველა ფარდობითი მოძრაობა. ცხელი სხეულები ცივდება, ხოლო ცივი სხეულები თბება — სამყაროს ყველა სხეულის ტემპერატურა თანაბრდება. ასეთია მოვლენათა გარდუვალი მსვლელობა ჩვენს გარემომცველ სამყაროში ენტროპიის ზრდის კანონის თვალსაზრისით.

თითქოს ყველაფერი ნათელია. მაგრამ, თუ დავუფიქრდებით, არის ერთი გაუგებარი მხარე. რაკი ბუნება წონასწორო-

ბისაკენ მიისწრაფვის, იბადება კითხვა, მაშ რატომ ჯერ კიდევ ვერ დამყარდა წონასწორობა?

მართლაც, თუნდაც სისტემა უკიდურესად არაწონასწორული იყოს, მისი წონასწორობის მდგომარეობაში გადასვლის დრო (ფიზიკოსები ამ დროს რელაქსაციის დროს უწოდებენ) მაინც არ შეიძლება უსასრულოდ დიდი იყოს. ჩვენი სამყაროს წონასწორობაში გადასვლა შეიძლებოდა დიდხანს გაგრძელებულიყო, თუნდაც მრავალ მილიარდ წელს, მაგრამ ყოველ შემთხვევაში ნებისმიერი არაწონასწორული მდგომარეობიდან წონასწორობის მდგომარეობაში გადასვლას გარკვეული ვადა დასჭირდებოდა და უსასრულოდ არ გაგრძელდებოდა.

მაშ რატომ არ დამყარდა ეს წონასწორობა მილიარდი წლის წინ, თუნდაც მილიარდი მილიარდი წლის წინ?

ეს წინააღმდეგობა ძალიან სერიოზულია. გამოდის, რომ ჩვენი სამყაროს თვით არსებობა იმ სახით, რა სახითაც მას ვაკვირდებით, შეურიგებელ წინააღმდეგობაშია ჩვენთვის ცნობილ ფიზიკის კანონებთან.

იქნებ გამოსავალი ვიპოვოთ, თუ დავუშვებთ, რომ მთელი ჩვენი სამყარო გიგანტურ ფლუქტუაციას წარმოადგენს? სამყარო უსასრულოა დროსა და სივრცეში. ხან იქ, ხან აქ წარმოიშობა ფლუქტუაციები — მოლეკულები ერთიანდებიან, მათი მოძრაობა მოწესრიგებული ხდება, იქმნება, მაგალითად, ჩვენი სისტემის მსგავსი პლანეტების სისტემა. ამის შემდეგ ფლუქტუაცია შეიწოვება, ქრება, მაგრამ მის ნაცვლად სამყაროს სხვა ნაწილში სხვა ფლუქტუაცია წარმოიქმნება.

მაგრამ რამდენადაც მომხიბლავი არ უნდა იყოს ეს ჰიპოთეზა, იგი უბრალო კრიტიკას ვერ უძლებს. ასეთი ფლუქტუაცია მეტისმეტად არაალბათურია. ჩვენ ვნახეთ, რომ მოლეკულების თავისთავადი შესქელება კუბური სანტიმეტრი მოცულობის მქონე ჭურჭლის ერთ ნახევარში მხოლოდ ერთი შემთხვევაა შემთხვევათა უზარმაზარი რიცხვიდან. მაშ, მთელი სამყაროს შემქმნელ ფლუქტუაციაზე რაღა გვეთქმის.

ასეთი ახსნა აშკარად მიუღებელია. მისი სამართლიანობის დაჯერება გაცილებით მეტი გულუბრყვილობა იქნებოდა, ვიდრე ქურდის ფიცი, რომ მან კი არ ამოგაცალათ საფულე ჯი-

ბიდან, მოლეკულების ფლუქტუაციამ გამოიწვია საფულის თქვენი ჯიბიდან მის ხელში გადასვლა. ამავე დროს ასეთი ფლუქტუაცია წარმოუდგენლად უფრო ალბათურია, ვიდრე ფლუქტუაცია სამყაროს მასშტაბით, რომელზეც ჩვენ ვლაპარაკობთ.

ამ მოსაზრებას შეიძლებოდა ასე შევკამათებოდით: დაე, სამყაროს ზომის გიგანტური ფლუქტუაციის ალბათობა უმნიშვნელოდ მცირე იყოს, მაგრამ ამან არ უნდა გაგვაკვირვოს. მეც — ადამიანიც, რომელიც ამ საკითხზე ვმსჯელობ, — ხომ ფლუქტუაციის შედეგს წარმოვადგენ. ჩემი არსებობა უკვე სრულიად არაალბათური მოვლენაა, ხოლო ალბათურისა და არაალბათურის შესახებ მე უნდა ვიმსჯელო ჩემი არსებობის მიმართ.

