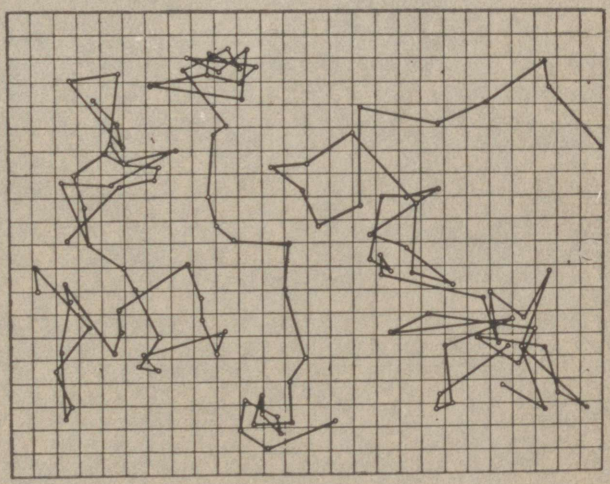
A. PJORÕŠKIN V. KRAUKLIS

FÜÜSIKA

KESKKOOLILE I OSA



A - 73429

A. PJORÕŠKIN JA V. KRAUKLIS

FÜÜSIKA

KESKKOOLILE

I

MEHHAANIKA,
SOOJUS JA MOLEKULAARFÜÜSIKA

10. trükk

KIRJASTUS «VALGUS» · TALLINN 1967

53
P 57

Kunstiliselt kujundanud *P. Reeveer.*

Originaalide tiitel:

А. В. Пёрышкин, В. В. Крауклис.
Курс физики. Часть первая. Механика.
Учебник для средней школы. Издание двенадцатое.
Утверждён Министерством просвещения РСФСР.
Издательство «Просвещение». Москва 1966.

А. В. Пёрышкин.
Курс физики. Часть вторая. Механика (продолжение), теплота и молекулярная физика. Учебник для средней школы.
Издание тринадцатое.
Утверждён Министерством просвещения РСФСР.
Издательство «Просвещение». Москва 1966.

Tõlge kinnitatud Eesti NSV Haridusministeeriumi poolt.

Tõlkinud vene keelest *A. Emmo* ja *M. Usai.*

ARHIIVKOGU

2

TARTU ÜLIKOOLI
RAAMATUKOGU

229369

SISSEJUHATUS.

1. **Mateeria ja liikumine.** Õhk, vesi, maa, taevakehad, taimed, loomad, seega kõik, mis meid ümbritseb, ja lõpuks meie ise — kõik see kokku moodustab looduse.

Mitmesuguste kehade, järelikult ka kogu looduse olemasolus veendume oma meelte abil. Näiteks, viibides klassis, näeme ja kombime koolipinke, laudu ja toole, näeme ja kuuleme õpetajat, kaaslasi ja seega tajume kõike meid ümbritsevat.

Kõik olemasolev moodustab materiaalse maailma ehk mateeria.

«Mateeria on see, mis meie meeleorganeile mõjudes tekitab aistingu» (Lenin).

Mateeria eksisteerib mitmesugustes liikides või vormides. Üht mateeriavormi, seda, millest koosnevad kõik meid ümbritsevad kehad, nimetatakse aineks. Iga keha, olgu see lill, tindipott või õhk, mida me hingame, on mateeria erikuju.

Aja jooksul toimuvad kehadega looduses mitmesugused muutused. Sellisteks muutusteks on näiteks kehade liikumine üksteise suhtes, aine üleminek ühest olekust teise, taimede ja loomade kasvamine, aine keemilised muundumised jne.

Muutused toimuvad ka kõigi taevakehadega. Astronoomia õpetab, et aja jooksul muutub näiteks tähtede ja Päikese temperatuur, nende sisemuses toimuvad keerulised ühtede mateeriavormide teisteks muundumise protsessid. Veelgi keerulisemad muundumised toimuvad taimede ja loomade maailmas. Loomad ja taimed sünnivad, kasvavad ja surevad. Ei ole ühtki keha looduses, millega ei toimuks aja jooksul muutusi. «Kõik voolab, kõik muutub,» õpetas juba VI sajandil enne meie ajaarvamise algust Herakleitos.

Mateeria areneb ja muutub alaliselt või, nagu tavaliselt öeldakse, on liikumises, kusjuures liikumise all tuleb mõista igasugust muutumist üldse, mitte ainult keha asetumist ühest kohast teise. *Maailm — see on liikuv mateeria.*

Mateeria on alati eksisteerinud ja eksisteerib ka tulevikus, muundudes ja arenedes. Mateeria hävimatuse ja liikumise seaduse avastas vene õpetlane Mihhail Vassiljevitš Lomonossov.

Mateeria liikumise lihtsaimaks vormiks on mehhaaniline liikumine. Viimase tundmaõppimisele ongi pühendatud käesoleva raamatu esimene osa.

Mihhail Vassiljevitš Lomonossov (1711—1765) — geniaalne vene teadlane, vene loodusteaduse rajaja. Ta oli füüsik, keemik, insener, filosoof, poeet, vene kirjakeele rajaja, ajaloolane, geograaf, poliitikamees.

Lomonossov tõestas esimesena eksperimentaalselt aine säilivuse keemilistes reaktsioonides ja avastas seega aine jäävuse seaduse. Lomonossov pani aluse sel ajal uuele teadusele — füüsikalisele keemiale. Ta arendas edasi materia molekulaarkineetilise teooria aluseid. Lomonossovi loomingu iseloomulikuks jooneks on teadusliku teooria oskuslik ühendamine praktikaga. Ta töötas välja värvilise klaasi valmistamise viisid, konstrueeris piksekaitse, leiutas tundliku baromeetri, konstrueeris mitmesuguseid optilisi ja muid riistu.

M. V. Lomonossov armastas palavalt vene rahvast, oli temale uhke ja seisis tema rahvuslike huvide eest. Ta oli sügavalt veendunud selles, et

siis kõigis veene võtab võimust,
et ilmuda ka vene hõimust
võib platoneid[1] ja newtoneid[2].

2. Teadus ja selle tähtsus. Selles igavesti muutuvas maailmas elab ka inimene. Et elada ja töötada, peab ta endale muretsema elatusvahendeid — toitu, riideid, ehitama elamu.

Kõike seda, mida inimene vajab eluks, ei kingi talle loodus. Inimene ei või looduselt oodata armuande, ta peab neid ise looduselt võtma.

Elatusvahendite tootmiseks lõid inimesed mitmesuguseid tootmisriistu. Esimesteks sellisteks riistadeks olid lihtne kepp ja kivi, siis ilmusid kivist ja metallist tööriistad — kirved, noad, labidad jm. ning lõpuks kaasaegsed masinad.

Elatusvahendeid muretsedes ja seejuures loodust mõjustades tunnetasid inimesed loodusnähtusi. Selle tulemusena kujunesid aegamööda loodusteadused: füüsika, keemia, astronoomia, botaanika, zooloogia jt.

Õppides tundma loodusnähtusi, tegi teadus kindlaks, et ükski neist ei toimu juhuslikult, vaid tihedas seoses teiste nähtustega — seaduspäraselt. Näiteks toimub kehade langemine neile mõjuva Maa külgetõmbe tõttu, aastaaegade vahetus Maal on seotud Maa liikumisega ümber Päikese, õhu liikumise — tuule — kutsub esile õhu ebaühtlane soojenemine jne.

---

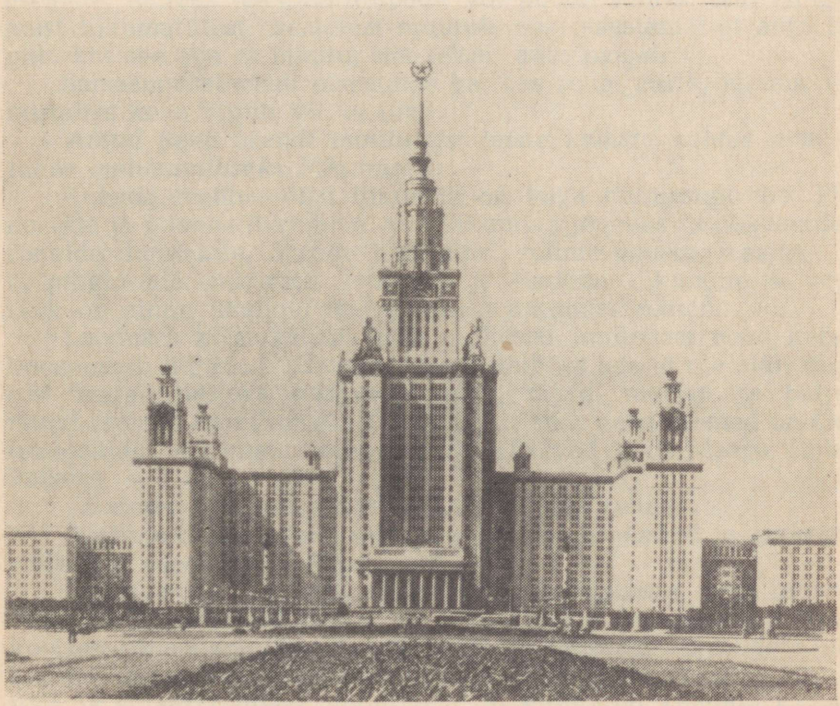
[1] Platon — kuulus vana-kreeka filosoof.
[2] Newton (l. njuuton) — Lomonossovi kaasaegne, geniaalne inglise õpetlane.

Loodusteaduste eesmärgiks on avastada ja õppida tundma loodusseadusi ning rakendada neid praktiliselt.

Loodusseadused, s. t. mitmesuguste nähtuste vahelised vastastikused seosed, on inimeste tahtest ja soovidest täiesti s õ l t u m a t u d. Kuidas me ka ei tahaks, et näiteks kevad saabuks kiiremini ja oleks palju päikesepaistelisi päevi, algab kevad ikkagi ranges vastavuses Maa asendile Päikese suhtes, ilm aga on niisugune, milliseks selle kujundavad kõik koos mõjuvad tingimused atmosfääris.

Loodusseaduste sõltumatus inimeste soovidest ei tähenda aga seda, et inimesed on looduse ees võimetud. Vastupidi, teadus sellepärast ongi ühiskonnale vajalik, et relvastada teda loodusseaduste tundmisega, mida kasutatakse inimkonna huvides.

Kevadine veetõus jõgedes ja sellega kaasnev üleujutus on seaduspärane loodusnähtus. Inimkond ei ole võimeline muutma kevade tulekut. Kuid avastatud loodusseadusi oskuslikult kasutades õppisid inimesed ehitama paise, kanaleid ja veehoidlaid, reguleerima üle kallaste tõusnud jõgede tohutut jõudu ja seda kasutama.



Joon. 1. M. V. Lomonossovi nimelise Moskva Riikliku Ülikooli hoone.

Meil Nõukogude Liidus rakendatakse teadust kommunismi ehitamisel. Ta aitab muuta loodust nõukogude inimeste huvides. Varustatult teadmistega teostasid nõukogude töölised ja insenerid teadlaste abiga näiteks vene rahva ammuse unistuse — ehitasid kanali, mis ühendab kahte võimsat jõge — Volgat ja Doni. Paljudel meie kodumaa jõgedel on käimas võimsate hüdroelektrijaamade ehitamine.

Nõukogude teadlased püüavad iga uut leiutist kasutada inimeste huvides, nende heaolu suurendamiseks, abiks inimestele loodusega võitlemisel. Sellepärast on teadus meie maal ümbritsetud tähelepanu ja hoolitsusega. Selle tähelepanu eredaks väljenduseks on Lenini mägedesse ehitatud teadusepalee — M. V. Lomonossovi nimelise Moskva Riikliku Ülikooli suurepärane hoone, mis on varustatud teaduse ja tehnika viimase sõna järgi (joon. 1).

Moskva Riiklik Ülikool kannab geniaalse vene teadlase M. V. Lomonossovi nime, kes A. S. Puškini väljenduse järgi «oli ise meie esimeseks ülikooliks».

ESIMENE OSA.

MEHHAANIKA.

I PEATÜKK.

ÜHTLANE SIRGJOONELINE LIIKUMINE.

3. Mehhaaniline liikumine. Kaugel teel on näha auto. Me ei kuule ka mootori mürinat ega näe, kas ta rattad pöörlevad või mitte. Kuidas otsustada, kas auto liigub mööda teed või mitte?

Jälgime auto asendit tee ääres asuvate mingite liikumatute esemete, näiteks telegraafitulpade või puude suhtes. Kui kaugus neist liikumatutest esemetest muutub, siis otsustame, et auto liigub, kui see aga ei muutu, siis seisab auto paigal.

Samasugusel viisil otsustame ka, kas rong, aurik, lennuk või mistahes keha liigub või ei liigu.

Antud keha asendi muutumist teiste kehade suhtes nimetatakse mehhaaniliseks liikumiseks.

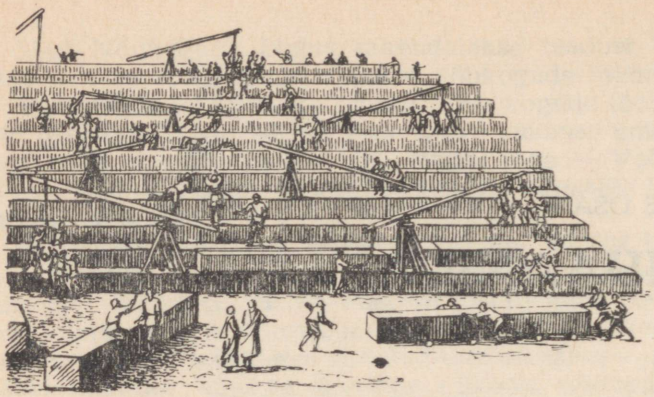
Kehade mehhaanilisi liikumisi on väga mitmesuguseid. Planeetide ja pilvede liikumine, vee liikumine jõgedes ja ookeanides, rongide, lennukite, autode liikumine, mitmesuguste masina- ja tööpingiosade, inimeste, loomade ja lindude liikumine — need kõik on ainult üksikud mehhaanilise liikumise näited.

Looduses kõik kehad, kõik osakesed, milledest need kehad koosnevad, liiguvad. Esimesel pilgul näib, et see ei ole alati õige, sest majad näiteks seisavad paigal, mäed, metsad ja paljud muud esemed on liikumatud. Tegelikult kõik need esemed on üksteise suhtes liikumatus olekus, kuid tiirlevad koos Maaga ümber Päikese.

Looduses ei eksisteeri täiesti liikumatut keha.

Mehhaanilises liikumises on looduses kõik kehad ja osakesed, milledest need kehad koosnevad.

Mehhaanilisi liikumisi käsitletakse füüsika osas, mida nimetatakse mehhaanikaks. Sõna mehhaanika on tulnud kreekakeelsest sõnast «*mehhane*», mis tähendab masinat või seadet. Juba kauges minevikus kasutati masinaid transpordis, samuti ehitustöös ja sõjaasjanduses. Joonisel 2 on kujutatud kangide kasutamist püramiidide ehitamisel vanade egiptlaste poolt.



Joon. 2. Kangide kasutamine püramiidide ehitamisel vanas Egiptuses.

Mehhaanika seadustel põhineb ka kaasaegsete keeruliste masinate ehitus. Joonisel 3 on kujutatud meie ehitustel kasutatav kaasaegne tornkraana. Üks niisugune kraana teeb ära tuhande inimese töö.

4. Liikumise ja paigaloleku suhtelisus. Nagu me nägime, nimetatakse liikumiseks antud keha asendi muutumist mingite teiste kehade suhtes. Näiteks aurik liigub kalda suhtes, rong — raudtee muldkeha suhtes, lõiketera — treipingi kere suhtes jne. Kuid kallas, raudtee, muldkeha, treipingi kere liiguvad koos Maaga; me loeme neid ainult tinglikult liikumatuiks.

Keha liikumist teiste kehade suhtes, mida tinglikult loetakse liikumatuiks, nimetatakse suhteliseks liikumiseks.

Kuna kõik looduses leiduvad kehad on liikumises ja pole absoluutselt[1] liikumatuid kehi, siis pole ka absoluutset liikumist, samuti nagu pole olemas ka absoluutset paigalseisu.

Igasugune liikumine, nagu igasugune paigalseiski, on suhteline.

Üks ja sama liikumine paistab erinevana, vaadelduna erinevate kehade suhtes. Kujutame endale ette reisijat, kes istub liikuva rongi vagunis. Mida võib öelda tema liikumise kohta? Vagunisaatja ütleb, et reisija ei liigu (istub), rööpaseadja, kellest vagun möödub, kinnitab, et reisija liigub temast mööda. Tegelikult on mõlemal õigus. Vagunisaatja, öeldes, et reisija ei liigu, arvestab reisija olukorda vagunis olevate esemete suhtes. Maapinnal seisev ja rongi liikumist vaatlev rööpaseadja jälgib reisija olukorda kas raudtee muldkeha või iseenese suhtes.

Kuna kaks vaatlejat vaatlesid reisija olukorda erinevate esemete suhtes, siis jõudsid nad ka erinevatele järeldustele.

---

[1] absoluutne (ladina keeles *absolutus*) — tingimatu.

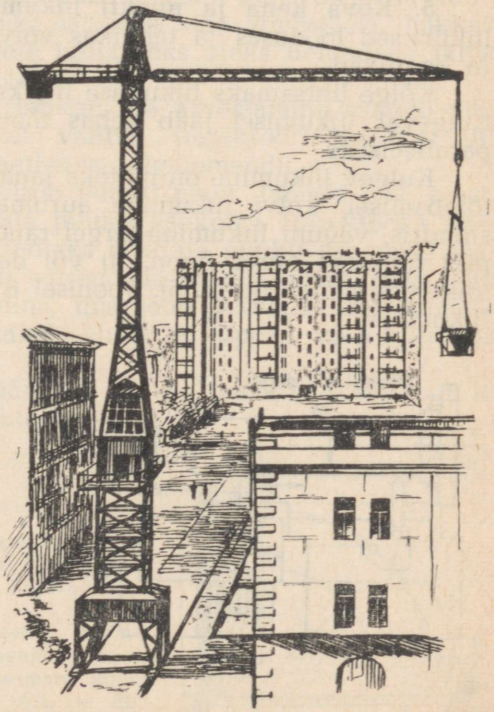
Vaatleme teist näidet. Reisija asub jõelaeva kajutis, mis on suletud. Ta näeb kajuti seinu ja eesriidega kaetud akent. Kas ta võib auriku liikumise kohta midagi kindlat öelda? Auriku hääletul sõidul, mitte kuuldes masina töötamist, on võimatu otsustada, kas aurik liigub või mitte. On vaja lükata kõrvale eesriie ja leida kaldal mingi liikumatu ese. Ainult selle eseme kauguse muutumise järgi on võimalik otsustada auriku liikumise üle.

Seega, soovides otsustada, kas keha liigub või mitte ja kuidas ta liigub, peame näitama, missuguste kehade suhtes vaadeldakse meid huvitavat liikumist.

Kehi, millede suhtes liikumist vaadeldakse, nimetatakse arvestuskehadeks.

Edaspidi, õppides tundma mitmesuguseid liikumisi, võtame arvestuskehadeks Maa või mõne teise Maa suhtes liikumatu keha, näiteks füüsikakabineti laua, millel tehakse katseid.

Liikumise suhtelisuse ja paigalseisu küsimust uuris kuulus itaalia teadlane Galileo Galilei. Allpool on toodud katkend Galilei raamatust (mis esmakordselt ilmus aastal 1632), milles ta esitab oma vaated antud küsimuse kohta.



Joon. 3. Ehitusel kasutatav tornkraana.

«Dialoog kahest maailmasüsteemist».

Katkend Galileo Galilei samanimelisest raamatust.

«Sulgege end koos sõbraga mingi suure laeva all olevasse saali ja laske sinna kärbseid, liblikaid ja teisi taolisi väikseid lendavaid loomakesi. Olgu seal ka suur anum veega, milles on kalakesed; lakke riputage kruus, millest tilk tilga järel tilgub vett kruusi all olevasse anumasse. Kuni laev seisab paigal, jälgige, kuidas tiivulised loomakesed toas igas suunas ühesuguse kiirusega lendavad. Kalad liiguvad, ujudes mistahes suunas; kõik langevad tilgad satuvad kruusi alla seatud anumasse, ja kui te viskate sõbrale mingi asja, siis ei ole teil vaja seda ühes suunas visata tugevamini kui teises suunas, kui ainult kaugused on võrdsed. Hüpata suudate igas suunas võrdsele kaugusele. Pange kõike seda võimalikult hästi tähele (kuigi ei ole mingisugust kahtlust, et nii see peabki olema, kuni laev seisab paigal) ja pange laev mistahes kiirusega liikuma. Nüüd, kui laeva liikumine on ühtlane, mitte ühele või teisele poole kõikumine, ei märka te vähimatki muutust ühegi ülalnimetatud nähtuse juures ja neist ühegi abil pole võimalik otsustada, kas laev liigub või seisab paigal.»

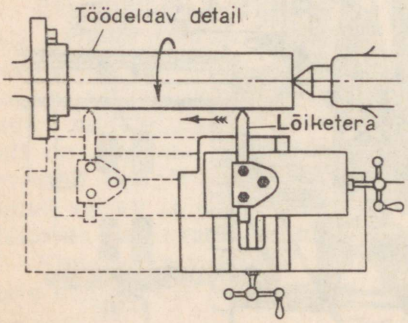
Harjutus 1.

1. Miks räägitakse, et Päike tõuseb ja loojub? Mis on antud juhul arvestuskehaks?
2. Kaks autot liiguvad maanteel nii, et teatava aja vältel kaugus nende vahel ei muutu. Näidake, milliste kehade suhtes kumbki autodest on paigal ja milliste kehade suhtes nad selle ajavahemiku jooksul liiguvad.

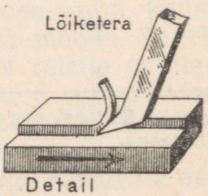
5. Kõva keha ja punkti liikumine. Kehade mehhaanilised liikumised looduses ja tehnikas võivad olla väga mitmesugused ja keerukad.

Kõige lihtsamaks liikumise liigiks on k u l g e v l i i k u m i n e. Kulgeval liikumisel jääb kehas tõmmatud iga sirge iseenesega paralleelseks.

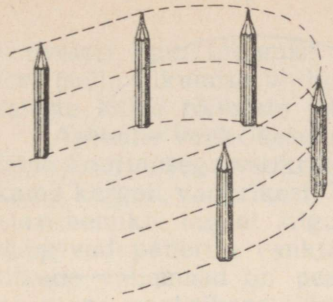
Kulgev liikumine on näiteks laua sahtli liikumine selle väljatõmbamisel, kolvi liikumine aurumasina või sisepõlemismootori silindris, vaguni liikumine sirgel raudteeosal, lõiketera liikumine piki treipingi keret (joon. 4) või detaili liikumine höövelpingil lõiketera suhtes (joon. 5). Joonisel 6 on näidatud pliiatsi kulgev liikumine.



Joon. 4. Lõiketera kulgev liikumine treipingil.

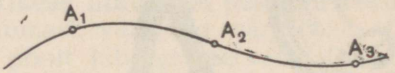


Joon. 5. Detaili kulgev liikumine metalli höövelpingil.



Joon. 6. Pliiatsi kulgev liikumine.

Joon. 7. Liikuva punkti trajektoor.



Kulgeval liikumisel läbivad kõik keha punktid ühesugused kaugused ja kujutavad oma liikumisel ühesuguseid jooni. Järelikult, *et uurida kõva keha kulgevat liikumist, on küllaldane uurida keha mingi ühe punkti liikumist.*

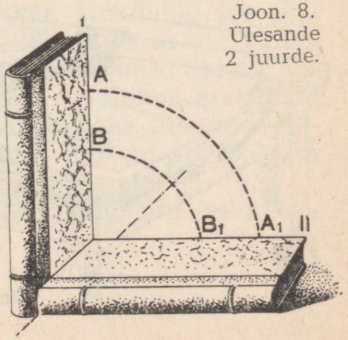
Edaspidi kõneleme sageli keha kulgevast liikumisest, vaadeldes keha punktina.

Kui ruumis liikuva keha järjestikused asukohad pidevalt märkida punktidega, näiteks A_1, A_2, A_3 jne. (joon. 7), siis läbi nende punktide tõmmatud joont nimetatakse l i i k u m i s e t e e k s ehk t r a j e k t o o r i k s. Tõmmates pliiatsiga mööda paberit, jätame paberile jälje — pliiatsiotsa liikumise trajektoori. Leekkuulidega lastes on märgi tabamine kergem, kuna on näha kuuli liikumise trajektoor. Meteoor, sattudes Maa atmosfääri, hakkab hõõguma ja jätab enda järele lühikeseks ajaks helendava jälje, mis näitab ta lennu trajektoori.

Teatavas ajavahemikus läbitud tee arvestamine toimub piki trajektoori mingist tinglikult valitud trajektoori punktist A_1 (joon. 7), milles keha on vaatlemise algmomendil.

Igasugusel liikumisel sõltub punkti poolt läbitud tee ajast. Leida viis, mis lubab määrata punkti asukohta trajektooril mistahes ajahetkel, tähendab kindlaks määrata punkti liikumise seadust. Liikumise seadust võib väljendada mitmel kujul: seda võib esitada matemaatilise valemina, mis seob liikumist iseloomustavaid suurusi; võib esitada tabeli kujul ja, lõpuks, võib kujutada graafiliselt mingi joonena.

Punkti liikumine on määratud, kui on teada ta trajektoor ja liikumise seadus sellel trajektooril.

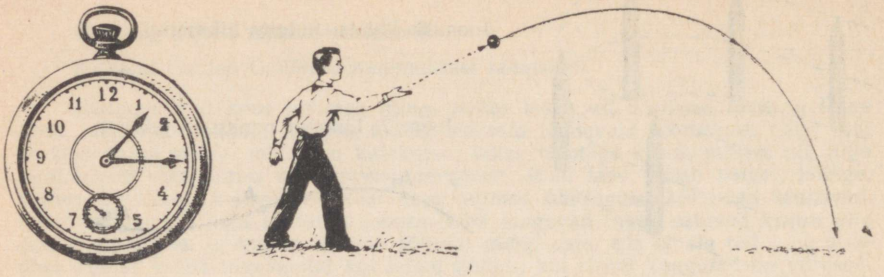


Joon. 8. Ülesande 2 juurde.

Harjutus 2.

1. Kelk libiseb mäest alla; kuulike veereb mööda kaldrenni; käest lahti lastud kivi langeb. Missugused neist kehadest liiguvad kulgevalt?

2. Vertikaalselt lauale asetatud raamat (joon. 8, asend I) langeb tõuke tagajärjel asendisse II. Kaks punkti A ja B raamatu köitel kujundasid seejuures trajektoorid AA_1 ja BB_1. Kas võib öelda, et raamat liikus kulgevalt? Miks?



Joon. 9. Näiteid kõverjoonelisest liikumisest.

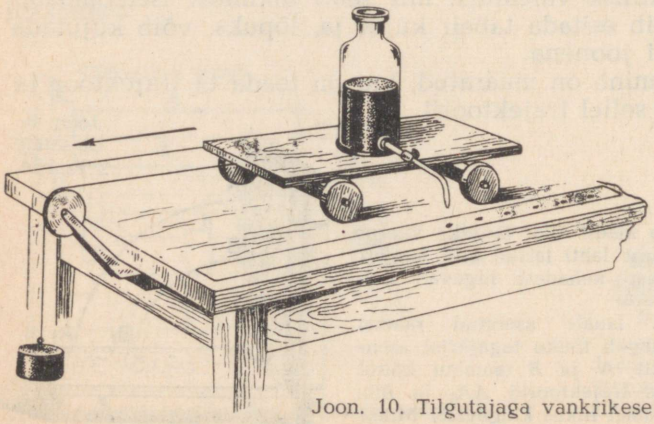
6. Mitmesugused keha liikumise liigid. Keha liikumise trajektoor võib olla sirgjoon või kõverjoon. Vastavalt sellele jaotatakse keha liikumist sirgjooneliseks ja kõverjooneliseks. Joonisel 9 on kujutatud lihtsaid kõverjooneliste liikumiste näiteid: kellaosutite otste liikumine ja horisondi suhtes kaldu visatud palli liikumine.

Sõltumata trajektoori kujust jaotatakse liikumisi ühtlasteks ja mitteühtlasteks.

Ühtlaseks liikumiseks nimetatakse niisugust liikumist, mille juures keha mistahes võrdsetes ajavahemikes läbib võrdsed teeosad.

Kui näiteks esimeses sekundis pärast keha liikumise vaatlemise algust keha läbib 10 m, igas järgnevas samuti 10 m, igas pooles sekundis 5 m, igas viiendikus sekundis 2 m jne., siis ta liigub ühtlaselt.

Looduses tähelepandava ühtlase liikumise näiteks võib olla mingi maapinna punkti liikumine Maa ööpäevasel pöörlemisel. Ühtlase liikumisena võib vaadelda kellaosuti punktide liikumist,



Joon. 10. Tilgutajaga vankrikese ühtlane liikumine.

konveieri lindi liikumist tööstuses, rongi liikumist pikal tasasel teel (selle liikumise ühtlust on kerge kindlaks määrata, kuulates rataste lööke rööbaste jätkukohtadel) ja paljusid teisi liikumisi.

Asetame vankrikesele tilgutusanuma (joon. 10) ja tasakaalustame koormusega vankrikese rataste hõõrde vastu lauda. Siis tõukame kergelt vankrikest. Vankrikese liikumisel peaaegu võrdsete ajavahemike tagant tilgutusanumast väljuvad värvilised tilgad märgivad paberile vankrikese poolt läbitud teeosad. Kukkunud tilkade vahemaad on peaaegu võrdsed, järelikult võib tilgutusanumaga vankrikese liikumist pidada ühtlaseks.

Liikumise uurimisel tuleb mõõta läbitud teeosade pikkusi ja ajavahemikke. Iga mõõtmist võib teostada ainult teatava täpsusega. Seepärast võib ühe või teise liikumise ühtlust määrata ainult niisuguse täpsusega, millisega teostati mõõtmisi.

Harjutus 3.

Kolm reisijat, kes sõitsid samas vagunis, otsustasid vaadelda rongi liikumist, et kindlaks teha, kas ta liigub ühtlaselt.

Esimene neist otsustas vaadelda rongi liikumist $^1/_2$ tunni vältel, märkides teeosad, mille rong läbib kummaski $^1/_4$-tunnis.

Teine — 5 minuti vältel, märkides igas minutis läbitud tee.

Kolmas aga otsustas määrata, mitme sekundiga rong läbib iga kilomeetri esimesest viiest kilomeetrist.

Vaatlusi alustati üheaegselt.

Vaatluste tulemused osutusid järgmisteks:

Esimene reisija leidis, et igas $^1/_4$-tunnis rong läbis 15 km.

Teine — et igas vaadeldavas minutis rong läbis 1 km. Kolmas reisija tegi kindlaks, et esimene kilomeeter viiest läbiti 65, teine 54, kolmas 61, neljas 58 ja viimane 62 sekundiga.

Vaatluste tulemuste põhjal kaks esimest reisijat väidavad, et rong liigub ühtlaselt, kolmas reisija aga arvab, et rong liigub mitteühtlaselt. Kellel neist on õigus?

7. Liikumise kiirus. Kiiruse ühikud. Sageli me räägime, et ühed kehad liiguvad kiiremini, teised aeglasemalt. Näiteks liigub lennuk autost kiiremini, kuid auto võib liikuda kiiremini kõige kiiremast hobusest. Sõnadega «kiirelt» ja «aeglaselt» iseloomustame igapäevases kõnes erinevusi kehade liikumises. Füüsikas on kiirus üheks suuruseks, mis iseloomustab erinevusi kehade liikumises. Ühtlase liikumise korral võime kiiruse suuruse üle otsustada keha poolt võrdseis ajavahemikes ärakäidud tee pikkuste järgi. Mida pikema tee läbib keha ühe ja sama aja vältel, seda suurem on ta kiirus ja ümberpöördult. Seepärast ühtlase liikumise kiirust iseloomustatakse keha poolt ajaühikus ärakäidud teega. Järelikult tuleb selleks, et teada saada keha liikumise kiirust, mõõta kaks suurust: tee ja aeg, mille jooksul see tee ära käidi. Siis tee jagatis ajaga annab meile kiiruse suuruse.

Tähistame kiiruse tähega v. Kui ajaga t käidi ära tee s, siis kiirus

$$v = \frac{s}{t}.$$

Liikumise kiiruseks nimetatakse suurust, mida mõõdetakse tee ja selle läbimiseks kulunud aja suhtega.

Asetame ülalkirjeldatud valemisse $s = 1$ teeühik (pikkusühik), $t = 1$ ajaühik, saame $v = \frac{1 \text{ teeühik}}{1 \text{ ajaühik}} = 1$ kiirusühik.

See tähendab, et *kiirusühikuks on niisuguse liikumise kiirus, mille puhul keha käib ära ühes ajaühikus ühe teeühiku.*

Kui mõõta teed sentimeetrites ja aega sekundites, siis on kiirusühikuks niisuguse liikumise kiirus, mille puhul ühes sekundis käidi ära 1 cm. Kiirusühikuteks on $1 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$, $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $1 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ jt.

Liikugu rong ühtlase kiirusega nii, et 2 tunniga sõidaks ära 72 km pikkuse tee. Arvutada rongi liikumise kiirus.

$v = \frac{s}{t}$; $s = 72$ km; $t = 2$ tundi; $v = \frac{72 \text{ km}}{2 \text{ tundi}} = 36 \frac{\text{km}}{\text{h}^1}$.

Antud juhul on kiirusühikuks $1 \frac{\text{km}}{\text{h}}$.

Leiame saadud kiiruse arvulise väärtuse, võttes kiirusühikuks $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

$$v = 36 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 36 \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Kui kiirusühikuks võtta $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$, siis saame kiirusele järgmise arvulise väärtuse:

$$v = 36 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 36 \frac{100\,000 \text{ cm}}{3600 \text{ s}} = 1000 \frac{\text{cm}}{\text{s}}.$$

Seega kiiruse suuruse arvulised väärtused sõltuvad meie poolt valitud kiirusühikutest või tee ja aja arvulistest väärtustest.

Keha kulgeval liikumisel liiguvad kõik tema punktid ühe ja sama kiirusega. Seepärast on keha mingi punkti kiirus ka kogu keha kiiruseks.

Alljärgnevas tabelis on toodud looduses ja kaasaegses tehnikas esinevate mitmesuguste liikumiste kiirusi.

Liikuvad kehad	Kiirus $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Liikuvad kehad	Kiirus $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Maa (liikudes ümber Päikese)	29 800	Kaasaegne võimas veduri koos rongiga	kuni 35
Kuu (liikudes ümber Maa)	1 000	Auto «Pobeda»	" 30
Välikahuri mürsk	kuni 1 000	Miinilaev	" 17
Püssikuul (rauast väljumise hetkel)	" 900	Tugev tuul	" 20
Reisilennuk	" 300	Jõe vool	" 10
		Jalakäija	1,5—2

[1] h — tunni tähis, võetud esimene täht prantsuskeelsest sõnast *heur* — tund.

Harjutus 4.

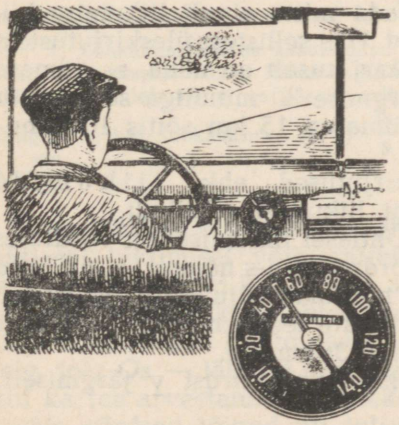
1. Väljendada kiirused: $54\frac{km}{h}$ $\frac{m}{s}$ -tes, 600 $\frac{cm}{s}$ $\frac{km}{h}$-des, 20 $\frac{m}{s}$ $\frac{km}{h}$-des.

2. Kasutades §7 leiduva tabeli andmeid, väljendada lennuki, auto «Pobeda» ja miinilaeva kiirused $\frac{km}{h}$-des.

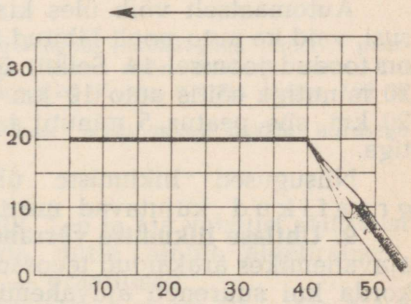
3. Mereasjanduses kasutatakse kiiruse ühikuna sõlme. Arvutada, mitmele $\frac{km}{h}$-le vastab 1 sõlm, kui on teada, et 1 sõlm = 1 $\frac{meremiil}{h}$; 1 meremiil on võrdne 1,852 km.

8. Liikumise graafiline kujutamine. Tehnikas mõõdetakse liikumise kiirust eriliste riistade abil. Üht niisugust riista, mis kinnitatakse autodele, nimetatakse s p i d o m e e t r i k s (joon. 11). Spidomeetri mehhanism on ühendatud auto ratastega. Auto liikumise kiirust näitab osuti spidomeetri skaalal. Kui auto liigub muutliku kiirusega, siis spidomeetri osuti kõigub, näidates kord ühele, kord teisele skaala numbrile. Kui aga auto liigub mõne aja kiirust muutmata, siis osuti seisab skaala ühel ja samal numbril. Seega näitab spidomeeter kiirust, millega auto liigub antud momendil.

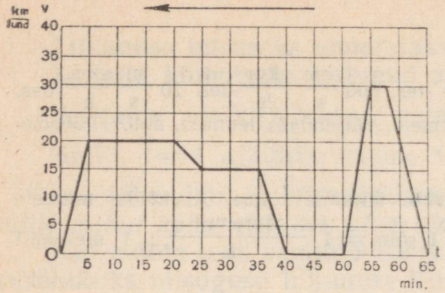
Kui oleks vaja anda ülevaade kõigist muutustest, mis esinesid auto liikumisel, siis tuleks mitmesugustel ajamomentidel auto kiirustest koostada üleskirjutus. Niisuguse üleskirjutuse võib teha erilise riista abil automaatselt. Automaatne üleskirjutus toimub erilise võrguga kaetud paberile, mis kellamehhanismi abil ühtlaselt liigub kirjutava sule all. Erilise seadme abil on sulg ühendatud kiirust näitava mõõduriista osutiga. Kui osuti on paigal, siis püsib paigal ka sulg ja joonestab liikuvale paberile sirge joone (joon. 12). Kui aga riista osuti tõuseb või vajub, tähistades



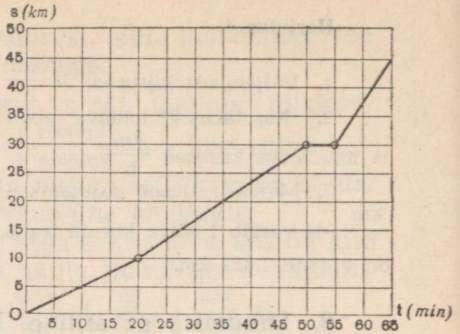
Joon. 11. Spidomeeter.



Joon. 12. Paberi liikumisel pliiatsi (või sule) suhtes joonistab pliiats (või sulg) temale liikumise graafiku.



Joon. 13. Kiiruse graafiku näide.



Joon. 14. Tee graafiku näide.

kiiruse suurenemist või vähenemist, siis ka sulg tõuseb või vajub, joonestades paberile joone. Niiviisi märgib sulg paberile kõik kiiruse muutused.

Kui võrguga kaetud paberile märkida mõõduriista osuti näitudele vastavad kiirused, siis on võimalik üleskirjutuselt määrata auto liikumise kiirus mistahes momendil.

Üks sellistest üleskirjutustest on kujutatud joonisel 13. Sellelt üleskirjutuselt võib lugeda, et sõit kestis 1 tund 5 minutit (paber nihkus edasi ühe ruudu võrra 5 minutiga). Esimese 5 minuti vältel auto arendas kiiruse kuni $20\frac{\text{km}}{\text{h}}$, siis liikus 15 minutit kiirusega $20\frac{\text{km}}{\text{h}}$. 25-nda minuti lõpuks langes kiirus kuni $15\frac{\text{km}}{\text{h}}$. 40 minuti pärast auto peatus 10-ks minutiks. Pärast peatust arendas auto 5 minuti vältel kiiruse kuni $30\ \frac{\text{km}}{\text{h}}$, kuid siis 10 minuti pärast peatus.

Automaatselt võib üles kirjutada mitte ainult liikumise kiirusi, vaid ka auto poolt läbitud teed. Üks sellistest üleskirjutustest on toodud joonisel 14. Sellelt üleskirjutuselt on näha, et esimese 20 minutiga sõitis auto 10 km. Järgmise 30 minutiga sõitis auto 20 km, siis peatus 5 minutit ja viimased 15 km sõitis 10 minutiga.

Niisugused liikumiste üleskirjutused ehk liikumise graafikud kujutavad uuritavat liikumist piltlikult.

9. Ühtlase liikumise võrrand. Ühtlasel liikumisel on võrdsetes ajavahemikes ärakäidud teeosad võrdsed. § 6-s näidati, et nii mitu korda kui suureneb ajavahemik, niisama palju kordi suureneb ka tee. Niiviisi, kui t sekundiga käidi ära tee s cm, siis $2t$ sekundi vältel käiakse $2s$ cm, $3t$ sekundi vältel $3s$ cm jne.

Neil teeosadel väljendatakse liikumise kiirust v järgmiselt:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{2s}{2t} = \frac{3s}{3t} = \dots$$

See aga tähendab, et ühtlasel liikumisel kiirus $v = \frac{s}{t}$ on üks ja sama kõikidel teeosadel.

Seega võime öelda, et *ühtlane liikumine on jääva kiirusega liikumine.*

Teades ühtlase liikumise kiirust, võime aja t vältel läbitud tee leida valemist:

$$s = vt.$$

Seda valemit nimetatakse ühtlase liikumise võrrandiks. See võrrand väljendab matemaatiliselt läbitud tee sõltuvust ajast: **ühtlasel liikumisel on läbikäidud tee võrdeline ajaga.**

Näide. Lennuk lendab kiirusega 720 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$. Millise vahemaa lendab lennuk ära 1 minutiga?

Lahendades seda ülesannet valemi $s = vt$ järgi, peame esialgu avaldama kas kiiruse $\frac{\text{km}}{\text{min}}$-tes või aja tundides. On ilmne, et viimast teha on lihtsam, kuna 1 min = $\frac{1}{60}$ h, siis

$$s = 720\ \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \frac{1}{60}\ \text{h} = 12\ \text{km}.$$

Taoliste ülesannete lahendamisel peavad olema kõik suurused väljendatud vastavates ühikutes.

Harjutus 4a.

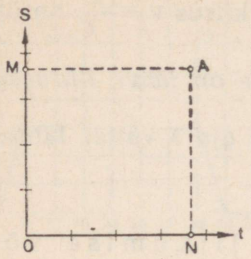
1. Kaks autot liiguvad ühtlaselt. Esimene sõidab 5 minutiga 6 km, teine aga 3 sek. jooksul 90 m. Kumma auto kiirus on suurem?

2. Aurik, liikudes jõel vastuvoolu kiirusega 14 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$, sõidab kahe sadama vahelise kauguse ära 4 tunniga. Kui pika ajaga läbib ta sama vahemaa pärivoolu, kui ta kiirus sel korral on 5,6 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$?

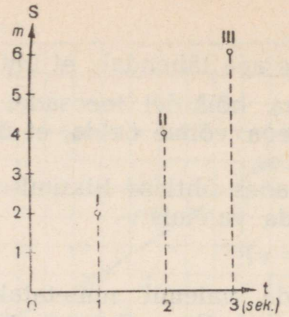
3. Lõhkamistehnikas kasutatakse puurlaengute (lõhkeseguga täidetud puurauk) süütamiseks erilist, väikese kiirusega põlevat nööri (bikfordi nöör). Kui pikk nöör tuleb võtta, et pärast selle süütamist jõuaks süütaja joosta 150 m kaugusele, kui jooksukiirus on 5 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ja leek levib nööri mööda kiirusega 0,8 $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$?

10. Ühtlase liikumise tee graafik. Tee ja aja vahelist sõltuvust ühtlasel liikumisel võib väljendada mitte ainult algebraliselt, valemi kujul, vaid ka joonise abil — graafiliselt.

Tõmbame kaks teineteisega risti olevat sirget Ot ja Os. Neid sirgeid nimetame koordinaattelgedeks (joon. 15). Telg Ot on ajatelg, telg Os — läbitud tee telg. Telgede lõikepunkt O on nii aja kui ka tee arvestamise alguseks. Asetame kindlaksmääratud mastaabis võrdsed lõigud nii teljele Ot kui ka teljele Os. Võtame meie joonisel mingi punkti A. Tõmbame sellest punktist mõle-



Joon. 15. Koordinaatteljed (ajatelg ja läbitud tee telg).