ასეთი შეკამათებაც უნდა უარვყოთ.

ჩვენი არსებობისათვის საკმარისზე მეტია მზის სისტემა, ჩვენ კი ვხედავთ არაწონასწორულ სამყაროს ისეთ მასშტაბში, რომელთან შედარებითაც ჩვენი მზის სისტემა — უმცირესი ნაწილაკია.

უკვე დღეისათვის ტელესკოპების დახმარებით ასტრონომებმა ისეთ მანძილზე შეაღწიეს სამყაროს სიღრმეში, რომელიც 10^{12} — 10^{13}-ჯერ აღემატება მზის სისტემის ზომას. თუ სამყარო ფლუქტუაციაა, მაშინ ჩვენ ვაკვირდებით არაწონასწორულ მდგომარეობას, რომელიც სულ ცოტა 10^{12}-ჯერ აღემატება ჩვენი სიცოცხლისათვის საჭირო მასშტაბს. ამიტომაც ჩვენი არსებობა სრულიად ვერ ამართლებს იმ ფლუქტუაციის წარმოუდგენლად მცირე ალბათობას, რომელმაც გამოიწვია სამყაროს წარმოქმნა მისი თანამედროვე სახით.

ამრიგად, წინააღმდეგობა მაინც უცვლელად რჩება. ეს იმაზე მიგვითითებს, რომ ძირითადი წარმოდგენები სივრცესა და დროზე, აგრეთვე ძირითადი კანონები, რომლებსაც აქამდე უდავოდ ვთვლიდით, რაღაცით არ არის კარგი. სადღაც, მეცნიერების საძირკველში, საჭიროა შესწორებების შეტანა.

ჩვენ მეორედ ვხვდებით ჩვენი მექანიკის პრინციპულ ნაკლოვანებებს, მაგრამ ახლა უკვე ახალი დეფექტი ვიპოვეთ. იგი არ არის დაკავშირებული ცნებების იმ გადასინჯვასთან,

რის აუცილებლობაზეც მივუთითეთ, როდესაც თხევადი ჰელიუმის უჩვეულო თვისებებს გავეცანით. იქ ლაპარაკი იყო ძველი მექანიკის კანონების გამოუსადეგრობაზე მიკრონაწილაკებისათვის. ახლა, როდესაც ამ ცოდნის გამოყენება მთელი სამყაროსათვის ვცადეთ, ჩვენი ცოდნის საძირკველშივე აღმოვაჩინეთ ნაკლოვანებები.

ჩვენი ძველი მექანიკა გამოუსადეგარი აღმოჩნდა, როგორც ძალიან მცირესთვის, ასევე ძალიან დიდისთვისაც.

იმის შესახებ, თუ როგორი ცვლილებების შეტანაა საჭირო ბუნების კანონების ჩვენს ძველ ფორმულირებებში, რომ მათი გამოყენება ზოგ საჭირო შემთხვევაში მიკროსამყაროსათვის შეიძლებოდეს, ხოლო სხვა შემთხვევებში მთელი სამყაროსათვის, ვიმედოვნებთ მკითხველთან მომავალში ვილაპარაკებთ.

სარჩევი

Лев Давидович Ландау,
Александр Исаакович Китайгородский
ФИЗИКА ДЛЯ ВСЕХ
(На грузинском языке)
Художник Б. Кыштымов
Детюниздат Грузинской ССР
«Накадули», Тбилиси, 1974.

რედაქტორები ც. ცერცვაძე, ლ. ტყეშელაშვილი, მხატვარი ბ. კიშტიმოვი, მხატვრული რედაქტორი გ. ღლონტი, ტექრედაქტორი ნ. შველიძე, კონტროლიორ-კორექტორი ლ. სულთანიშვილი, კორექტორი თ. შინდაგორიძე, გამომშვები ვ. ვახტანგაძე.

გადაეცა ასაწყობად 15/III-72 წ., ხელმოწერილია დასაბეჭდად 30/V-74 წ., ანაწყობის ზომა 5,5×9, ქაღალდის ზომა 84×108 1/32. ნაბეჭდი თაბახი 25,58, სააღრიცხვო-საგამომცემლო თაბახი 21,24, ტირაჟი 10.000, შეკვ. № 307.
ფასი 1 მან.

გამომცემლობა „ნაკადული", თბილისი, მარჯანიშვილის ქ. № 5
Издательство «Накадули», Тбилиси, ул. Марджанишвили № 5

საქართველოს სსრ მინისტრთა საბჭოს გამომცემლობათა, პოლიგრაფიისა და წიგნის ვაჭრობის საქმეთა სახელმწიფო კომიტეტის ბეჭდვითი სიტყვის კომბინატი, თბილისი, კამოს ქ. № 18.

Комбинат печати Государственного комитета Совета Министров Грузинской ССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли .Тбилиси, ул. Камо № 18.