Joon. 16. Ühtlase liikumise tee graafiku konstrueerimine.

male teljele ristsirged. Siis saame ajateljel lõigu ON, mis on arvuliselt võrdne ajavahemikuga, kuid teeteljel saame läbitud teele vastava lõigu OM. Kuid $ON = AM$, kus AM on punkti A kaugus teeteljest ja $OM = AN$ — punkti A kaugus ajateljest.

Seega meie joonisel mingi punkti kaugus teeteljest vastab mingile ajavahemikule, ja kaugus ajateljest — mingile teepikkusele.

Konstrueerime ühtlase liikumise tee graafiku, kui kiirus $v = 2\frac{m}{s}$. Valemi $s = vt$ järgi arvutame sellel liikumisel ühe, kahe jne. sekundiga ärakäidud teede pikkused ja tulemused kirjutame järgmisse tabelisse:

Aeg sekundites	Tee meetrites
0	0
1	2
2	4
3	6
jne.	jne.

Ajateljele asetame 1, 2, 3 sekundile vastavad lõigud. Saadud lõikude otspunktidest tõmbame sellele teljele ristsirged, milledele asetame ühe, kahe ja kolme sekundiga ärakäidud kaugused (joon. 16).

Ühendanud punktid I, II, III ..., saame sirge (joon. 17), mida nimetatakse ühtlase liikumise tee graafikuks.

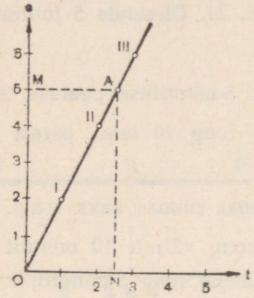
Selle sirge mingi punkti kaugus teeteljest määrab ajavahemiku, kuid selle punkti kaugus ajateljest määrab selles ajavahemikus ärakäidud tee.

Nii näiteks punkti A kaugusele AM teeteljest (joon. 17) vastab 2,5 sek., kuid sama punkti kaugusele AN ajateljest vastab teelõik 5 m, järelikult on 2,5 sekundiga käidud ära 5 m pikkune tee.

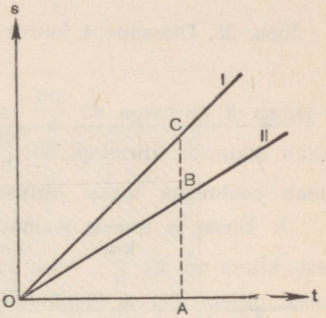
Joonisel 18 on toodud kahe ühtlase liikumise tee graafikud, mis on tähistatud numbritega I ja II. Kumma liikumise kiirus on suurem?

Et vastata sellele küsimusele, võtame ajateljel lõiguga OA kujutatud ajavahemiku. Selle lõigu otsast tõmbame ristsirge kuni lõikumiseni graafikuga. Selle ristsirge lõigud AC ja AB määravad kummalgi liikumisel ühes ja samas ajavahemikus OA ärakäidud teede pikkused.

Kuna AC on suurem kui AB, siis ka esimese liikumise kiirus on suurem teise kiirusest.



Joon. 17. Ühtlase liikumise tee graafik.



Joon. 18. Kahe ühtlase liikumise tee graafikud.

Harjutus 5.

1. Määrata joonisel 19 kujutatud ühtlase liikumise graafiku järgi keha poolt 4,5 sekundiga ärakäidud tee, aeg, mille jooksul käidi ära 15 m, ja liikumise kiirus, kui ruudukese küljele vastab 1 m ja 1 s (vastavat telge mööda).

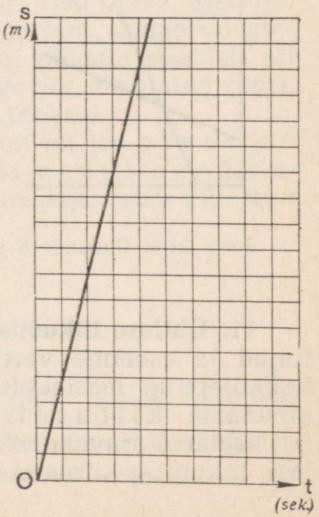
2. Konstrueerida ühel ja samal joonisel kahe ühtlase liikumise tee graafikud, kui liikumiste kiirused on 7,2 $\frac{\text{h}}{\text{km}}$ ja 18 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$.

3. Konstrueerida niisuguse liikumise tee graafik, mille võrrand on: $s = 5\ t$.

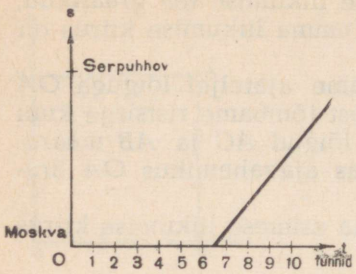
4. Joonisel 20 on antud rongi liikumise graafik. Määrata, mis kellaajal väljus rong, ja liikumise suund.

5. Joonisel 21 on antud rongi liikumise tee graafik. Määrata liikumise kiirused teeosadel, mis on kujutatud lõikudega OA, AB ja BC. Kui pika tee sõitis rong 3 tunniga?

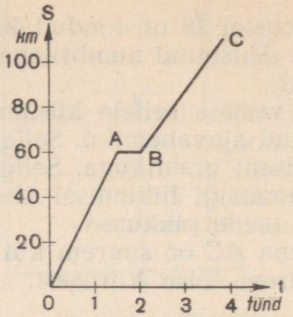
6. Konstrueerige rongi liikumise tee graafik kahe jaama A ja B vahel järgmiste andmete põhjal. Jaamade A ja B vahemaa on 60 km. Liikudes jaamast



Joon. 19. Ülesande 1 juurde.



Joon. 20. Ülesande 4 juurde.



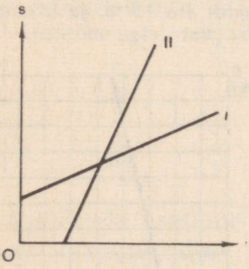
Joon. 21. Ülesande 5 juurde.

A jaama *B* kiirusega 40 $\frac{km}{h}$ teeb rong poolel teel 5-minutilise peatuse, edasi jätkab liikumist kiirusega 60 $\frac{km}{h}$. Jaamas *B* seisab rong 20 min., pärast seda sõidab peatumata tagasi kiirusega 45 $\frac{km}{h}$.

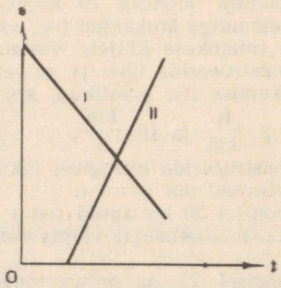
7. Ühest ja samast jaamast väljub ühes ja samas suunas kaks rongi. Esimese kiirus on 30 $\frac{km}{h}$, teise kiirus 40 $\frac{km}{h}$. Teine rong väljub 10 minutit esimesest hiljem. Pärast 40-minutilist liikumist teeb esimene rong 5-minutilise peatuse ja siis jätkab liikumist endise kiirusega.

Määrake graafiliselt, millal ja kui kaugel jaamast jõuab teine rong esimesele järele. Graafilist lahendust kontrollige arvutamise teel.

8. Mille poolest erinevad teineteisest I ja II liikumine, millede graafikud on antud joonistel 21-*a* ja 21-*b*? Mida kujutab graafikute lõikepunkt ja mida võib selle abil teada saada?



Joon. 21-*a*. Ülesande 8 juurde.



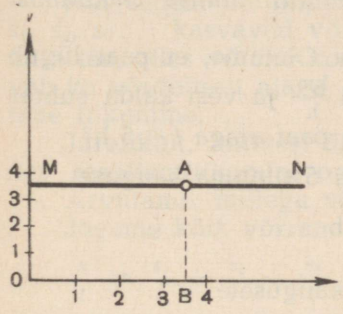
Joon. 21-*b*. Ülesande 8 juurde.

11. Ühtlase liikumise kiiruse graafik. Joonestame koordinaatteljed ja asetame vertikaalteljele lõigud, mis vastavad mingis kokkulepitud mastaabis keha liikumise kiirustele. Seda telge nimetame k i i r u s e t e l j e k s (*Ov*). Teisele teljele (ajateljele *Ot*) asetame ajavahemikele vastavad lõigud (joon. 22). Kuna ühtlase liikumise kiirus ei muutu ajaga, siis selle graafik on ajatel-

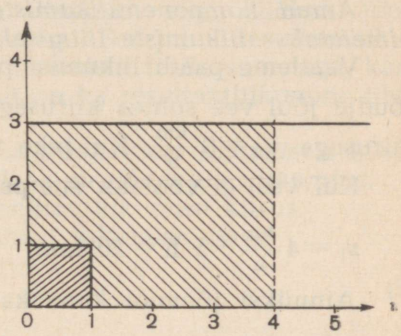
jega paralleelne sirge MN. Kui sellel graafikul võtta mingi punkt A, siis sirglõik AB, mis kujutab endast selle punkti kaugust ajateljest, on võrdne antud ühtlase liikumise kiirusega.

Kasutades kiiruse graafikut, võib määrata ka teatud ajavahemikul läbitud tee.

Liikugu jalgrattur ühtlaselt kiirusega $3\ \frac{m}{s}$. Joonisel 23 on kujutatud selle liikumise kiiruse graafik mastaabis: 1 cm — $1\ \frac{m}{s}$ 1 cm — 1 s.



Joon. 22. Ühtlase liikumise kiiruse graafik.



Joon. 23. Ärakäidud tee määramine graafiku järgi.

Et leida näiteks jalgratturi poolt 4 sekundi jooksul läbitud tee pikkus, on vaja kiirus korrutada ajaga, s. t. kiiruseteljel asuva lõigu 0—3 arvuline väärtus korrutada sellega risti oleva, ajateljel asuva lõigu 0—4 arvulise väärtusega. Tulemusena saame viirutatud ristküliku pindala. Viirutatud ristküliku pindala sisaldab nii mitu mastaabile vastavat pindalaühikut (tugevalt viirutatud ruut), kui mitu meetrit sõitis jalgrattur 4 sekundi jooksul.

Seega ühtlase liikumise kiiruse graafikul on tee arvuline väärtus võrdne niisuguse ristküliku pindala arvulise väärtusega, mille üks külg on võrdne liikumise kiirusega, teine külg aga liikumise ajaga.

Harjutus 6.

Konstrueerida ühel joonisel kahe ühtlase liikumise kiiruse graafikud: $v_1 = 3\ \frac{m}{s}$ ja $v_2 = 5\ \frac{m}{s}$. Samale joonisele konstrueerige ka ristkülikud, millede pindalad on arvuliselt võrdsed 6 sek. jooksul läbitud teedega.

12. Liikumiste liitmine. Mingi keha liikumist võime vaadelda mitmest lihtsast liikumisest koosnevana. Nii näiteks inimese liikumist laevalael kalda suhtes võib vaadelda liitliikumisena, mis koosneb inimese liikumisest laeva suhtes ja laeva liikumisest kalda suhtes.

Inimese liikumist laeva suhtes ja laeva liikumist kalda suhtes nimetatakse liidetavateks ehk komponentliikumisteks, kuna inimese liikumist kalda suhtes — resultantliikumiseks.

Uurides komponentliikumiste seadusi, võib avastada ka resultantliikumise seaduse.

Antud komponentliikumistest resultantliikumise määramist nimetatakse liikumiste liitmiseks.

Vaatleme paadi liikumist pärivoolu. Oletame, et paat liigub sõudja jõul vee suhtes kiirusega $v_1 = 4\,\frac{\text{km}}{\text{h}}$ ja vesi kalda suhtes kiirusega $v_2 = 3\,\frac{\text{km}}{\text{h}}$. Kui pika tee läbib paat ajaga $t = 5$ h?

Kui vesi ei voolaks, siis paat läbiks 5 tunniga kauguse

$$s_1 = 4\,\frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 5\ \text{h} = 20\ \text{km}.$$

Ainuüksi jõevool kannaks paadi kaugusele

$$s_2 = 3\,\frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 5\ \text{h} = 15\ \text{km}.$$

Kuna paati nihutab ühel ja samal ajal nii sõudja kui ka vool, siis pärivoolu läbib ta 5 tunniga vahemaa

$$s = 20\ \text{km} + 15\ \text{km} = 35\ \text{km}.$$

Mis muutub, kui kiirused jäävad suuruselt samaks, kuid sõudja sõuab vastuvoolu?

On selge, et nii sõudmise kui ka voolu mõjul läbib paat niisama pikad vahemaad kui esimesel korral. Nüüd aga sõudja nihutab paati 5 tunniga 20 km vastuvoolu, samal ajal kannab vool paati 15 km pärivett. Et paat liigub sirget joont mööda, siis nende liikumiste tulemusena läbib paat 5 tunniga vahemaa

$$s = 20\ \text{km} - 15\ \text{km} = 5\ \text{km}.$$

Kui tee vastuvoolu lugeda positiivseks, pärivoolu aga negatiivseks, siis võime kirjutada, et

$$s = 20\ \text{km} + (-15\ \text{km}) = 5\ \text{km}.$$

Nii ühel kui teisel juhul on resultantliikumise tee leidmiseks vaja algebraliselt liita komponentliikumiste teed.

Kui paadile mõjuks tema liikumise suunas tuul, siis on selge, et paadi poolt sama ajaga ärakäidud tee kujuneks kolmest kom-

ponentliikumise teest (sõudja, voolu ja tuule mõjul ärakäidud teest).

Analoogiliselt võib leida keha poolt resultantliikumisel ärakäidud tee, kui resultantliikumine koosneb kuitahes mitmest piki ühte sirget suunatud ühtlasest liikumisest.

Kui s on resultantliikumise tee, kuid s_1, s_2, s_3 jne. on komponentliikumiste teed, siis võib kirjutada:

$$s = s_1 + s_2 + s_3 + \ldots \qquad (1)$$

Seejuures loetakse ühes suunas ärakäidud teid positiivseteks, vastassuunas aga negatiivseteks.

Kui liidetavad liikumised on ühtlased, siis käidud teed s_1, s_2, s_3 ... kasvavad võrdeliselt ajaga. Sel juhul resultantliikumise tee, olles võrdne komponentliikumiste teede summaga, kasvab ka võrdeliselt ajaga. Järelikult on ka resultantliikumine ühtlane liikumine.

Järelikult, *mitmest ühtlasest sirgjoonelisest liikumisest koosnev resultantliikumine on ka ühtlane sirgjooneline liikumine.*

Arvutame, millega võrdub resultantliikumise kiirus.

Jagame kõik võrrandi (1) liikmed liikumise ajaga:

$$\frac{s}{t} = \frac{s_1}{t} + \frac{s_2}{t} + \frac{s_3}{t} + \ldots \qquad (2)$$

Kuid $\frac{s}{t} = v$ — see on resultantliikumise kiirus, ja $\frac{s_1}{t} = v_1$, $\frac{s_2}{t} = v_2$, $\frac{s_3}{t} = v_3$, ... — need on liidetavate liikumiste kiirused. Järelikult võime võrduse (2) kirjutada järgmiselt:

$$v = v_1 + v_2 + v_3 + \ldots$$

Seega, *resultantliikumise kiirus on võrdne komponentliikumiste kiiruste algebralise summaga.*

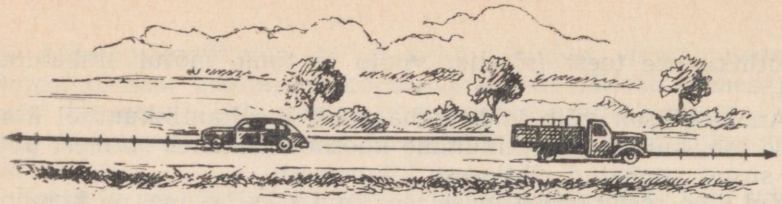
Seejuures loetakse positiivseks niisuguse liikumise kiirust, mille suunas tee loetakse positiivseks, negatiivsele tee suunale vastab aga negatiivne kiirus.

Harjutus 7.

1. Kahe jõesadama vaheline kaugus on 144 km. Kui palju aega vajab aurik nimetatud sadamate vahelise kauguse läbimiseks edasi-tagasi, kui auriku kiirus seisvas vees on 18 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ ja voolu kiirus 3 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$?

2. Lennuk, lennates kiirusega 300 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$, kattis aerodroomide A ja B vahemaa 2,2 tunniga. Vastutuulega sooritas ta tagasilennu 2,4 tunniga. Määrata tuule kiirus.

3. Kahest jõesadamast, millede vahemaa on 70 km, väljusid üheaegselt kaks aurikut, liikudes teineteisele vastu. Aurikud kohtusid 2,5 tunni pärast, kusjuures pärivoolu sõitev aurik läbis selle aja jooksul 55,5 km. Voolu kiirus on 2 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$. Määrata aurikute kiirused seisvas vees.



Joon. 24. Mitmesuguste kiiruste vektoreid. $10\ \frac{km}{h}$

13. Kiirus kui vektor. Liikumise määramiseks ei ole küllaldane ainult keha poolt läbitud tee ja ta kiiruse teadmisest. On vaja teada ka liikumise suunda. Näiteks, et määrata, kus asub kahe tunni pärast lennuk, mis lendas välja Moskvast kiirusega $400\frac{km}{h}$, peame teadma, mis suunas ta lendas.

Et täielikult määrata keha liikumist, on lepitud kokku märkida kiirusele juurde suund.

Selleks kujutatakse kiirust sirglõiguna, mille siht ühtib keha liikumise sihiga. Nool sirglõigu otsas näitab, millises suunas seda sihti mööda keha liigub. Sama lõigu pikkus kujutab vastavas mastaabis antud kiiruse suurust.

Suurusi, mida määratakse mitte ainult arvuliste väärtustega, vaid ka suunaga ruumis, nimetatakse vektoriaalseteks suurusteks ehk vektoriteks.

Kiirus on vektor.

Iga vektorit võib kujutada suunatud lõiguna. Joonisel 24 kujutavad suunatud sirglõigud kahte kiirust, mis on suuruse ja suuna poolest erinevad. Füüsika õppimisel kohtume veel paljude teiste vektoriaalsete suurustega.

Erinevalt vektoriaalsetest suurustest on veel suurusi, millede ei või omistada mingit suunda ruumis. Need võivad erineda ainult suuruse ja vahel ka märgi poolest. Niisuguseid suurusi nimetatakse skalaarseteks suurusteks ehk skaalariteks.

Skalaarseteks suurusteks on aeg, temperatuur, töö, energia ja paljud teised suurused.

Harjutus 8.

1. Hobune veab mööda maanteed kagu suunas vankrit kiirusega $10{,}8\ \frac{km}{h}$. Väljendada see kiirus $\frac{m}{s}$-tes ja kujutada seda graafiliselt.

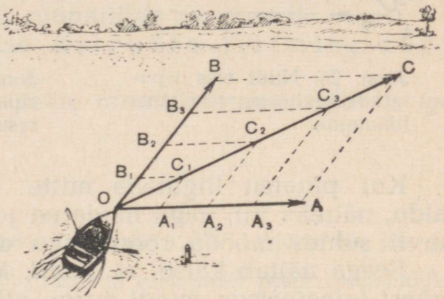
2. Laev liigub kirde suunas kiirusega $24\frac{km}{h}$. Lennuk lendab põhja suunas kiirusega $200\ \frac{km}{h}$. Kujutada need kiirused joonisel.

3. Tuulega langevad vihmapiisad kaldu. Oletame, et piiskade liikumise suund moodustab vertikaalsihiga 30°-se nurga ja et nad liiguvad kiirusega $5\frac{m}{s}$. Kujutada vihmapiiskade kiirus graafiliselt.

14. Lõikuvate suundadega ühtlaste sirgjooneliste liikumiste liitmine. Mõnikord võime meid huvitavat liikumist vaadelda kui mitme lõikuva suunaga liikumise liitmise tulemust. Niisugused on näiteks paadi liikumine risti üle jõe või lennuki liikumine külgtuulega.

Vaatleme, milline on kahe lõikuva suunaga ühtlase sirgjoonelise liikumise resultantliikumine.

Uurides risti üle jõe sõitva paadi liikumist, näeme, milliseks kujuneb kahe ühtlase sirgjoonelise liikumise resultant.



Joon. 25. Paadi ja vee liikumiste liitmine.

Kui puuduks vool, siis sõudja jõupingutuse mõjul nihkuks paat OB suunas (joon. 25), mööodudes võrdsete ajavahemike tagant joonisel tähtedega B_1, B_2, B_3 jne. tähistatud punktidest.

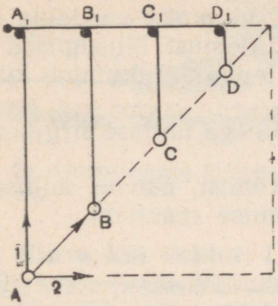
Kuid samade võrdsete ajavahemike vältel nihutab vool paati piki sirget OA läbi punktide A_1, A_2, A_3 jne.

Võttes üheaegselt osa kahest liikumisest, katab paat sõudja jõupingutuse mõjul ajaühikus tee OB_1, jõe vool kannab aga paadi samal ajal kaugusele OA_1, seega toimub paadi tõeline liikumine kalda suhtes piki sirget OC läbi punktide C_1, C_2, C_3 jne.

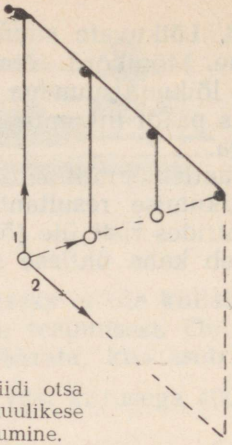
Jooniselt on näha, et selleks sirgeks on niisuguse rööpküliku $OBCA$ diagonaal, mille külgedeks OB ja OA on liidetavatel liikumistel läbitud teed. Samalt jooniselt on ka näha, et paadi poolt piki diagonaali OC võrdseis ajavahemikes läbitud teed on omavahel võrdsed: $OC_1 = C_1C_2 = C_2C_3 = C_3C$; järelikult on piki rööpküliku diagonaali toimuv paadi resultantliikumine ühtlane ja sirgjooneline.

Need paadi liikumise uurimisel saadud järeldused on õiged igal sellisel juhul, mil keha võtab üheaegselt osa mitmest liikumisest. Et selles veenduda, teeme katseid.

Kinnitame tahvlile niidi, mille otsa on riputatud väike kuulike. Niidi ülemise otsa A_1 alla asetame pliiatsi ja liigutame seda horisontaalselt piki tahvlit. Siis kuulike liigub üheaegselt vertikaalselt üles ja horisontaalselt. Tahvli suhtes nihkub ta mööda niisuguse ristküliku diagonaali, mis on ehitatud liidetavatele liikumistele kui ristküliku külgedele (joon. 26).



Joon. 26. Niidi otsa riputatud kuulikese resultantliikumine.



Joon. 27. Niidi otsa riputatud kuulikese resultantliikumine.

Kui pliiatsit liigutada mitte horisontaalselt, vaid kuidagi kaldu, näiteks nii, nagu näidatud joonisel 27, siis nihkub kuulike tahvli suhtes mööda rööpküliku diagonaali.

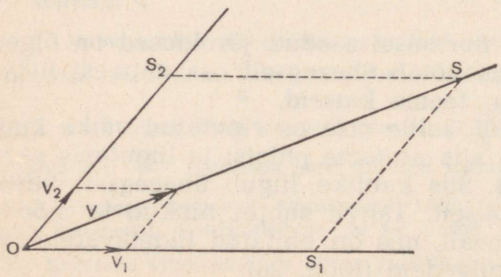
Seega näitab katse, et *juhul, kui keha võtab üheaegselt osa kahest teineteisega mingi nurga all suunatud ühtlasest sirgjoonelisest liikumisest, siis nende resultantliikumine on ühtlane ja sirgjooneline. Sellel liikumisel läbitud teed kujutab niisuguse rööpküliku diagonaal, mis on ehitatud komponentliikumistel läbitud teedele kui rööpküliku külgedele.*

Harjutus 9.

1. Paat ujub risti üle jõe, mille laius on 48 m. Jõest üleujumise ajal kannab vool teda 36 m pärivett. Määrata graafiliselt paadi resultantliikumine.
2. Tõstekraana (vaata joon. 3, lk. 9) liigub horisontaalselt edasi 6 m. Samal ajal laskub ümbertõstetav koorem 4 m võrra. Määrata graafiliselt koorma resultantliikumine.

15. Kiiruste liitmine. Liikumiste liitmiselt on kerge üle minna kiiruste liitmisele. Vaatleme joonist 28.

Kujutagu rööpküliku küljed kahel samaaegsel liikumisel ühes ja samas ajavahemikus ärakäidud teid s_1 ja s_2 ning rööpküliku diagonaal — resultantliikumisel ärakäidud teed s.



Joon. 28. Kiiruste liitmine.

Kui käidud tee jagame liikumiseks kulunud ajaga t, siis vastavate liikumiste kiirused on:

$$v_1 = \frac{s_1}{t},\ v_2 = \frac{s_2}{t} \text{ ja } v = \frac{s}{t}.$$

Teame, et sirgjoonelise liikumise kiiruse suund ühtib liikumise suunaga (§ 13). Asetame alates punktist O liikumise sihile nende kiiruste vektorid. Ühendades sirgetega vektorite v_1 ja v_2 otsad vektori v otsaga, saame rööpküliku Ov_2vv_1, mis on sarnane rööpkülikuga Os_2ss_1. Järelikult, *resultantliikumise kiirust kujutab nii suuruselt kui ka suunalt komponentliikumiste kiirustele kui rööpküliku külgedele ehitatud rööpküliku diagonaal.*

Seda järeldust nimetatakse kiiruste liitmise rööpküliku reegliks.

Rööpküliku reegel kehtib mitte ainult kiiruste, vaid ka igasuguste vektorite kohta.

Harjutus 10.

1. Mootorpaat, mille kiirus seisvas vees on $8\ \frac{km}{h}$, sõidab üle jõe risti voolu suunaga. Voolu kiirus on $6\ \frac{km}{h}$. Määrata graafiliselt paadi resultantliikumise kiirus.

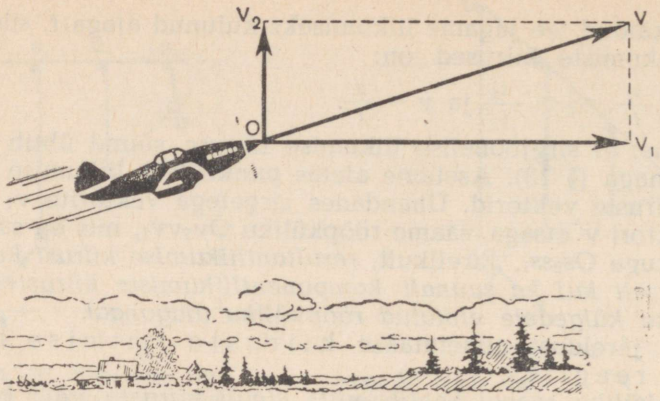
2. Tuulevaikse ilmaga on langevarjuri maandumiskiirus $5\ \frac{m}{s}$. Milline on maandumiskiirus siis, kui tuul kannab langevarjurit horisontaalsuunas kiirusega $4\ \frac{m}{s}$? Lahendada ülesanne graafiliselt.

3. Lennuk lendab põhja suunas kiirusega $60\ \frac{m}{s}$. Puhub läänetuul kiirusega $10\ \frac{m}{s}$. Määrata graafiliselt lennuki resultantkiirus.

4. Näidata joonisel, kuidas tuleb suunata paati, millest oli jutt ülesandes nr. 1, et see ujuks üle jõe risti. Milline oleks sel korral paadi resultantliikumise kiirus?

16. Kiiruse lahutamine komponentideks. Joonisel 29 on kujutatud lennuk, mis tõuseb maapinnalt üles kiirusega v mingi nurga all horisondi suhtes.

Olgu meil vaja teada, millise kiirusega tõuseb lennuk vertikaalselt üles ja millisega liigub horisontaalsuunas. Kujutame, et lennuki kiirus koosneb kahest liidetavast: horisontaalselt suunatud kiirusest ja vertikaalselt suunatud kiirusest. Selleks kasutame rööpküliku reeglit. Kujutagu selle rööpküliku diagonaal lennuki kiiruse vektorit v. Vektori v algusest tõmbame kaks teineteisega ristuvat sirget, ühe vertikaal-, teise horisontaalsuunas. Siis tõmbame selle vektori lõpust kahe antud suunaga paralleelsed sirged. Need eraldavad lõigud, milledest ühe arvuline väärtus on võrdne kiiruse horisontaalkomponendiga v_1, teine — vertikaalkomponendiga v_2.



Joon. 29. Kiiruse v lahutamine horisontaalsuunaliseks (v_1) ja vertikaalsuunaliseks (v_2) komponendiks.

Antud kiiruse järgi tema komponentkiiruste leidmist nimetatakse kiiruse lahutamiseks.

Kiiruse lahutamine komponentideks on vastupidine tehe kiiruste liitmisele.

Kuna iga kiirust võib vaadelda resultantkiirusena, siis võib järelikult ka iga kiirust lahutada komponentideks.

Tuleb tähele panna, et antud kiirust võib kujutada paljude erinevate külgedega rööpkülikute diagonaalina. Järelikult võib antud kiirust lahutada hulgaks erinevateks kiiruste paarideks. Praktikas kohtame sageli kiiruse kaheks komponendiks lahutamise juhtumeid, kus komponendid on teineteisega risti. Niisuguse ülesande lahendasime meiegi.

Harjutus 11.

1. Paat liigub mingisuguse kiirusega mingi nurga all kalda suhtes. Määrata, millise vahemaa võrra igas sekundis eemaldub paat ristsuunas kaldast ja kui palju liigub paat samal ajal pikisuunas kaldaga? Lahendada ülesanne graafiliselt, kui on teada, et paat liigub kalda suhtes 60°-se nurga all kiirusega $3\frac{m}{s}$.

2. Kahuri toru moodustab horisondiga nurga 60°. Mürsk lendab torust välja kiirusega 800 $\frac{m}{s}$. Leida ta kiiruse horisontaalkomponent. Määrata, millise kauguse läbib mürsk horisontaalsuunas 5 sekundi jooksul. Õhutakistust ei arvestata.

II PEATÜKK.

ÜHTLASELT MUUTUV SIRGJOONELINE LIIKUMINE.

17. Mitteühtlase liikumise keskmine kiirus. Enamik looduses ja tehnikas toimuvatest liikumistest on muutlikud, see on mitteühtlased liikumised. Niisugused on näiteks auto, traktori, rongi, inimeste, loomade jt. liikumised.

Mitteühtlase liikumise iseloomustamiseks mingil teeosal kasutatakse k e s k m i s e k i i r u s e mõistet.

Sõitku rong tee Moskvast Gorkini (440 km) 11 tunniga. Rongi liikumine kogu teel oli ilmselt mitteühtlane: kord ta kiirendas liikumist, kord aeglustas, ja vahejaamades isegi peatus. Kui aga rong oleks 440 km pikkuse tee sõitnud 11 tunniga ühtlaselt, siis oleks ta liikunud kiirusega $\frac{440\text{ km}}{11\text{ h}} = 40\ \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Kiirus $40\ \frac{\text{km}}{\text{h}}$ on rongi mitteühtlase liikumise keskmine kiirus teel Moskvast Gorkisse.

Mitteühtlase liikumise keskmiseks kiiruseks antud teeosal nimetatakse teeosa pikkuse ja selle tee läbimiseks kulunud aja suhet:

$$v_k = \frac{s}{t}.$$

Nii aga arvutatakse ka ühtlase liikumise kiirust. Järelikult võib öelda, et *mitteühtlase liikumise keskmine kiirus on võrdne ühtlase liikumise kiirusega, mille puhul keha käib ära sama tee niisama pika ajavahemikuga kui antud mitteühtlasel liikumisel.*

Kui mitteühtlasel liikumisel mingil teeosal on teada aeg ja keskmine kiirus, siis selle teeosa pikkuse võib arvutada valemi järgi:

$$s = v_k t.$$

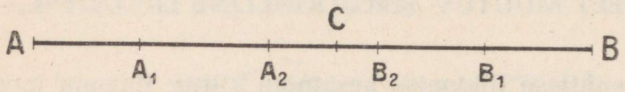
Harjutus 12.

1. Rong sõitis 25 km 35 minutiga, kusjuures esimesed 10 km sõitis ta 18 minutiga, järgmised 10 km 12 minutiga, kuid viimased 5 km 5 minutiga. Määrata rongi keskmine kiirus igal teeosal ja kogu teel.
2. Mäelt alla sõites libises kelk esimesel sekundil 2 m, teisel 6 m, kolmandal 10 m ja neljandal 14 m. Leida liikumise keskmine kiirus kahel esimesel sekundil, kahel viimasel sekundil ja kogu liikumise ajal.
3. Miks ei või rääkida muutuva liikumise keskmisest kiirusest üldse, vaid ainult keskmisest kiirusest antud ajavahemikul või keskmisest kiirusest antud teeosal?

18. Hetkeline kiirus. Igal hetkel liigub keha teatud kiirusega ja igale hetkele vastab teatud punkt trajektooril.

Kiirust, mis kehal on antud hetkel või antud trajektoori punktis, nimetatakse hetkeliseks kiiruseks.

Keha ühtlasel liikumisel on ta kiirus kõigis trajektoori punktides ühesugune. See ongi tema hetkeline kiirus. Keerulisem on lugu hetkelise kiirusega mitteühtlasel liikumisel.

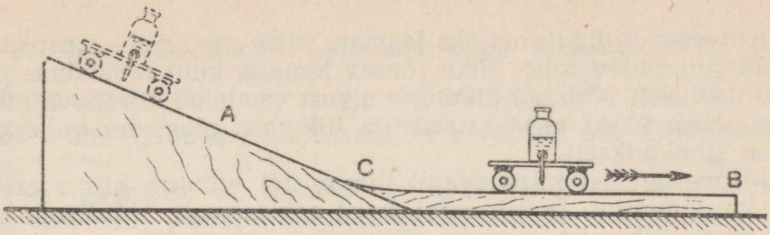


Joon. 30. Hetkelise kiiruse mõiste selgitamiseks.

Oletame, et keha, liikudes mitteühtlaselt ja sirgjooneliselt, käis t sekundiga läbi tee $AB = s$ (joon. 30). Selle liikumise keskmine kiirus $v_k = \frac{s}{t}$. Üldiselt rääkides see kiirus ei iseloomusta liikumist mingis tee punktis C ega määra kiiruse suurust selles punktis. Et määrata kiirust punktis C, toimime järgmiselt. Jagame kogu tee AB üksikuteks osadeks ja määrame keskmise kiiruse väiksemal teeosal A_1B_1, siis veel väiksemal teeosal A_2B_2 jne., tulles järjest punktile C ikka lähemale ja lähemale. Mida enam väheneb punkti C sisaldav teeosa ja järelikult ka, mida enam väheneb selle teeosa läbimiseks kulunud aeg, seda vähem erineb liikumine sellel teeosal ühtlasest liikumisest. Lõppude lõpuks ei ole võimalik meie mõõduriistadega kindlaks teha seda erinevust. Niisuguseis väikseis ajavahemikes on liikumine praktiliselt ühtlane, ja selle liikumise kiiruse võime võtta mitteühtlase liikumise hetkeliseks kiiruseks trajektoori antud punktis.

Kinnitame nüüd arvuliste andmetega meie üldisi arutlusi hetkelise kiiruse kohta. Määraku neli vaatlejat auto kiirust mingist tee ääres asuvast esemest möödumise hetkel. Sellest esemest möödumise hetkest alates mõõdavad üheaegselt kõik vaatlejad auto poolt läbitud teeosi erinevail ajavahemikel. Nende vaatlusandmed on järgmised.

Vaatleja	Vaatlemise aeg	Läbitud tee km	Kiirus $\frac{\text{km}}{\text{h}}$
1	5 min $= \frac{1}{12}$ tundi	2,5	30
2	1 min $= \frac{1}{60}$ tundi	0,47	28
3	30 s $= \frac{1}{120}$ tundi	0,21	25
4	3 s $= \frac{1}{1200}$ tundi	0,02	24



Joon. 31. Hetkelise kiiruse katseline määramine.

Milline vaadeldavatest kiirustest on lähem hetkelisele kiirusele, millega auto möödus eespool nimetatud esemest? Ilmselt on selliseks kiiruseks neljanda vaatleja andmetest saadud kiirus, kuna 3 sekundiga ei võinud auto oma kiirust tunduvalt muuta. Seega, mida lühem ajavahemik võtta, seda täpsemalt võib määrata auto hetkelist kiirust.

Hetkelist kiirust võib määrata katseliselt. Vaatleme joonist 31. Mööda kaldpinda sõidab alla tilgutajaga varustatud vankrike. Tilkade jälgede järgi võime kergesti märgata, et vankrike liigub mitteühtlaselt. Olgu meil vaja leida vankrikese hetkeline kiirus mingis kaldpinna punktis, näiteks tema alumises punktis *C*.

Kasutades tilgutajat samuti nagu lk. 13 kirjeldatud katses, on kerge põhjendada, et pärast vankrikese möödumist punktist *C* liigub ta lühikest aega pärast seda ühtlaselt. Järelikult on kiirus punktis *C* samasugune nagu ühtlasel liikumisel läbikäidud teel. Märkides üles aja, mille jooksul mingi vankrikesel asuv punkt liigub ühtlaselt, ja mõõtes selle aja jooksul läbikäidud tee, võime määrata ühtlase liikumise kiiruse, mis ongi otsitavaks hetkeliseks kiiruseks punktis *C*.

Hetkelise kiiruse määramiseks punktis *A* on ainult vaja horisontaalne osa *C* tõsta punkti *A* tasemele ja viia läbi samasugused mõõtmised, nagu seda tehti punkti *C* puhul.

Auto liikumise hetkelisi kiirusi näitab osuti spidomeetri skaalal.

Harjutus 13.

1. Millist kiirust mõeldakse, kui kõneldakse rongi, auto või lennuki liikumise kiirusest mingi kahe punkti vahel?

2. Kuul lendas rauast välja kiirusega $600\frac{m}{s}$. Millist kiirust siin mõeldakse?

3. Näidata, et mitteühtlase liikumise keskmine kiirus mingis ajavahemikus on suurem selle ajavahemiku väikseimast ja väiksem selle suurimast hetkelise kiiruse väärtusest. Kasutage selleks ühtlasel liikumisel läbitud tee graafilist kujutist kiiruse graafikul.

19. Kiirendus. Mitmesuguste mitteühtlaste liikumiste seas esineb liikumisi, milles kiirus pidevalt kasvab. Niisuguseid liikumisi nimetatakse k i i r e n e v a t e k s.

Kiirenevalt liigub näiteks jaamast väljuv ja oma kiirust järkjärgult suurendav rong, õhku tõusev lennuk, kuul rauaõõnes jne. Oma olemuselt võib iga liikumise algust vaadelda kiireneva liikumisena, sest ükski keha ei saavuta liikumist alustades vajalikku kiirust silmapilkselt.

Mitmesugustel kiirenevatel liikumistel muutub kiirus erinevalt, kord muutub ta kiiremini, kord aeglasemalt. Võrdleme näiteks rongi liikumist jaamast väljumisel kahurist lastava mürsu liikumisega kahuri torus. Need mõlemad on kiirenevad liikumised. Rongi kiirus kasvab võrdlemisi aeglaselt, mürsu kiirus suureneb aga mõne sajandiku sekundiga nullist kuni sadade meetriteni sekundis.

Seega erinevad kiirenevad liikumised üksteisest kiiruse muutumise kiiruse poolest.

Kiiruse muutumise kiirust iseloomustab füüsikaline suurus, mida nimetatakse k i i r e n d u s e k s.

Mida kiiremini muutub liikumise kiirus, seda suurem on kiirenduse suurus.

Tähistame mitteühtlaselt liikuva keha algkiiruse tähega v_0 ja kiiruse t sek. pärast tähega v_t; siis kiiruse muutus selles ajavahemikus on $v_t - v_0$. Muutugu liikumise kiirus igas sekundis ühe ja sama suuruse võrra, siis kiiruse muutus ühes sekundis on:

$$\frac{v_t - v_0}{t}.$$

Suurust, mida mõõdetakse kiiruse muutumise ja selleks muutumiseks kulunud aja suhtega, nimetatakse kiirenduseks.

Tähistades kiirenduse tähega a võime kirjutada:

$$a = \frac{v_t - v_0}{t}.$$

Olgu näiteks kuuli kiirus püssirauas mingil hetkel 100 $\frac{m}{s}$, kuid 0,0014 sekundi pärast 800 $\frac{m}{s}$. Seega kasvas kiirus 0,0014 sekundiga 800 $\frac{m}{s}$ — 100 $\frac{m}{s}$ = 700 $\frac{m}{s}$. Kuuli liikumise kiirendus püssirauas on:

$$\frac{700\ \frac{m}{s}}{0{,}0014\ s} = 500\,000\ \frac{\frac{m}{s}}{s}$$ ehk 500 000 $\frac{m}{s}$ sekundi kohta.

Me saime kuuli liikumise kiirenduseks püssirauas 500 000 $\frac{m}{s}$ sekundis. Kuidas seda ette kujutada? Seda tuleb mõista nii, et kuuli kiirus suurenes pidevalt, muutudes sekundi jooksul 500 000 $\frac{m}{s}$ võrra. See muidugi ei tähenda, et kuul ise liigub rauas 1 sekundi.

20. Kiirendusühikud. Määrame nüüd kiirendusühiku. Asetame valemisse $a = \frac{v_t - v_0}{t}$ $v_t - v_0$ asemele ühe kiirusühiku t asemele ühe ajaühiku, siis saame, et a võrdub ühe kiirendusühikuga.

See tähendab, et *kiirendusühikuks on niisuguse liikumise kiirendus, mille puhul ajaühikus kiirus muutub ühiku võrra.*

Kui kiirust mõõta ühikutes $\frac{cm}{s}$ ja aega sekundites, siis kiirendusühikuks on niisuguse liikumise kiirendus, mille kiirus muutub 1 sekundi jooksul 1 $\frac{cm}{s}$ võrra. Niisuguse kiirendusühiku nimetuseks on 1 $\frac{cm}{s^2}$.

Võttes kiirusühikuks 1 $\frac{m}{s}$, kuid ajaühikuks 1 sekundi, saame kiirendusühikuks 1 $\frac{m}{s^2}$.

$$1 \frac{m}{s^2} = 1 \frac{100 \text{ cm}}{s^2} = 100 \frac{cm}{s^2} .$$

Nende kahe ühikuga mõõdetakse kiirendust kõige sagedamini, kuid üldiselt võib kiirendusühikuks võtta 1 $\frac{m}{min^2}$, 1 $\frac{km}{min^2}$, 1 $\frac{m}{tund^2}$ jne.

Kiirenduse arvulised väärtused, nagu igal teisel füüsikalisel suurusel, sõltuvad mõõduühikute valikust.

Näide. Mingi liikumise kiirendus on 36 $\frac{m}{s^2}$. Väljendada see kiirendus ühikutes $\frac{cm}{s^2}$.

$$a = 36 \frac{100 \text{ cm}}{s^2} = 3600 \frac{cm}{s^2} .$$

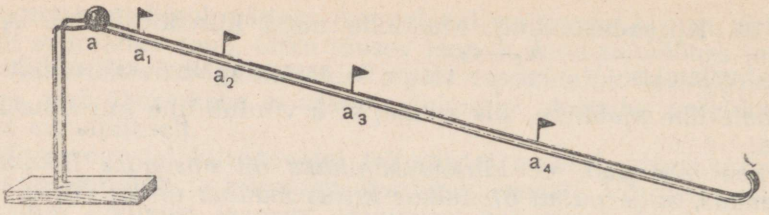
Harjutus 14.

1. Auto kiirus kasvas 1,5 min. jooksul 0-st kuni 60 $\frac{km}{h}$. Leida auto liikumise keskmine kiirendus ühikutes $\frac{m}{s^2}$ ja $\frac{cm}{s^2}$.

2. Joonisel 13 on kujutatud auto kiiruse muutumise graafik, mis on valmistatud spidomeetri näitude järgi. Määrata sellelt graafikult keskmine kiirendus ajavahemikes: 1) 0-st kuni 5 min., 2) 5-st kuni 20 min., 3) 20-st kuni 25 min., 4) 25-st kuni 35 min., 5) 35-st kuni 40 min.

21. Ühtlaselt kiirenev liikumine. Tutvume kiireneva liikumisega katse teel. Seame kohale kaldrenni ja laseme kuulikese seda mööda alla veereda. Määrame kuulikese poolt ühe, kahe, kolme jne. sekundi jooksul läbitud teed. Joonisel 32 on kuulikese asukohad iga sekundi lõpul märgitud lipukestega ja tähistatud tähtedega a_1, a_2, a_3.

Kaugus aa_1 on kuulikese poolt esimesel sekundil läbitud tee, a_1a_2 — teisel sekundil, a_2a_3 — kolmandal sekundil ja a_3a_4 — nel-



Joon 32. Kuulikese asukohad võrdsete ajavahemike tagant tema liikumise mööda kaldrenni (märgitud lipukestega).

jandal sekundil läbitud tee. Need kaugused järk-järgult suurenevad, järelikult, kuulikese kiirus kasvas tema liikumisel mööda kaldpinda alla.

Et tuletada kiiruse kasvamise seadust, mõõdame kuulikese keskpunkti hetkelised kiirused esimese, teise, kolmanda jne. sekundi lõpul.

Selleks asetame kaldrenni alumisest otsast mööda renni ülespoole pikkused Oa_1, Oa_2, Oa_3 (joon. 33), mida kuulike läbis ühe, kahe ja kolme sekundi jooksul, ja laseme kuulikesel veereda alla algul punktist a_1, siis punktist a_2 ja lõpuks punktist a_3.

Veerenud alla mööda kaldrenni, liigub kuulike erinevate kiirustega, kusjuures ta iga kord läbib teatud lõigu horisontaalset teed ühtlaselt.

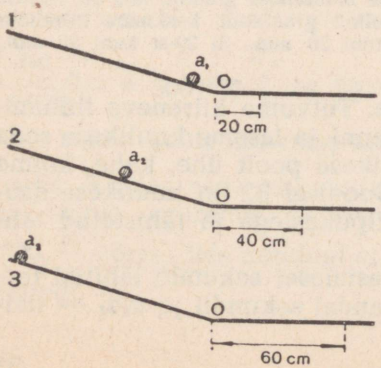
Mõõtes iga kord kuulikese poolt horisontaalpinda mööda 1 sekundis ärakäidud tee, leiame kuulikese kiiruse ühtlasel liikumisel, s. t. ta hetkelise kiiruse punktis O.

Ühel katsel saime kuulikese hetkeliste kiiruste kohta järgmised väärtused:

$$v_1 = 20\frac{\text{cm}}{\text{s}} \; ; \; v_2 = 40\,\frac{\text{cm}}{\text{s}} \; ; \; v_3 = 60\,\frac{\text{cm}}{\text{s}} \; ; \; v_4 = 80\,\frac{\text{cm}}{\text{s}} \; .$$

Sellest katsest on kerge näha, et kuulikese liikumise kiirus mööda kaldrenni suurenes igas sekundis ühe ja sama suuruse võrra $\left(20\,\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right)$.

Liikumist, milles mistahes võrdseis ajavahemikes kiirus suu-



Joon. 33. Kaldrenni mööda liikuva kuulikese kiiruse muutumise seaduse tuletamise juurde.

reneb ühe ja sama suuruse võrra, nimetatakse ühtlaselt kiirenevaks.

Kuulikese liikumine mööda kaldrenni alla on ühtlaselt kiirenev liikumine.

Ühtlaselt kiirenev liikumine on üks lihtsamatest kiireneva liikumise liikidest. Ühtlaselt kiireneva liikumise jaoks võib kiiruse ja tee sõltuvuse ajast väljendada lihtsate matemaatiliste valemitega.

Harjutus 15.

1. Kuidas nimetada liikumisi, millede kiirendus on konstantne? võrdne nulliga?
2. Kelk, libisedes mäelt, liigub ühtlaselt kiirenevalt ja tema kiirus kolmanda sekundi lõpul (liikumise algusest) on $10{,}8\frac{km}{h}$. Määrata kelgu liikumise kiirendus.
3. Eeldame, et joonisel 33 skemaatiliselt kujutatud katses ajavahemikud olid võrdsed 0,5 sekundiga. Määrata kuulikese hetkelised kiirused esimese, teise ja kolmanda ajavahemiku lõpul.
4. Mõõduriist loendab 0,75-sekundilisi ajavahemikke. Kuulike veereb alla mööda kaldrenni kolme niisuguse ajavahemiku vältel. Veerenud alla mööda kaldrenni, jätkab ta liikumist mööda horisontaalrenni ja läbib esimese ajavahemikuga 45 cm. Määrata kuulikese hetkeline kiirus kaldrenni lõpus ja kuulikese kiirendus liikumisel mööda kaldrenni.
5. Väljudes jaamast liigub rong ühtlaselt kiirenevalt kiirendusega $5\frac{cm}{s^2}$. Kui pika aja möödumisel saavutab rong kiiruse $36\frac{km}{h}$?

22. Ühtlaselt kiireneva liikumise kiirus. Ühtlaselt kiireneval liikumisel ei muutu kiirendus kogu tee pikkusel, seepärast *ühtlaselt kiirenev liikumine on konstantse kiirendusega liikumine.*

Ühtlaselt kiireneval liikumisel kasvab kiirus igas sekundis ühe ja sama suuruse võrra, nimelt kiirenduse arvulise väärtuse võrra. Vaatleme, kuidas saab arvutada ühtlaselt kiireneval liikumisel kiirust mingi ajavahemiku lõpul, kui on teada algkiirus ja kiirendus.

Liikugu alguses keha, näiteks rong, ühtlaselt kiirenevalt algkiirusega $v_0\ \frac{m}{s}$ ja kiirendusega $a\ \frac{m}{s^2}$.

Millega võrdub rongi kiirus t sekundi pärast?

Me teame, et ühtlaselt kiireneva liikumise kiirendus näitab, kui palju kasvab kiirus igas sekundis.

Meie näites on kiirendus $a\ \frac{m}{s^2}$. Seega rongi kiirus kasvab igas sekundis $a\ \frac{m}{s}$ võrra, kuid t sekundiga kasvab kiirus t korda enam, s. t. $at\ \frac{m}{s}$ võrra.

Kuna vaatluse algul oli rongi kiirus $v_0\ \frac{m}{s}$ ja t sekundiga kasvas see $at\ \frac{m}{s}$ võrra, siis ajavahemiku t lõpuks on kiirus võrdne $(v_0 + at)\ \frac{m}{s}$.

Kui tähistada keha kiirust ajavahemiku t lõpul tähega v_t, siis:

$v_t = (v_0 + at)\,\frac{m}{s}$.

Mis muutub, kui algkiirus on näiteks $v_0\,\frac{cm}{s}$ ja kiirendus $a\,\frac{cm}{s^2}$ või vastavalt $v_0\,\frac{km}{s}$ ja $a\,\frac{km}{s^2}$?

Endist viisi arutledes saame:

$v_t = (v_0 + at)\,\frac{cm}{s}$ või $v_t = (v_0 + at)\,\frac{km}{s}$.

Seega jääb lõppkiiruse algebraline avaldis muutumatuks. Muutub ainult kiiruse nimetus.

Järelikult võib ühtlaselt kiireneva liikumise lõppkiiruse arvutada valemi järgi:

$$v_t = v_0 + at. \qquad (1)$$

Selles valemis v_0 on algkiirus, a — kiirendus ja t — aeg.

Selle tulemuse võib algebraliselt saada ka valemist

$$a = \frac{v_t - v_0}{t}, \qquad (2)$$

mis määrab ühtlaselt kiireneva liikumise kiirenduse (§ 19).

See valem kujutab enesest esimese astme võrrandit. Lahendame selle v_t kui tundmatu suhtes:

$at = v_t - v_0$; siit $v_t = v_0 + at$.

Ühtlaselt kiireneva liikumise puhul, mis algab paigalseisust, $v_0 = 0$, saame valemist (1), et

$$v_t = at. \qquad (3)$$

See aga tähendab, et juhul *kui algkiirus on võrdne nulliga, siis ühtlaselt kiireneva liikumise hetkeline kiirus on võrdeline ajaga.*

Kasutades valemit (3) võib § 21 toodud katses arvutatud kiirusi esitada järgmise tabeli kujul:

$v_1 = 20\,\frac{cm}{s^2} \cdot 1\ s = 20\,\frac{cm}{s}$ $\qquad$ $v_3 = 20\,\frac{cm}{s^2} \cdot 3\ s = 60\,\frac{cm}{s}$

$v_2 = 20\,\frac{cm}{s^2} \cdot 2\ s = 40\,\frac{cm}{s}$ $\qquad$ $v_4 = 20\,\frac{cm}{s^2} \cdot 4\ s = 80\,\frac{cm}{s}$

Sellest tabelist on näha, et kaldrenni mööda allaliikuva kuulikese liikumise kiirust võib mistahes ajahetkeks arvutada valemi $v_t = at$ järgi.

Harjutus 16.

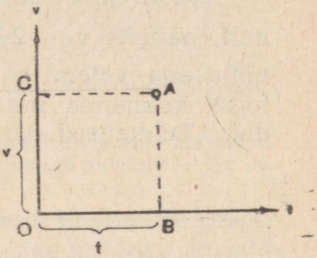
1. Rongi väljumisel jaamast kasvas selle kiirus esimese 4 sekundi jooksul $0{,}2\,\frac{m}{s}$ võrra, järgmise 6 sekundi jooksul veel $30\,\frac{cm}{s}$ võrra ja viimase 10 sekundi jooksul $1{,}8\,\frac{km}{h}$ võrra. Kuidas liikus rong nimetatud 20 sekundi jooksul?

2. Mäelt allalibisev kelk liigub ühtlaselt kiirenevalt. Mingil teeosal suurenes kelgu kiirus 4 sekundi jooksul $0{,}8\,\frac{m}{s}$ kuni $14{,}4\,\frac{km}{h}$. Arvutada kelgu liikumise kiirendus.

3. Jalgrattur algab ühtlaselt kiirenevat liikumist kiirendusega 20 $\frac{cm}{s^2}$. Kui pika aja möödumisel on jalgratturi kiirus 7,2 $\frac{km}{h}$?

23. Ühtlaselt kiireneva liikumise kiiruse graafik. Ühtlaselt kiireneva liikumise kiiruse sõltuvust ajast võib väljendada mitte ainult algebraliselt, vaid ka graafiliselt. Selleks võtame kaks vastastikku ristiolevat koordinaattelge (joon. 34). Ühte neist (*Ov*) nimetatakse kiiruseteljeks, teist (*Ot*) — ajateljeks. Mingist punktist *A* ajateljele tõmmatud ristsirge lõikab sellel lõigu *OB*, mis on arvuliselt võrdne (valitud mastaabis) mingi ajavahemikuga t_r ja samast punktist kiiruseteljele tõmmatud ristsirge lõikab lõigu *OC*, mis on võrdne kiiruse suurusega selle ajavahemiku lõpul.

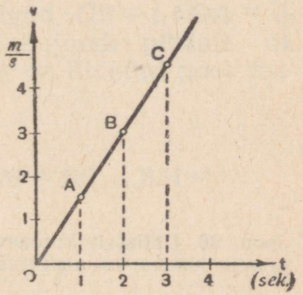
Konstruktsioonist on näha, et kaugus *AB* määrab kiiruse suuruse hetkel *t*.



Joon. 34. Koordinaatteljed (ajatelg ja kiirusetelg).

Alguses konstrueerime algkiiruseta liikumise graafiku. Olgu näiteks kiirendus $a = 1{,}5\ \frac{m}{s^2}$. Valemi $v_t = at$ järgi arvutame kiirused esimese, teise, kolmanda jne. sekundi lõpul, liikumise algusest arvates, ja kirjutame tulemused järgmisse tabelisse:

t (s)	$v\ \frac{m}{s}$
0	0
1	1,5
2	3,0
3	4,5
4	6,0
5	7,5



Joon. 35. Ühtlaselt kiireneva liikumise graafik juhuks, kui algkiirus on null.

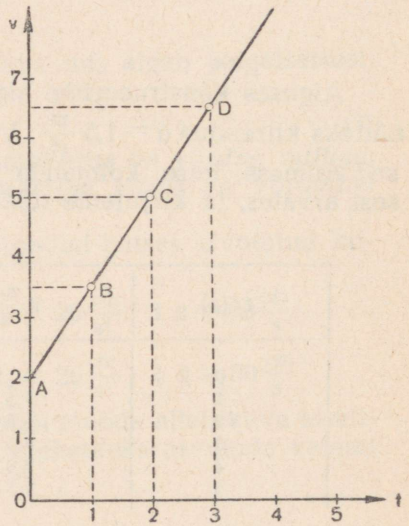
Joonestame koordinaatteljed *Ov* ja *Ot* (joon. 35). Ajateljele asetame mingis mastaabis (näiteks 1 cm — 1 s) võrdsed vahemikud: *0—1*, *1—2*, *2—3* jne. Nende lõikude otstest tõmbame tabeli andmetel hetkelised kiirused esimese, teise jne. sekundi lõpul

(mastaabis 1 cm — 1 $\frac{m}{s}$). Saadud lõikude ülemised otsad *A*, *B*, *C* ühendame. Saame koordinaatide algusest läbimineva ja telgedega kaldu oleva sirge. See sirge ongi ühtlaselt kiireneva liikumise kiiruse graafik.

Ühtlaselt kiireneva liikumise kiiruse graafik on sarnane varem saadud ühtlase liikumise tee graafikuga (joon. 17). Mõlemal juhul on graafikuks koordinaatide algusest läbiminev sirge. See kokkulangemine ei ole juhuslik. Asi on selles, et ühtlasel liikumisel läbitud tee ja ühtlaselt kiireneval liikumisel kiirus muutuvad ühe ja sama seaduse järgi, nimelt — nad on võrdelised ajaga. Matemaatikas tõestatakse, et võrdelise sõltuvuse graafikuks on sirgjoon.

Nüüd konstrueerime graafiku juhuks, kui algkiirus ei ole null, näiteks $v_0 = 2\frac{m}{s}$ ja $a = 1{,}5\ \frac{m}{s^2}$. Nii nagu esimeselgi juhul, nüüd aga valemi $v_t = v_0 + at$ järgi, arvutame kiirused esimese, teise, kolmanda jne. sekundi lõpul, alates arvestuse algmomendist. Tulemused kirjutame tabelisse:

t (s)	$v\left(\frac{m}{s}\right)$
0	2,0
1	3,5
2	5,0
3	6,5
4	8,0
5	9,5
jne.	jne.

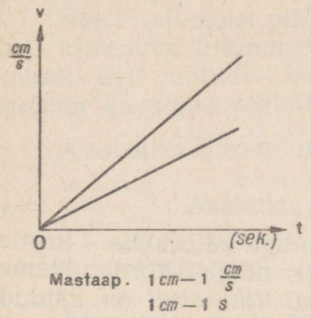


Joon. 36. Ühtlaselt kiireneva liikumise graafik juhuks, kui algkiirus ei ole null.

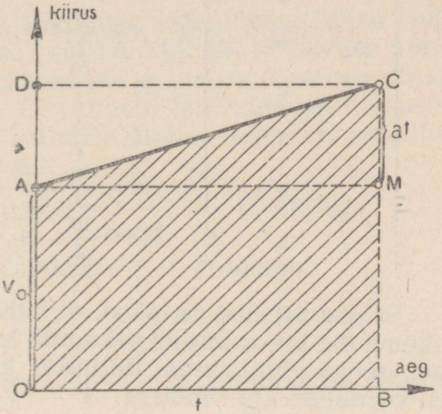
Märkides vastavad punktid graafikule ja ühendades need omavahel joonega, saame algkiirusega ühtlaselt kiireneva liikumise kiiruse graafiku (joon. 36). Kuna kiirus igas sekundis suureneb ühe ja sama suuruse võrra, siis punkte *A*, *B*, *C* jne. ühendav joon on sirge. See sirge ei läbi aga telgede lõikepunkti, kuna hetkel $t = 0$ keha kiirus ei ole null.

Harjutus 17.

Joonisel 37 on ühel joonisel antud kaks kiiruse graafikut. Kasutades joonisel näidatud mastaapi määrata liikumise kiirendused.



Joon. 37. Harjutuse 17 juurde.



Joon. 38. Ühtlaselt kiireneval liikumisel ärakäidud tee valemi tuletamise juurde.

24. Ühtlaselt kiireneva liikumise tee valemi tuletamise graafiline meetod. Ühtlasel liikumisel ärakäidud tee pikkust kujutatakse graafiliselt kiiruse graafikule konstrueeritud ristküliku pindalana (§ 11). Samasugust meetodit võib kasutada ühtlaselt kiireneval liikumisel ärakäidud tee pikkuse arvutamiseks selle liikumise kiiruse graafiku järgi. Joonisel 38 on ühtlaselt kiireneva liikumise kiiruse graafik kujutatud sirgega AC.

Aja t vältel ärakäidud tee on arvuliselt võrdne pindalaga $OACB$. Seda piirab kiiruse graafik AC, lõigud $OB = t$, $OA = v_0$ ja $BC = v_t$. Joonisel 38 on näha, et selle kujundi pindala on võrdne ristküliku $OAMB$ pindalaga, millega on liidetud pool ristküliku $ADCM$ pindalast. Seega

$$s = OA \cdot OB + \frac{1}{2} CM \cdot AM.$$

Kuid $OB = AM = t$, $OA = BM = v_0$, $CM = BC - BM = v_t - v_0 = v_0 + at - v_0 = at$.

Siit saame käidud tee jaoks valemi:

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} at \cdot t \text{ ehk } s = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

Algkiiruseta liikumise jaoks ($v_0 = 0$) on käidud tee pikkus

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

Arvutame valemi $s = \frac{at^2}{2}$ järgi ühtlaselt kiireneval liikumisel 1, 2, 3 jne. sekundiga käidud teed juhuks, kui $a = 10 \frac{\text{m}}{s^2}$. Tulemused kirjutame tabelisse:

t (s)	s (m)
0	0
1	$5 = \frac{10}{2} \cdot 1$
2	$20 = \frac{10}{2} \cdot 4$
3	$45 = \frac{10}{2} \cdot 9$
4	$80 = \frac{10}{2} \cdot 16$
5	$125 = \frac{10}{2} \cdot 25$

Sellest tabelist on näha, et kahe sekundiga käib keha 4 korda pikema tee kui esimesel sekundil, kolme sekundiga 9 korda pikema jne., seega *algkiiruseta ühtlaselt kiireneval liikumisel* on käidud tee võrdeline aja ruuduga.

Valemist $s = \frac{at^2}{2}$ ja ülaltoodud tabelist järgneb, et *keha poolt esimesel sekundil käidud tee on arvuliselt võrdne poole kiirendusega.* Kui näiteks rong, väljudes jaamast, sõitis esimesel sekundil teepikkuse 1,5 m, siis ta kiirendus on $3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

24 a. Ühtlaselt kiireneva liikumise keskmine kiirus. Ühtlaselt kiireneva liikumise tee valemist on kerge tuletada keskmise kiiruse valemit. Keskmise kiiruse definitsioonist (vaata § 17) järgneb, et $v_k = \frac{s}{t}$ ehk $v_k = \frac{v_0 t + \frac{at^2}{2}}{t}$.

Jagades lugeja mõlemad liidetavad t-ga, saame:

$$v_k = v_0 + \frac{at}{2},$$

ning teisendades parempoolset osa, saame:

$$v_k = \frac{2v_0 + at}{2} \text{ ehk } v_k = \frac{v_0 + v_0 + at}{2}.$$

Kuna $v_0 + at = v_t$, siis $v_k = \frac{v_0 + v_t}{2}$.

Seega, ühtlaselt kiireneva liikumise keskmine kiirus mingis ajavahemikus on võrdne alg- ja lõppkiiruse poolsummaga.

Juhul kui $v_0 = 0$, siis $v_k = \frac{v_t}{2}$.

Ühtlaselt muutuva liikumise kiirus muutub ühtlaselt v_0-st kuni v_t-ni. Seepärast on niisuguse liikumise kiirus võrdne alg- ja lõppkiiruse aritmeetilise keskmisega:

$$v_k = \frac{v_0 + v_t}{2}.$$

24 b. Ühtlaselt kiireneva liikumise valemid. Valemeid

$$v_t = v_0 + at \tag{1}$$

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2} \tag{2}$$

nimetatakse ühtlaselt kiireneva liikumise valemiteks; need väljendavad selle liikumise kiiruse või teepikkuse sõltuvust ajast.

Neist valemeist piisab, et lahendada mistahes ülesanne ühtlaselt kiireneva liikumise kohta. Ülesannete lahendamise lihtsustamiseks neil juhtudel, kus pole antud liikumise aega, on otstarbekohane kasutada veel ühte valemit.

Avaldame kiirenduse valemist $a = \frac{v_t - v_0}{t}$ (§ 19) aja $t = \frac{v_t - v_0}{a}$. Asetades selle valemisse $s = v_k t$, saame:

$$s = \frac{v_k \cdot (v_t - v_0)}{a}.$$

Asendades v_k ta väärtusega $\frac{v_t + v_0}{2}$ ja teisendades saadud avaldist, saame:

$$s = \frac{v_t + v_0}{2} \cdot \frac{v_t - v_0}{a}, \text{ millest}$$

$$s = \frac{v_t^2 - v_0^2}{2a} \tag{3}$$

ehk $v_t^2 - v_0^2 = 2as.$ (4)

Kui algkiirus on võrdne nulliga, s. o. $v_0 = 0$, siis valemist (4) lõppkiirus $v_t^2 = 2as$ ehk $v_t = \sqrt{2as}.$ (5)

Valemeid (4) ja (5) kasutatakse sageli ülesannete lahendamisel siis, kui pole antud liikumise aega.

25. Ühtlaselt kiireneval liikumisel üksteisele järgnevais võrdseis ajavahemikes ärakäidud teed. Kasutades käidud teede tabelit (vt. lk. 40) määrame algkiiruseta ühtlaselt kiireneval liikumisel igas üksikus sekundis keha poolt ärakäidud teed.

Liikumise esimese sekundi jooksul ärakäidud tee on võrdne $\frac{10}{2} \cdot 1$. Tähistame selle tähega s_1.

$$s_1 = \frac{10}{2} \cdot 1.$$

Et arvutada teise sekundi jooksul käidud teed, tuleb kahe sekundiga käidud teest lahutada esimeses sekundis käidud tee:

$$s_2 = \frac{10}{2} \cdot 4 - \frac{10}{2} \cdot 1 = \frac{10}{2}(4 - 1) = \frac{10}{2} \cdot 3.$$

Kolmanda sekundi jooksul käidud tee s_3 leiame, lahutades kolme sekundiga käidud teest kahe esimese sekundiga käidud tee:

$$s_3 = \frac{10}{2} \cdot 9 - \frac{10}{2} \cdot 4 = \frac{10}{2}(9 - 4) = \frac{10}{2} \cdot 5.$$

Analoogiliselt leiame neljanda ja viienda sekundi jooksul käidud teed s_4 ja s_5:

$$s_4 = \frac{10}{2} \cdot 16 - \frac{10}{2} \cdot 9 = \frac{10}{2}(16 - 9) = \frac{10}{2} \cdot 7.$$

$$s_5 = \frac{10}{2} \cdot 25 - \frac{10}{2} \cdot 16 = \frac{10}{2}(25 - 16) = \frac{10}{2} \cdot 9.$$

Leiame käidud teede arvuliste väärtuste suhte:

$$s_1 : s_2 : s_3 : s_4 : s_5 = \frac{10}{2} \cdot 1 : \frac{10}{2} \cdot 3 : \frac{10}{2} \cdot 5 : \frac{10}{2} \cdot 7 : \frac{10}{2} \cdot 9.$$

Teisendades võrduse paremat poolt, saame:

$s_1 : s_2 : s_3 : s_4 : s_5 = 1 : 3 : 5 : 7 : 9.$

Saadud võrdusest on näha, et *üksteisele järgnevais võrdseis ajavahemikes läbitud teed suhtuvad nii nagu üksteisele järgnevad paaritud arvud.*

Ajaloolisi andmeid. Ühtlaselt kiireneva liikumise seadused sõnastas itaalia õpetlane Galileo Galilei katsete põhjal, mida ta tegi, uurides kuulikese liikumist mööda kaldpinda.

Allpool on toodud katkend Galilei teosest, mis esmakordselt ilmus 1638. a., veidi enne Galilei surma. Selles teoses kirjeldatakse kaldpinda mööda allaveereva keha liikumise uurimist.

«Kaht uut teadusharu puutuvad vestlused ja matemaatilised tõestused, mis käivad mehhaanika ja kohaliku liikumise kohta.»

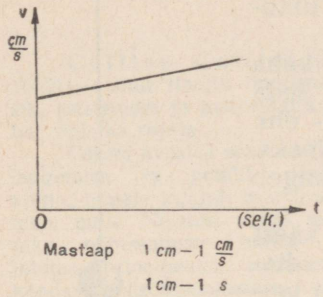
Katkend Galileo Galilei samanimelisest teosest.

«Piki joonlauda või, täpsemalt öeldud, umbes kaheteistkümne küünra[1] pikkuse, poole küünra laiuse ja umbes kolme tolli paksuse plangu serva sisse oli lõigatud kanal, mille laius oli pisut üle ühe tolli. Kanal oli lõigatud täiesti sirge ja et teha ta küllalt siledaks ja libedaks, oli ta kleebitud seestpoolt tasase, poleeritud pärgamendiga. Seda kanalit mööda lasksime langeda kõige kõvemast pronksist valmistatud sileda, täiesti korrapärase kujuga kuulikese. Seadnud niiviisi valmistatud plangu üles, tõstsime ta ühe otsa horisontaalsest tasapinnast kord ühe, kord kahe küünra võrra kõrgemale ja lasksime kuulikesel alla veereda mööda kanalit (ülalkirjeldatud), märkides kogu tee läbimiseks vajaliku aja viisil, millest on juttu allpool. Korrates üht ja sama katset palju kordi, et täpselt määrata aega, ei leidnud me mingit vahet, isegi üht kümnendikku pulsilöögi ajast. Tehes selle asjaolu täpselt kindlaks, me lasksime langeda kuulikesel ainult ühe neljandiku sama kanali pikkusest. Mõõtes ta langemise aja, me leidsime iga kord, et see on täpselt pool sellest, mida panime tähele esimesel juhul. Katsetades edasi mitmesuguste erinevate teepikkustega, võrreldes kogu joonlaua pikkuse läbimise aega poole, kahe kolmandiku, kolme neljandiku ja mistahes muu joonlaua osa läbimiseks kulunud ajaga, korrates katseid sadu kordi, me leidsime alati, et igasuguste pinna (kanali) kallete puhul on läbitud teede suhe võrdne nende läbimiseks kulunud aegade ruutude suhetega. Seejuures panime ka tähele, et mitmesuguste kallete puhul suhtuvad tee läbimise ajad omavahel nii, nagu edasi väitis ja tõestas autor.[2]

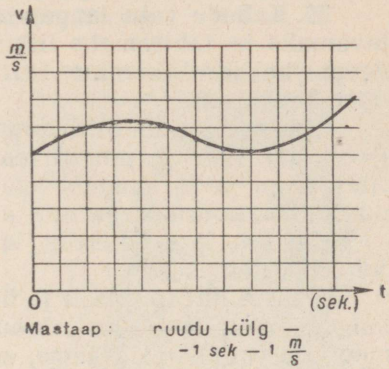
[1] Küünar — vanaaegne pikkusmõõt, vene küünar oli 46,72 cm pikk.

[2] Galilei teos on esitatud kolme isiku jutuajamise kujul. Toodud katkendi esitab üks kaasvestlejaist (Salviatti), andes edasi Galilei, keda ta nimetab «autoriks», poolt kirjutatud teose sisu.

Aja mõõtmiseks kasutasime suurt ämbrit, mis oli veega täidetud ja üles riputatud; ämbri põhja sisse oli kinnitatud peenike toru, mille kaudu vesi peene joana väljus ja kogu aja, mille vältel kuulike laskus alla mööda kogu kanalit või selle osa, kogunes väikesesse pokaali. Sel viisil kogutud vee hulgad kaalusime iga kord kõige täpsematel kaaludel. Iga juhu jaoks vee kaalu vahe ja suhe andsid meile langemise aegade vahed ja suhted, ja seejuures niisuguse täpsusega, et, nagu ma juba nimetasin, korrates üht katset mitu ja mitu korda, ei suutnud me tähele panna tähtsusetuidki kõrvalekaldumisi.»



Joon. 39. Ülesande 1 juurde.



Joon. 40. Ülesande 2 juurde.

Harjutus 18.

1. Joonisel 39 on antud mingi ühtlaselt kiireneva liikumise kiiruse graafik. Kasutades joonisel antud mastaapi määrata sellel liikumisel 3,5 sekundi jooksul ärakäidud tee.

2. Joonisel 40 on kujutatud mingi muutuva liikumise kiiruse graafik. Joonistage graafik ümber vihikusse ja viirutage pindala, mis on arvuliselt võrdne 3 sek. jooksul ärakäidud teega. Kui pikk umbes on see tee?

3. Ühtlaselt kiireneval liikumisel mööda kaldrenni veeres kuulike esimeses ajavahemikus 8 cm. Kui pika tee veeres kuulike liikumise algusest loetud kolme niisama suure ajavahemiku vältel?

4. Ühtlaselt kiireneva liikumise algusest möödunud 10 võrdse ajavahemiku vältel läbis keha 75 cm. Mitu sentimeetrit läbis see keha kahe esimese sama ajavahemiku vältel?

5. Jaamast väljuv rong, liikudes ühtlaselt kiirenevalt, sõidab esimese kahe sekundi vältel 12 cm. Kui kaugele jõuab rong 1 min. jooksul, arvates liikumise algusest?

Märkus:

Ülesanded 3, 4, 5 ja 6 lahendada valemeid kasutamata, kuid omandada hästi kõik, millest räägitakse § 24.

6. Jaamast väljudes liigub rong ühtlaselt kiirenevalt kiirendusega 5 $\frac{cm}{s^2}$. Kui palju aega on vaja kiiruse 28,8 $\frac{km}{h}$ saavutamiseks? Kui pika tee sõidab rong selle aja jooksul?

7. Vedur sõidab horisontaalsel teel (kuni kallakuni) kiirusega 8 $\frac{m}{s}$; siis liigub kallakut mööda alla kiirendusega 0,2 $\frac{m}{s^2}$. Määrata kallaku pikkus, kui vedur läbib selle 30 sekundiga.

8. Kaldpinda mööda alla liikuva vankrikese algkiirus oli $10\frac{cm}{s}$. Mööda 2 m pikkust lauda veeres vankrike alla 5 sekundiga. Määrata vankrikese liikumise kiirendus.

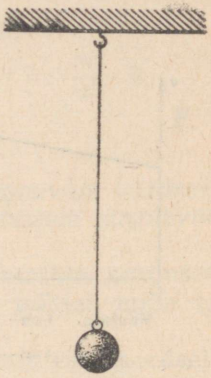
9. Kuul lendab püssirauast välja kiirusega $800\frac{m}{s}$. Raua pikkus on 64 cm. Eeldades, et kuul liigub püssirauas ühtlaselt kiirenevalt, määrata liikumise kiirendus ja rauas liikumise aeg.

26. Kehade vaba langemine. Üheks huvitavamaks ja tähtsamaks liikumiseks on langevate kehade liikumine. Uurime seda liikumist katseliselt.

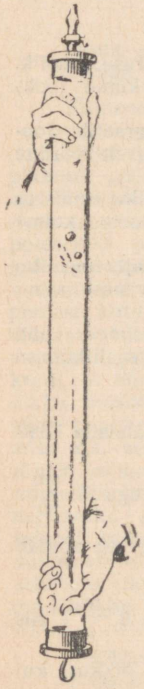
Riputame niidi otsa mingi raske keha (joon. 41). Niit on pingul teatud sihis. Seda sihti, nagu teada, nimetatakse vertikaal- ehk püstsihiks, koormusega niiti aga — püstloeks.

Kui niit läbi põletada, siis keha langeb vertikaalsuunas alla.

Laseme ühekõrguselt ja üheaegselt käest langeda metallketta ja niisama suure diameetriga pappketta. Näeme, et kiiremini langeb metallketas. Miks? Kas selle põhjuseks ei ole langevate kehade kaalude erinevus?



Joon. 41. Niidi otsa riputatud keha venitab niiti piki vertikaaljoont.



Joon. 42.

Seda järeldust on kerge kummutada järgmise katsega. Võtame kaks ühesugust paberilehte ja kägardame neist ühe; mõlemad pillame ühekõrguselt. Näeme, et kägardatud leht langeb kiiremini. Järelikult ei ole kehade langemiskiiruste erinevuste põhjuseks ainult nende kaal.

Asetame pappketta metallkettale ja laseme need käest. Mõlemad kettad langevad ühe ja sama aja jooksul. See katse erineb eelmisest sellega, et ketaste langemise tingimused ei ole siin samad. Metallketas kohtab langedes õhutakistust, pappkettal aga ei ole niisugust tõkestajat, sest see kõrvaldatakse pappketta ees langeva metallketta poolt. Järelikult mõjub kehade langemise kiirusele õhutakistus.

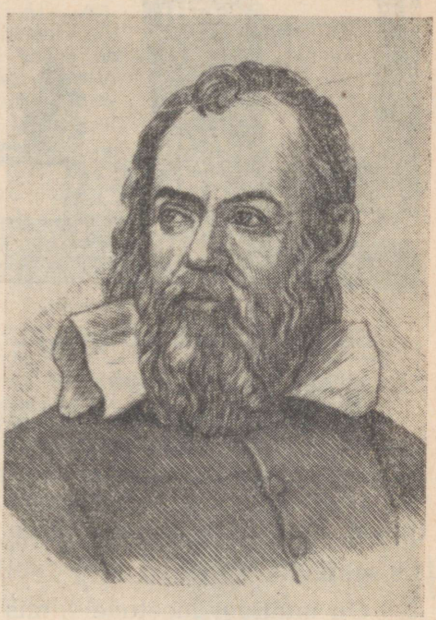
Vaatame nüüd, kuidas langevad kehad õhuta ruumis, kus puudub õhutakistus.

Võtame umbes 1,5 m pikkuse ühest otsast suletud klaastoru, millel on teises otsas kraan (joon. 42). Torusse on asetatud erineva kuju ja kaaluga kehi: metallraha, linnusulg, korgitükike ja haavel. Kuni torus on õhk, liiguvad nimetatud kehad toru ümberpööramisel erinevate kiirustega. Kui aga õhk torust

välja pumbata, siis liiguvad samad kehad ühesuguste kiirustega.

Kehade langemist õhuta ruumis nimetatakse vabaks langemiseks.

Esimesena uuris XVI sajandi lõpul kehade langemist katseliselt Galilei, lastes raskeid kehi langeda viltusest tornist (joon. 43). Need katsed näitasid, et kõik kehad, sõltumata nende kaalust, jõudsid maapinnale peaaegu ühe ja sama ajaga.



Galileo Galilei (1564—1642) — suur itaalia õpetlane, füüsik, astronoom ja matemaatik, katselise füüsika rajaja.

Galilei avastas seadused kehade langemise ja pendli võnkumise kohta; temale kuulub inertsi seaduse idee, mille Newton võttis mehhaanika põhiseaduste hulka. Galilei leiutas termomeetri, esimesena rakendas astronoomilisteks uurimisteks pikksilma, avastas Jupiteri kaaslasi, päikeselaigud ja Veenuse faasid.

Galilei oli kirglik Koperniku vaadete propageerija, mille eest ta üle mõisteti kohut paavsti inkvisitsioonikohtus ja sunniti piinamise ähvardusel alla kirjutama oma veendumustest lahtiütlemisele. Kuid tegelikult ta jäi truuks oma veendumustele ja kuni elu lõpuni jätkas õpetuse arendamist heliotsentrilisest maailmasüsteemist.

Langemise seadused avastas Galilei, uurides kuulikese liikumist mööda kaldrenni. Ka see liikumine on langemine, kuid toimub ainult aeglasemalt kui langemine vertikaalselt.

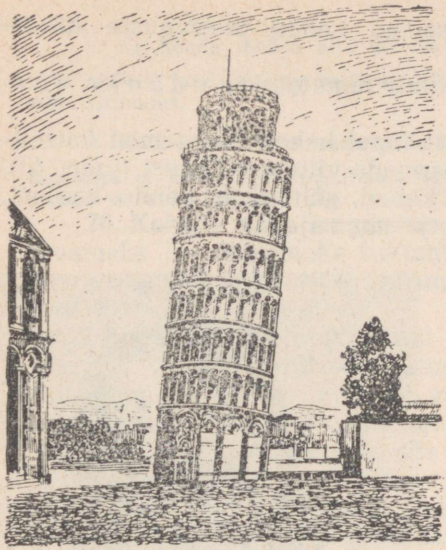
Galilei poolt sooritatud uurimised näitasid, et *vaba langemine on ühtlaselt kiirenev liikumine.*

Vaba langemise iseärasuseks on see, et **kõik kehad langevad antud kohas ühesuguse kiirendusega. Seda kiirendust nimetatakse vaba langemise kiirenduseks.** Vaba langemise kiirendust tähistatakse tavaliselt tähega g (esimene täht ladinakeelsest sõnast *gravitas*, mis tähendab raskust).

Kuna vabalt langeva keha liikumine on ilma algkiiruseta ühtlaselt kiirenev liikumine, siis arvutatakse selle liikumise tee ja kiirus §§ 22 ja 24 tuletatud valemite järgi.

Kui keha langeb kõrguselt h aja t vältel, siis

$$h = \frac{gt^2}{2}.$$



Joon. 43. Viltune torn, mida Galilei kasutas kehade langemise uurimisel.

Seejuures saavutab keha kiiruse

$v = gt$ või $v = \sqrt{2gh}$.

Suuruse g võib määrata katseliselt, lastes langeda teraskuulikese teatud kõrguselt ja mõõtes langemise aja. Selle juures kuulikesele mõjuv õhutakistus on tähtsuseta.

Ühel niisugusel katsel lasti langeda raske kuulike koolimaja trepilt, mille kõrgus on 17,6 m. Stopper näitas langemise ajana 1,9 sekundit. Valemi $g = \frac{2h}{t^2}$ abil leiti, et $g \approx 9{,}8\frac{\text{m}}{s^2}$.

On muidugi meetodeid, mis võimaldavad määrata g väärtust täpsemalt, kui meie seda koolis tegime.

Mitmesugustel maakera geograafilistel laiustel on g arvulised väärtused erinevad ja kõiguvad vahemikus $983{,}24\frac{\text{cm}}{s^2}$ (poolustel) kuni $978{,}05\ \frac{\text{cm}}{s^2}$ (ekvaatoril). Moskvas $g = 981{,}56\ \frac{\text{cm}}{s^2}$.

Vaba langemise kiirendust $g = 980{,}665\ \frac{\text{cm}}{s^2}$ nimetatakse normaalseks kiirenduseks.

Põhjusi, mis kutsuvad esile kehade vaba langemise kiirenduse erinevusi, vaadeldakse edaspidi.

Tavaliselt, kui ei nõuta erilist täpsust, võetakse arvutustes g väärtuseks $980\ \frac{\text{cm}}{s^2}$ ehk $9{,}8\frac{\text{m}}{s^2}$, või isegi $10\ \frac{\text{m}}{s^2}$.

Harjutus 19.

1. Määrata kaevu sügavus, kui sellesse langenud kivi jõudis kaevu põhja 2 sekundiga.

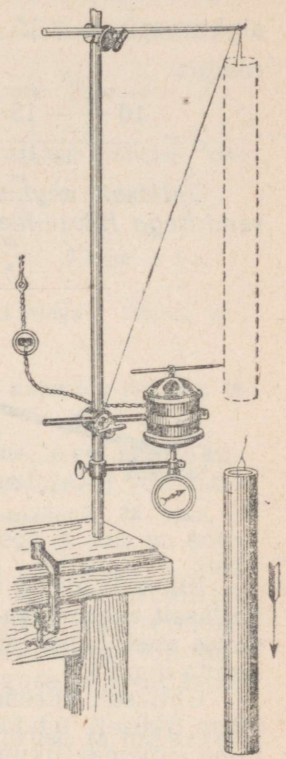
2. Laualt, mille kõrgus on 80 cm, langeb põrandale pliiats. Määrata langemise aeg.

3. Keha langeb 30 m kõrguselt. Kui pika tee läbib ta langemise viimase sekundi jooksul?

4. Kaks keha langevad erinevalt kõrguselt, kuid jõuavad ühel ja samal hetkel maapinnale. Seejuures langeb esimene keha 1 sekundi, teine aga 2 sekundit. Kui kaugel maapinnast oli teine keha, kui esimene hakkas langema?

5. Joonisel 44 on kujutatud seadis, mille abil võib katseliselt määrata kehade vaba langemise kiirendust.

Puusilinder on riputatud niidi otsa. Alla, statiivi külge, on kinnitatud väike elektrimootor, mis teeb 50 pööret sekundis; mootori võlli külge on kinnitatud värviga kokkumääritud pintslike. Mootori töötamisel joonistab pintslike silindri pinnale võrdsete ajavahemike tagant märgid. Silindri langemisel asuvad need märgid üksteise all ja nende paigutuse järgi (s. t. kauguse järgi algmärgist ja üksteisest) võib otsustada silindri liikumise iseloomu üle langemisel. Katse algab mootori käivitamisega, siis aga põletatakse läbi niit, mille otsas ripub silinder. Iga 0,02 sekundi tagant teeb pintslike langeva silindrile märgi. Mõõdetakse esimese, teise, kolmanda jne. märgi kaugus algmärgist. Need kaugused annavad teed, millised läbiti $\frac{1}{50}$, $\frac{2}{50}$, $\frac{3}{50}$ sekundi jne. jooksul. Märkide paigutus silindril on toodud joonisel 44 ja andmed alljärgnevas tabelis. Tabeli teises veerus on märkide kaugused algmärgist, kuid esimeses veerus — langemise aeg.



Joon. 44. Seadis vaba langemise uurimiseks.

Arvutage tabeli andmete põhjal silindri langemise kiirenduse keskmine väärtus.

Aeg (*s*)	Tee (cm)	Aeg (*s*)	Tee (cm)
0	0	0,08	3,14
0,02	0,20	0,10	4,90
0,04	0,78	0,12	7,06
0,06	1,76	0,14	9,60

27. Ühtlaselt aeglustuv liikumine. Joonisel 45 on kujutatud mööda kaldrenni alt üles tõugatud kuulikese liikumine. Lipukestega on märgitud kuulikese asukohad 1, 2, 3 sekundi järel pärast liikumise algust. Lipukestevahelised kaugused, järelikult ka teed, mida kuulike läbis võrdseis ajavahemikes, vähenevad. Tähendab, kuulikese liikumine on aeglustuv.

Lihtsaim aeglustuv liikumine on ühtlaselt aeglustuv liikumine.

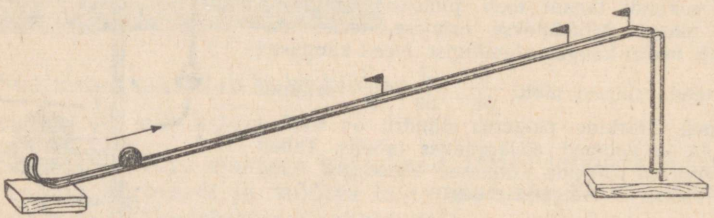
Ühtlaselt aeglustuval liikumisel väheneb kiirus mistahes võrdseis ajavahemikes ühe ja sama suuruse võrra. Seejuures on kiirendus, mida arvutatakse valemi järgi

$$a = \frac{v_t - v_0}{t}, \qquad (1)$$

negatiivne suurus, kuna v_t on väiksem kui v_0. Vähenegu näiteks rongi kiirus ühtlaselt aeglustuval liikumisel aja $t = 10\ s$ jooksul algkiiruselt $v_0 = 15\ \frac{m}{s}$ kuni kiiruseni $v_t = 10\ \frac{m}{s}$. Sel korral kiirendus

$$a = \frac{10\ \frac{m}{s} - 15\ \frac{m}{s}}{10\ s} = -0{,}5\ \frac{m}{s^2}.$$

Ühtlaselt aeglustuv liikumine on konstantse negatiivse kiirendusega liikumine.



Joon. 45. Kuulikese liikumine mööda kaldrenni üles

Kui valemis (1) mõtleme a all kiirenduse absoluutväärtust, siis ühtlaselt aeglustuva liikumise kiiruse ja läbitud tee valemid saadakse analoogilistest ühtlaselt kiireneva liikumise valemitest, kui muuta a märk.

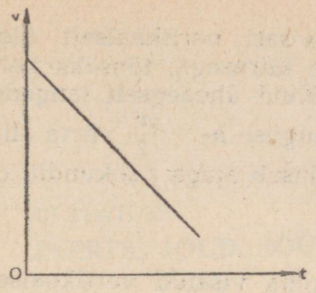
Ühtlaselt kiirenevat ja ühtlaselt aeglustuvat liikumist nimetatakse üldiselt ühtlaselt muutuvateks liikumisteks, kuna mõlemal liikumisel kiirus muutub ühtlaselt.

Paljud liikumised on väga lähedased ühtlaselt muutuvatele liikumistele ja arvutustes võib neid lugeda ühtlaselt muutuvateks. Nii võib rongide ja autode liikumist paigalseisust ning pidurdamisel, kuuli liikumist rauaõõnes ja paljusid teisi liikumisi vaadelda kui ühtlaselt muutuvaid.

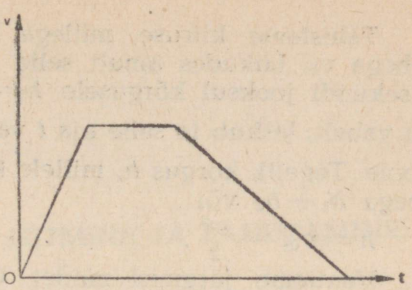
Harjutus 20.

1. Rong jäi seisma 20 sekundit pärast pidurdamise algust. Selle ajaga läbis ta 120 m. Määrata rongi kiirus pidurdamise algmomendil ja kiirendus.

2. Rong pidurdati, kui see liikus kiirusega $18\ \frac{m}{s}$. Rong jäi seisma 15 sekundi pärast. Lugedes rongi liikumise pidurdamise ajal ühtlaselt aeglustuvaks liikumiseks, määrata rongi poolt 15 sekundi vältel läbitud tee.



Joon. 46. Ülesande 5 juurde.



Joon. 47. Ülesande 5 juurde.

3. Konstrueerida ühtlaselt aeglustuvate liikumiste graafikud juhtudele, kui:
1) $v_0 = 10\,\frac{m}{s}$, $a = -1{,}5\,\frac{m}{s^2}$; 2) $v_0 = 10\,\frac{m}{s}$, $a = -2\,\frac{m}{s^2}$.

Mõlemal juhul on mastaap ühesugune: 0,5 cm — 1 $\frac{m}{s}$; 0,5 cm — 1 s.

Võrrelda saadud graafikuid omavahel.

4. Kujutada kiiruse graafikul aeglustuval liikumisel ajaga t läbitud tee. Võtta $v_0 = 10\,\frac{m}{s}$, $a = -2\,\frac{m}{s^2}$.

5. Kirjeldada liikumisi, millede kiiruse graafikud on kujutatud joonistel 46 ja 47.

28. Vertikaalselt üles visatud keha liikumine. Aeglustuva liikumise näiteks (ühtlaselt aeglustuvale väga lähedaseks) võib olla vertikaalselt üles visatud keha liikumine.

Tegelikult langeb iga vaba keha kiirendusega g, mis on suunatud vertikaalselt alla. Selle keha viskamisel vertikaalselt üles väheneb ta kiirus igas sekundis suuruse võrra, mis on arvuliselt võrdne vaba langemise kiirendusega. Vertikaalselt üles visatud keha liigub ühtlaselt aeglustuvalt seni, kuni ta kiirus muutub nulliks. Sel momendil saavutab keha suurima kõrguse ja sealt hakkab ta liikuma tagasi alla — langema vabalt.

Vertikaalselt üles visatud keha liikumise kiiruse ja tee arvutamiseks mistahes hetkeks saame valemid:

$$v_t = v_0 - gt \qquad (1)$$

$$h = v_0 t - \frac{gt^2}{2}, \qquad (2)$$

kus h on kõrgus, milleni keha tõusis ajaga t.

Valemi kõrguse h arvutamiseks võib saada ka siis, kui vaadelda vertikaalselt üles visatud keha liikumist koosnevana kahest liikumisest: viskamisel kehale antud ühtlasest liikumisest vertikaalselt üles ja vabast langemisest. Mõlemad liikumised toimuvad mööda üht ja sama sirget; seepärast on keha poolt mingis ajavahemikus läbitud tee võrdne eraldi kummalgi liikumisel läbitud teede algebralise summaga.

Tähistame kiiruse, millega keha visati vertikaalselt üles, tähega v_0. Liikudes ainult selle ühtlase kiirusega, tõuseks keha t sekundi jooksul kõrgusele $h_1 = v_0 t$. Kuid üheaegselt langedes ka vabalt, laskub ta selle aja t vältel kauguse $h_2 = \frac{gt^2}{2}$ võrra allapoole. Tegelik kõrgus h, millele keha tõuseb ajaga t sekundit, on seega $h_1 - h_2$ või

$$h = v_0 t - \frac{gt^2}{2}.$$

Vaatleme järgmist näidet. Olgu keha visatud vertikaalselt üles kiirusega 40 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$. Arvutuste lihtsustamiseks võtame $g = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Määrame, kui kõrgel on keha pärast 3 sekundi möödumist liikumise algusest. Valemi (2) järgi saame:

$$h = 40 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 3\,\text{s} - \frac{10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 9\,\text{s}^2}{2} = 75\,\text{m}.$$

Kuna hetkel, mil keha saavutas suurima kõrguse, $v_1 = 0$, siis liikumise aja võib määrata valemist (1):

$0 = v_0 - gt$, millest $t = \frac{v_0}{g}$.

Et määrata keha tõusu suurimat kõrgust, asetame leitud t väärtuse kõrgust h määravasse valemisse (2):

$$h = \frac{v_0^2}{g} - \frac{v_0^2}{2g} = \frac{v_0^2}{2g}, \text{ siit } v_0 = \sqrt{2gh}. \qquad (3)$$

Nüüd leiame, millise kiirusega, langedes sellelt kõrguselt, jõuab keha tagasi oma algasendisse. Kuna keha liigub algkiiruseta ühtlaselt kiirenevalt vahemaa h, siis ta kiirus

$$v = \sqrt{2gh} = v_0,$$

seega *kiirus, millega keha langeb tagasi punkti, millest ta visati üles, on võrdne viske algkiirusega, kui mitte arvestada õhutakistust.*

Harjutus 21.

1. Tõestada, et vertikaalselt üles visatud keha suurimale kõrgusele h tõusmise aeg on võrdne samalt kõrguselt langemise ajaga.
2. Keha liigub algkiirusega vertikaalselt alla. Millisteks lihtsamateks liikumisteks võib lahutada selle keha liikumise? Kirjutada üles selle liikumise kiiruse ja ärakäidud tee valem.
3. Keha on visatud vertikaalselt üles kiirusega 40 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$. Arvutada, kui kõrgel on keha 2, 6, 8 ja 9 sekundi möödumisel liikumise algusest. Seletada vastused. Arvutuste lihtsustamiseks võtta g väärtuseks 10 $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.
4. Kui suure kiirusega tuleb keha visata vertikaalselt üles, et see langeks tagasi algasendisse 10 sekundi pärast?
5. Aerostaat tõuseb ühtlaselt vertikaalselt üles kiirusega 4 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$. Tema külge on nööriga seotud koormus. 217 m kõrgusel katkeb nöör. Mitme sekundiga langeb koormus maapinnale? g võtta võrdseks 10 $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

III PEATÜKK.

INERTS. JÕUD. JÕUDUDE LIITMINE JA LAHUTAMINE.

29. Dünaamika ülesanne. Eelmises peatükis vaatlesime mitmesuguseid liikumise liike, puudutamata liikumise põhjusi. Mehhaanika osa, milles õpitakse tundma liikumisi, uurimata neid esile kutsuvaid põhjusi, nimetatakse kinemaatikaks.

Masinate ja mehhanismide konstrueerimiseks, nende liikumiste juhtimiseks on tarvilik teada kehade vastastikuse mõju seadusi; kehade liikumisega kaasnevaid põhjusi; põhjusi, mille mõjul muutub keha kiirus, s. t. tekib kiirendus. Mehhaanika osa, milles põhjendatakse liikumiste ja neid tekitavate põhjuste vahelisi seoseid, nimetatakse dünaamikaks.

Dünaamikale pani aluse geniaalne inglise teadlane Isaac Newton (l. aizak njuuton).

Dünaamika aluseks on kolm seadust, mis kujutavad endast inimkonna sajanditepikkuste kogemuste üldistust ja teadmisi kehade mitmesugustest liikumistest.

Need seadused sõnastas Newton ja need kannavad tema nime.

30. Newtoni esimene seadus (inertsiseadus). Newtoni esimene seadus määrab kindlaks tingimused, mille juures keha on paigal või liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt.

Vaatlused ja katsed näitavad meile, et mistahes keha kiirus ei või «iseenesest» muutuda.

Jalgpall asetseb rahulikult mänguväljakul. Jalalöögiga paneb jalgpallur ta liikuma. Pinguletõmmatud vedru suleb lühenedes ukse. Ülesvisatud palli kiirus liikumisel väheneb — temale mõjub Maa külgetõmme. Liikuvale raudkuulile mõjuv magnet ei muuda mitte ainult kuuli kiirust, vaid ka liikumise suunda. Väljalülitatud mootoriga liikuv auto jääb tee pinna ja rataste vahelise hõõrdumise ning õhutakistuse mõjul seisma.

Kõigi nende näidete juures muutub keha kiirus mingi teiste kehade poolt sellele kehale avaldatud mõju tulemusena. Mõnedel juhtudel avaldub see mõju vahetul kokkupuutumisel (löök, rõhumine), teistel juhtudel on kehade vastastikune mõjustamine keerukam, näiteks Maa külgetõmme kehadele, magneti külgetõmme raudkuulile.

Kuidas liigub keha, kui temale ei mõju teised kehad? Kas võib seda selgitada katse abil?

TARTU ÜLIKOOLI

Isaac Newton (1643—1727) — geniaalne inglise õpetlane — sündis 5. jaanuaril 1643, s. t. aasta pärast Galilei surma ja peaaegu sada aastat pärast Koperniku surma.

Newton tegi suurimaid avastusi: tema avastatud on tema nime kandvad dünaamika seadused, mis on kaasaegse mehhaanika aluseks, ja ülemaailmne gravitatsiooniseadus. Ta töötas välja valgusõpetuse, mida kasutatakse kuni käesoleva ajani. Peale selle kuulub temale rida suuri avastusi matemaatika vallas.

Newtoni elutööks on ta raamat «Loodusfilosoofia matemaatilised alused». See raamat omas suure tähtsuse füüsika arengus; selles on esitatud mehhaanika alused ja antud dünaamika seaduste ja gravitatsiooniseaduse praktilise kasutamise näiteid.

Lihtsate katsetega on seda raske teha. Siiski võib märgata, et mida täielikumalt on kõrvaldatud keha liikumist segavad tegurid, seda enam läheneb keha liikumine ühtlasele ja sirgjoonelisele liikumisele.

Nii näiteks teraskuul, langedes kaldrennilt liivaga kaetud horisontaalsele pinnale, jääb peagi seisma; veeredes mööda klaasi pinda, säilitab aga kuul muutmatult oma kiiruse võrdlemisi kaua.

Väljalülitatud mootoriga auto jääb munakivisillutisel kiiresti seisma, kuid asfaltteel jätkab liikumist küllalt kaua.

On loomulik arvata, et kui oleksid kõrvaldatud kõik liikumist segavad asjaolud, siis keha jätkaks liikumist kuitahes kaua.

Üldistades kehade liikumise uurimiseks korraldatud vaatluste ja katsete tulemusi, avastas Newton seaduse, mis kujunes üheks kolmest dünaamika põhiseadusest. Seda seadust võib sõnastada järgmiselt:

kui kehale ei mõju teised kehad, siis ta püsib paigal või säilitab ühtlase sirgjoonelise liikumise.

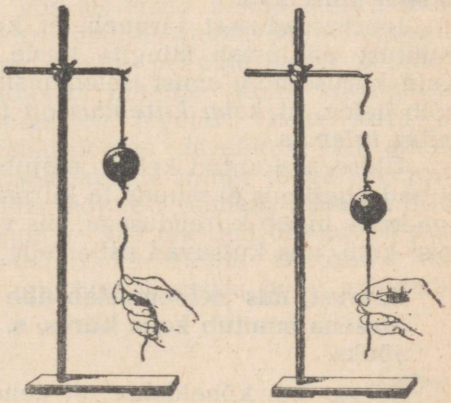
Sellest seadusest järgneb, et *kui kehale ei mõju teised kehad, siis ta liigub kiirusega, mis on muutumatu nii suuruse kui ka suuna poolest.* Paigalseisu vaadeldakse kui liikumise erijuhtu, kus kiirus on võrdne nulliga. Mõlemal juhul puudub kiirendus. Seega, *kui antud kehale ei mõju teised kehad, siis ta liigub kiirenduseta.*

Keha omadust säilitada paigalseisu või ühtlase sirgjoonelise liikumise olekut nimetatakse keha i n e r t s i k s[1]. Eespool sõnastatud seadust nimetas Newton i n e r t s i s e a d u s e k s.

Kehade inertsi ilmingutega kohtume alati. Kõik teavad hästi, et vaguni ootamatul peatamisel kõik vagunis püsti seisvad reisijad, säilitades oma liikumise oleku, kalduvad ettepoole. Ratsu ootamatul peatumisel lendab ratsanik, kes jätkab liikumist, üle ratsu pea.

Inertsi tõttu ei saa silmapilkselt muuta keha kiirust, selleks on vaja aega.

Teeme järgmise katse. Riputame raske koormuse niidi otsa, mis võib kannatada koormuse raskusest pisut suuremat raskust. Samasuguse niidi kinnitame ka koormuse alla. Kui järsu liigutusega rebida alumisest niidist (joon. 48), siis see katkeb; kui aga tõmmata aeglaselt, pingutades järk-järgult tugevamini, siis katkeb ülemine niit (joon. 49). Selgitame antud katset. Selleks et katkeks ülemine niit, tuleb seda venitada, s. t. tuleb panna koormus liikuma. Kiirel rebimisel mõjub käsi koormusele väga lühikese ajavahemiku vältel, inertsi tõttu ei jõua koormus selle ajaga veel liikuma hakata, seepärast ei katke ülemine niit. Mõjudes alumisele niidile kestvalt jõuga, millest ei piisa selle katkirebimiseks, me paneme koormuse aegamööda liikuma, seepärast ülemine niit, mida venitab koormuse raskus ja täiendavalt käe pingutus, katkeb.



Joon. 48. Järsul rebimisel katkeb alumine niit.

Joon. 49. Kui tõmmata aegamööda, siis katkeb ülemine niit.

Täpselt samuti on vaja aega, et peatada liikuvat keha, näiteks autot, trammi või rongi. Silmapilkselt pole võimalik peatada ei autot ega rongi. Isegi tugeval pidurdamisel liigub auto teatud aja inertsi tõttu edasi. Kuid auto või rongi äkiline peatamine ei katkesta reisijate liikumist inertsi tõttu ja see on sagedasti õnnetuste põhjuseks.

[1] *Inertia* — ladinakeelne sõna, tähendab «liikumatus», «tegevusetus».

Kehade inertsi on vaja arvestada ka tööstuses, kus on tegemist tööriistade, tööpinkide ja masinate liikuvate osadega, mida inertsi tõttu pole võimalik silmapilkselt liikuma panna ega ka peatada.

Inerts on üks kõige üldisematest omadustest, mis on igal kehal, milline see ka ei oleks ja kus see ka ei asuks.

Harjutus 22.

1. Millega seletada, et komistav inimene kukub oma liikumise suunas?
2. Millel põhineb tolmu eemaldamine riietest nende kloppimisel? raputamisel?
3. Hüpates mingilt kõrguselt ja jäädes maapinnale jalgadele seisma, painutab inimene põlvedest jalgu. Miks?
4. Kuidas pannakse kirvest varre otsa? Seletage seda võtet.

31. Jõud. Esimesed ettekujutused jõust on meie juures seotud käe- ja jalalihaste pingutustega — musklite jõuga.

Sagedasti iseloomustame sõnadega «tugev» ja «nõrk» igapäevases elus ühe keha mõju teisele, näiteks käe mõju pallile, vedru mõju vintpüssi luku lööknõelale, auru rõhumist aurumasina kolvile jne.

Jõu mõistet kasutatakse laialdaselt ka teaduses, see kuulub füüsika põhimõistete hulka. Jõu mõiste sisu füüsikas ei erine oma olemuselt meie tavalistest ettekujutustest jõust. Vaatleme seda üksikasjalisemalt.

Inertsiseadusest järgneb, et keha kiiruse suuruse ja suuna muutust põhjustab mingite teiste kehade mõju sellele kehale. Kuid kiiruse muutumist iseloomustatakse kiirendusega. Järelikult võib öelda, et *keha kiirendus on temale mõjuvate teiste kehade mõju tulemus.*

Üldse, kui antud kehale mõjub mitu keha, siis võib juhtuda, et nad üheskoos ei muuda ta kiirust, s. t. ei tekita kiirendust. Kui aga keha liigub kiirendusega, siis võime alati leida teise keha või teisi kehi, mis kutsuvad esile selle kiirenduse.

Suurust, mis iseloomustab ühe keha mõju teisele, mille tulemusena muutub keha kiirus, s. t. tekib kiirendus, nimetatakse jõuks.

Seega, kui kõneldakse, et kehale mõjub jõud, siis tähendab see, et kehale mõjub teine keha.

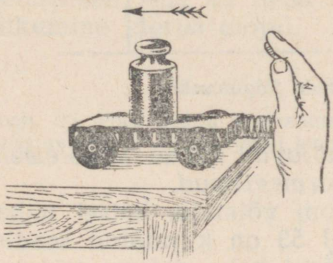
Sõltuvalt kehade vastastikuse mõju viisist eristatakse elastsusjõudu, raskusjõudu, hõõrdejõudu, elektrilise ja magnetilise päritoluga jõude jne. Nimetatud jõududest õpitakse mehhaanikas tundma kolme esimest — raskusjõudu, elastsusjõudu ja hõõrdejõudu.

Meile on eriti tähtis raskusjõud. Kõik kehad, nende hulgas ka inimene, alluvad selle jõu mõjule, mis tõmbab neid Maa külge ja põhjustab kehade kiirendusega langemise.

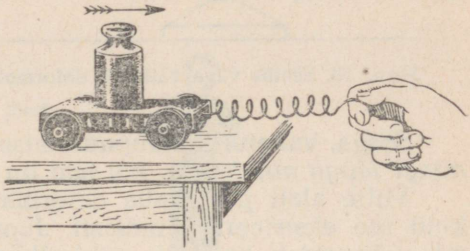
Raskusjõu ehk kaalu ühikuks on võetud plaatinasilindri (etalooni) kaal. Seda silindrit hoitakse alal Rahvusvahelises Mõõtude ja Kaalude Büroos Sevres'is (l. seevr) (Pariisi läheda!). Seda kaaluühikut nimetatakse kaalukilogrammiks või jõukilogrammiks (lühendatult 1 kG).

Ühte tuhandikku kaalukilogrammist nimetatakse kaalugrammiks ehk jõugrammiks (lühendatult 1 G).

Teisi jõu mõõtmise ühikuid vaadeldakse hiljem.

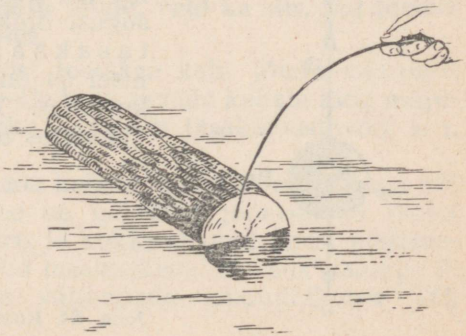


Joon. 50. Vedru, mõjudes kehale, lüheneb.

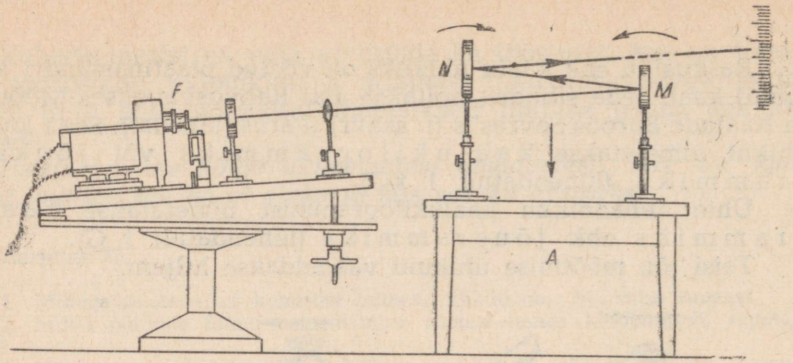


Joon. 51. Vedru, mõjudes kehale, venib välja.

32. Jõud ja kehade deformatsioonid. Kui kaks keha kokku puutudes mõjutavad teineteist, siis mõlemad kehad deformeeruvad. Näiteks kehale mõjuv vedru lüheneb (joon. 50) või venib välja (joon. 51); keha liikuma panev peenike kepp paindub (joon. 52); käe musklid tõmbuvad pingule. Kuid laienemise, kokkusurumise ja painde juures on tegemist keha kuju ja ruumala muutusega, s. t. deformatsiooniga. Järelikult võib ainult deformeeritud keha mõjuda teisele kehale mingi jõuga. Seejuures deformeerub ka see keha, mis mõjutab esimest. Seda on eriti hästi näha käe mõjumisel vedrule — käe musklid tõmbuvad pingule (deformeeruvad), deformeerub ka vedru. Deformeeritud vedru omakorda mõjub käele, mis tunneb vedru poolt avaldatavat vastumõju.



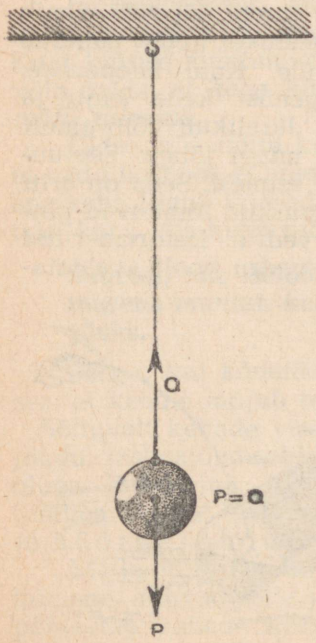
Joon. 52. Peenike kepp, pannes keha liikuma, paindub.



Joon. 53. Seadis väga väikeste deformatsioonide jälgimiseks.

Seega, vahetul kokkupuutumisel *mõjuvad kehad teineteisele mingi jõuga ainult siis, kui nad on deformeerunud.*

Mitte alati pole keha deformatsiooni võimalik katsel näha, kuid see eksisteerib kindlasti. Joonisel 53 on kujutatud seadis, mis võimaldab avastada tühiselt väikseid keha deformatsioone. Paksu tammeplaadiga massiivsel tammest laual seisab kaks peeglit *M* ja *N*. Aparaadist *F* väljuv valguskiir, peegeldunud järjest mõlemalt peeglilt, annab skaalal valguslaigu. Igasugune lauaplaadi paindumine kallutab peegleid nooltega märgitud suunas ja valguslaik nihkub. Tänu valguskiirest moodustunud osuti suurele pikkusele (mitu meetrit) on seadme tundlikkus väga suur. Kui suruda väikese sõrmega vastu lauda noolega näidatud suunas, nihkub valguslaik skaalal märgatavalt ja näitab lauaplaadi deformeerumist.



Joon. 54. Koormuse tasakaal jõudude *P* ja *Q* mõjul.

Seega, *iga keha deformeerub mistahes väikese jõu mõjul. Mittedeformeeruvaid kehi pole olemas.*

33. Jõudude tasakaal. Jõudude mõõtmine. Kui kehale mõjub mitu jõudu, siis võib juhtuda, et nad koos ei muuda keha kiirust, s. t. ei kutsu esile kiirendust. Niisugust olukorda nimetatakse jõudude tasakaaluks. Vaatleme näiteid. Joonisel 54 on kujutatud nööri otsas rippuv koormus. Temale mõjub raskusjõud *P*, tõmmates teda Maa poole. Kuid koormus

ei lange, vaid jääb paigale. See tuleb sellest, et koormusele ei mõju üks, vaid kaks jõudu: raskusjõud *P* tõmbab koormust alla, kuid väljavenitatud (deformeeritud) nöör tõmbab teda niisama suure jõuga *Q* üles. Kahe jõu mõjul jääb koormus paigale, ta kiirendus on võrdne nulliga. Teine näide. Joonisel 55 on kujutatud üle oja pandud laud. Poisi kaalu mõjul laud paindus, tekkis inimesele rakendatud jõud. See jõud tasakaalustabki poisi kaalu.

Kui kahe või mitme jõu mõjul keha liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt, siis ka need jõud on tasakaalus. Sel juhul toimub liikumine inertsi mõjul.

Joon. 55. Poisi kaalu tasakaalustab jõud, mida avaldab deformeerunud laud.

Vaatleme näiteks rongi ühtlast liikumist sirgel horisontaalsel teeosal. Veduri aurumasin arendab veojõudu, kuid see ei põhjusta rongi kiirenevat liikumist. Millest see tuleb? On teada, et peale tõmbejõu mõjub rongile rataste hõõrdumine vastu rööpaid ja õhutakistus — need jõud aeglustavadki rongi liikumist. Kui veojõud ja rongi liikumist aeglustavad jõud on tasakaalus, siis nad ei põhjustagi rongi kiiruse muutumist. Tasakaalustunud jõudude mõjul liigub rong ühtlaselt ja sirgjooneliselt. Sedasama võib öelda iga keha kohta, mis liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt.

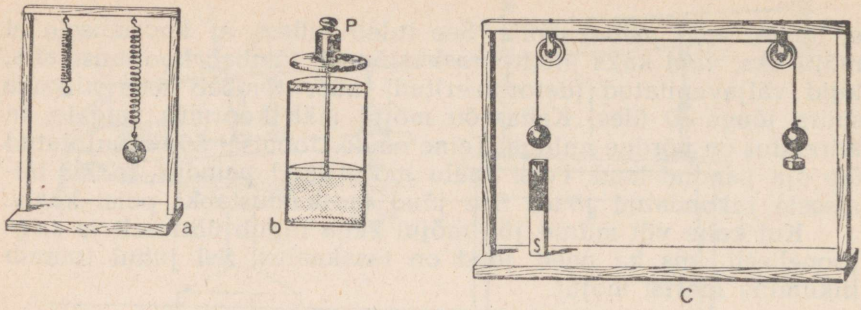
Seega,

keha on paigal või liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt mitte ainult siis, kui temale ei mõju jõude, vaid ka siis, kui temale mõjuvad jõud on tasakaalus.

Sõltumatult mõõtmise viisist loetakse kaht jõudu suuruselt võrdseks, kui nad, rakendatuna ühele ja samale kehale ning mõjudes vastassuundades, vastastikku teineteist tasakaalustavad, s. t. ei muuda keha kiirust.

Iga jõudu võib tasakaalustada kehale mõjuva raskusjõuga või lihtsalt keha kaaluga, nagu see on näidatud joonisel 56. Sellel joonisel on väljavenitatud vedru ja kokkusurutud gaasi elastsusjõud ning magnetiline tõmbejõud tasakaalustatud keha kaaluga *P*.

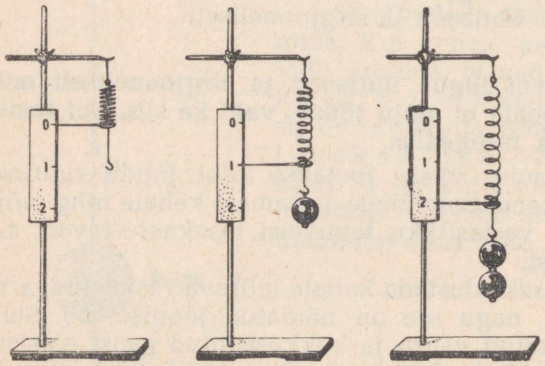
Sellepärast võib iga jõudu väljendada kaaluühikutes (kG, G jne.).



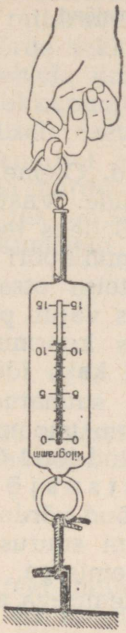
Joon. 56. Väljavenitatud vedru (a) ja kokkusurutud gaasi elastsusjõud (b) ning magnetiline tõmbejõud (c) on tasakaalustatud raskusjõuga.

Katse näitab, et kaks ühesugust koormust venitavad vedru kaks korda tugevamini kui kumbki neist üksikult (joon. 57), kolm koormust — kolm korda tugevamini jne. Seega on vedru pikenemine võrdeline koormuse kaaluga. See võimaldab vedru venimist gradueerida kaaluühikutes. Seda kasutatakse jõu mõõduriistades — d ü n a m o m e e t r i t e s. Mitmesuguse kujuga dünamomeetreid on kujutatud joonistel 58, 58 *a, b*. Joonisel 58 kujutatud dünamomeetris venitab mõjuv jõud terasest spiraalvedru. Joonisel 58 *a* kujutatud dünamomeetrit kasutatakse suurte jõudude mõõtmiseks. Selles dünamomeetris painutab rakendatav jõud kaht elastset terasriba. Selle dünamomeetri töötamist selgitab joonis 58 *b*.

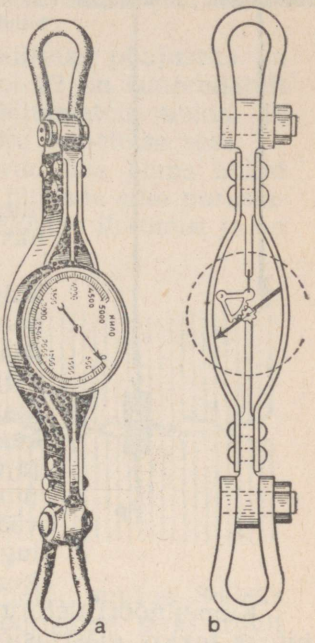
Dünamomeetreid, millega mõõdetakse kehade kaalu, nimetatakse v e d r u k a a l u d e k s.



Joon. 57 Vedru pikenemine on võrdeline tema külge riputatud koormuse kaaluga.



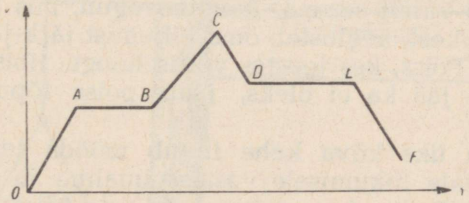
Joon. 58. Vedrudünamomeeter.



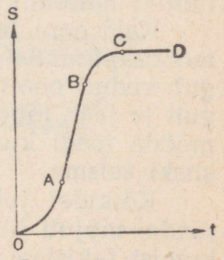
Joon. 58 *a, b.* Dünamomeeter suurte jõudude mõõtmiseks.

Harjutus 23.

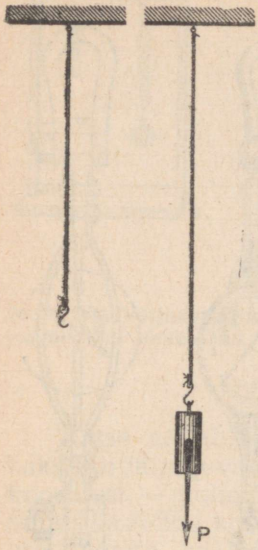
1. Puksiir veab terastrossi abil praami seisvas vees (puksiirilt on praamile tõmmatud terastross). Praam liigub ühtlaselt. Näidata, millised jõud mõjuvad praamile.
2. Joonisel 59 on antud rongi liikumise kiiruse graafik. Mida võib öelda veojõu ja liikumist takistava jõu kohta rongi tee erinevatel osadel?
3. Joonisel 60 on näidatud rongi tee graafik. Eraldage graafikul piirkonnad, kus rongile mõjuvad jõud on tasakaalus.



Joon. 59. Rongi liikumise kiiruse graafik (ülesande 2 juurde).



Joon. 60. Rongi tee graafik (ülesande 3 juurde).



Joon. 61. Koormuse kaalu tasakaalustab väljavenitatud kumminööri elastsusjõud.

34. Elastsusjõud. Oleme korduvalt meenutanud elastsusjõude. Vaatleme neid nüüd üksikasjalisemalt. Selleks teeme katse.

Kinnitame kumminööri ühe otsa toe külge (joon. 61), teise otsa aga riputame koormuse. Koormus vajub pisut allapoole ja peatub. Mis peatas koormuse? Koormusele mõjub paigalseisul kaks jõudu: raskusjõud (kaal) *P*, mis on suunatud allapoole, ja kumminööris deformatsiooni tõttu tekkinud ja ülespoole suunatud jõud *Q*. Viimast jõudu nimetatakse e l a s t s u s j õ u k s. Absoluutväärtuselt on see jõud võrdne koormuse kaaluga, deformatsiooni suurus aga on võrdne kumminööri pikenemisega.

Kumminööri deformatsiooni suurenemisega suureneb ka seejuures tekkiv elastsusjõud.

Kui vähendada kumminööri otsa kinnitatud koormust, siis paneb elastsusjõud kumminööri vaba otsa liikuma üles, ta deformatsioon väheneb, kuid sellega koos väheneb ka elastsusjõud.

Kui kumminöör on saanud tagasi oma esialgse oleku, kaob deformatsioon, kaob ka elastsusjõud.

Elastsusjõud ilmnevad alati, kui kehi deformeeritakse: venitatakse, surutakse kokku, painutatakse, väänatakse jne.

35. Libisemise hõõre. Eelmistes paragrahvides tutvusime kahe jõuga: elastsusjõuga ja raskusjõuga.

Kolmas mehhaanikas õpitavate jõudude liik kujutab hõõrdejõude. Milles on nende jõudude iseärasus? Mille poolest erinevad nad meie poolt varem õpitud jõududest? Vaatleme meile hästi tuntud näiteid.

Kaldrenni mööda põrandale veerenud kuul jätkab liikumist mööda põrandat, kuid jääb varsti seisma. Raudteevagun, mis liigub veduri poolt saadud tõukest, aeglustab oma liikumist järk-järgult ja jääb lõpuks seisma. Poiss, kes joostes võttis hoogu, libises mööda jääd; kuid kui libe jää ka ei oleks, jääb poiss lõpuks siiski seisma.

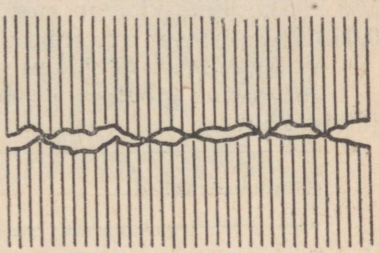
Kõikidel juhtudel, kui üks kõva keha liigub mööda teise pinda, mõjub liikuvale kehale liikumisele vastassuunaline ja liikumist takistav jõud. Seda jõudu nimetatakse h õ õ r d e j õ u k s.

Hõõret, mis tekib ühe keha libisemisel mööda teist, nimetatakse l i b i s e m i s e h õ õ r d e k s. Libisemise hõõrde näideteks

on reejalaste hõõrdumine lumel, uiskude hõõrdumine jääl, rattatelje hõõrdumine rattarummus jne.

Libisemise hõõrde tekkimise üheks oluliseks põhjuseks on kokkupuutuvate kehade krobelisus. Joonisel 62 on suurendatult kujutatud kahe kokkupuutuva pinna välditamatud nukid ja süvendid, mis osaliselt asetsevad vastastikku teineteise sees.

Ühe pinna liikumisel mööda teist löövad ühe pinna nukid vastu teise nukke ja murduvad; hõõrduvate pindade aine purustatakse peeneks. See tekitab teatud jõu, mis takistab liikumist ja on alati suunatud liikumisele vastu.



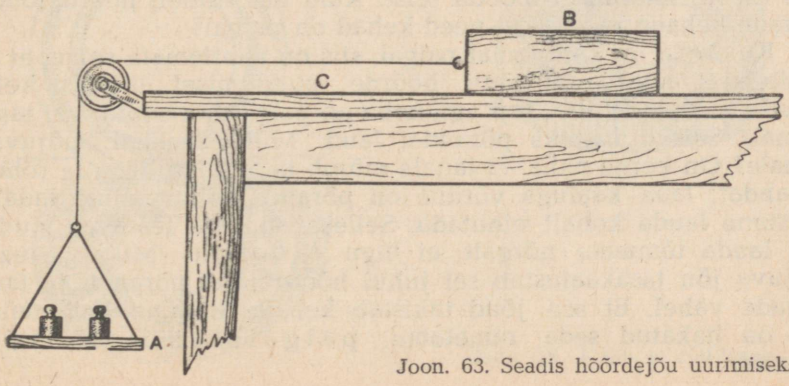
Joon. 62. Süvendid ja nukid kokkupuutuvatel pindadel.

Uurime katse teel, millest oleneb hõõrdejõu suurus. Selleks kasutame joonisel 63 kujutatud seadet. Koormame järk-järgult kausikest *A* ja tõukame kergelt risttahukat *B*, kuni ta hakkab ühtlaselt libisema mööda lauda *C*. Sel korral on tõmbejõud (kausikese ja koorma kaal) võrdne hõõrdejõuga libisemisel.

Muutes koormust risttahukal *B*, võime veenduda, et *võrdeliselt rõhumisjõu suurenemisega suureneb ka hõõrdejõud.*

Kui meie poolt korraldatavas katses vahetame sileda laua *C* krobelisemaga, siis ühe ja sama rõhumisjõu puhul osutub hõõrdejõud teistsuguseks.

Samuti muutub hõõrdejõud ühe materjali asendamisel teisega.



Joon. 63. Seadis hõõrdejõu uurimiseks.

Küllalt suures vahemikus ei sõltu hõõrdejõud libisemisel kõvade kehade kokkupuutuvate pindade suurusest. Selles pole raske veenduda, mõõtes näiteks lauapinna ja risttahuka erinevate tahkude vahel libisemisel tekkivat hõõrdejõudu.

Hõõrdejõu F ja rõhumisjõu P suhet nimetatakse hõõrdeteguriks.

$k = \frac{F}{P}$, kus k on hõõrdetegur.

Hõõrdejõu sõltuvust rõhumisjõust väljendab valem:
$F = kP$.

Näide. Millist vähimat jõudu on vaja rakendada, et nihutada 500 kG koormatud rege mööda jääd, kui puu hõõrdetegur jääl on 0,035? (Reejalased on rautamata.)

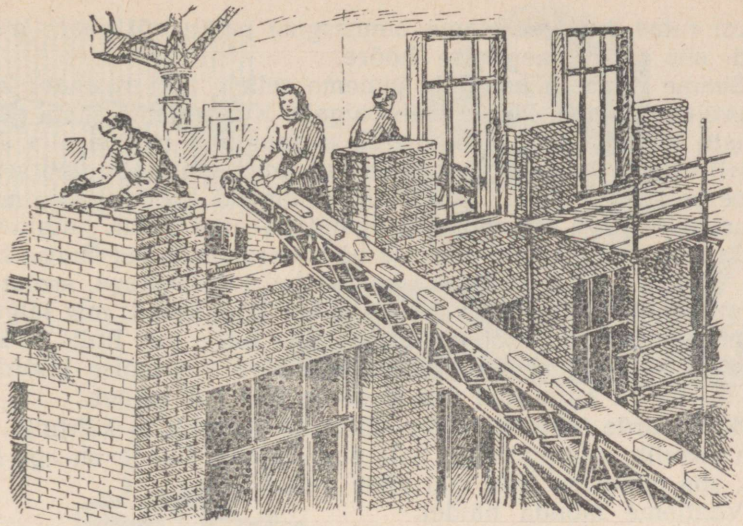
Valemist $F = kP$ leiame, et $F = 0{,}035 \cdot 500$ kG $= 17{,}5$ kG.

Järgnevas tabelis on toodud hõõrdetegureid mitmete materjalide kohta.

Hõõrduvad kehad	Hõõrdetegur
Teras mööda terast	0,17
Teras mööda malmi	0,17
Raud mööda rauda	0,3
Raud mööda messingit	0,2
Raud mööda malmi ja pronksi	0,18
Pronks mööda malmi	0,22
Messing mööda malmi	0,16
Tamm mööda tamme pikikiudu	0,4
Tamm mööda tamme ristikiudu	0,2
Nahkrihm mööda puitu	0,4
Nahkrihm mööda malmi	0,28
Teras mööda jääd	0,02
Teras mööda kõva pinnast	0,2—0,4
Rattakumm mööda kõva pinnast	0,4—0,6
Puit (libisedes) mööda jääd	0,035

36. Paigaloleku hõõre. Me vaatlesime hõõrdejõudu, mis tekib ühe eseme liikumisel mööda teist. Kuid kas esineb hõõrdejõudu kõvade kehade vahel, kui need kehad on paigal?

Kui keha on kaldpinnal paigal, siis on kahtlemata selge, et ta püsib seal hõõrdejõu tõttu, hõõrde puudumisel liiguks keha mööda kaldpinda alla. Kui aga keha on paigal horisontaalsel tasapinnal? Seisku näiteks põrandal laud. Millised jõud mõjuvad temale? On kerge näha, et lauale mõjub ta kaal, millega ta rõhub põrandat; laua kaaluga võrdne on põranda rõhumisjõud lauale. Katsume lauda kohalt nihutada. Selleks on vaja teatavat jõudu. Kui lauda tõmmata nõrgalt, ei liigu ta paigalt. Miks? Lauale mõjuva jõu tasakaalustab sel juhul hõõrdejõud põranda ja laua jalgade vahel. Et see jõud takistab kehade liikuma hakkamist, siis on hakatud seda nimetama paigaloleku hõõrdejõuks.

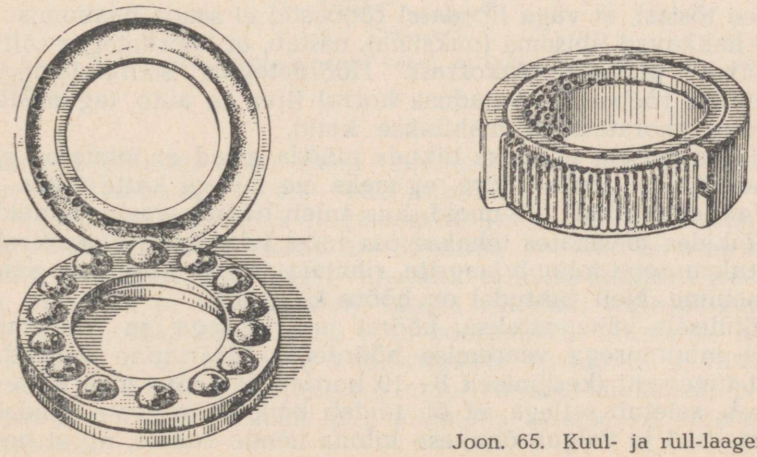


Joon. 64. Hõõrdejõu mõjul püsivad tellised transportööril.

Paigaloleku hõõrdejõud on alati suunatud sellele liikumisele vastu, mis peaks tekkima.

Joonisel 64 on kujutatud tellised, mis paigaloleku hõõrdejõu tõttu püsivad transportööri kalduoleval pinnal, mille abil antakse ehitajatele ette telliseid ja muid ehitusmaterjale.

37. Veeremise hõõre. Kui üks keha ei libise, vaid veereb mööda teist, siis selle juures tekkivat hõõret nimetatakse veeremise hõõrdeks. Kui näiteks veereb jalgratta, auto või



Joon. 65. Kuul- ja rull-laager.

vaguni ratas, kui veeretame ümmargusi palke või vaate mööda maad, siis tekib veeremise hõõre.

Seame raamatu kaldu ja paneme sellele piki raamatu kallet ümmarguse pliiatsi. Pliiats jääb paigale. Kui paneme sama pliiatsi raamatu kaldega risti, siis veereb ta raamatut mööda alla. Palki on palju kordi kergem veeretada kui lohistada. See tuleb sellest, et veeremisel on hõõrdejõud mitukümmend korda väiksem kui libisemisel. Seega, soovides kergendada ühe keha nihutamist mööda teist, on tarvis libisemise hõõre asendada veeremise hõõrdega. Näiteks varustatakse raske mööbel rattakestega, asetatakse jalgratta telje ja rummu vahele siledad kuulikesed, mis jalgratta liikumisel veerevad mööda rummu ning telge jne. Rull- ja kuullaagrite abil asendatakse libisemise hõõre veeremise hõõrdega. Joonisel 65 on kujutatud üks kuul- ja üks rull-laager.

38. Hõõrde tähtsus. Hõõre võib olla kasulik ja kahjulik. Kui ta on kasulik, siis püütakse teda suurendada, kui ta on aga kahjulik, siis püütakse teda igal viisil vähendada.

Vaatleme mõnda näidet.

Hõõrdumine näiteks peatab auto pidurdamisel. Hõõrdumiseta aga ei saaks auto alustada liikumist: rattad küll pöörleksid, kuid auto jääks ikka paigale. Hõõre annabki autole edasiliikumise võimaluse. Sama võib öelda ka veduri kohta. Ainuüksi auru rõhumine veduri silindris ei suuda panna vedurit liikuma. Selleks on vaja välisjõudu (veduri suhtes) — rööbaste mõju veduri veoratastele. Selliseks välisjõuks ongi veduri veorataste ja rööbaste vaheline hõõrdejõud.

Rongi raskuse ja liikumiskiiruse suurendamisega raudteetranspordis suurendatakse ka veduri kaalu. Tõepoolest, mida suuremat rõhumisjõudu tekitab vedur rööbastele, seda suurem on hõõrdejõud veduri veorataste ja rööbaste vahel; see jõud tekitabki veduri tõmbe.

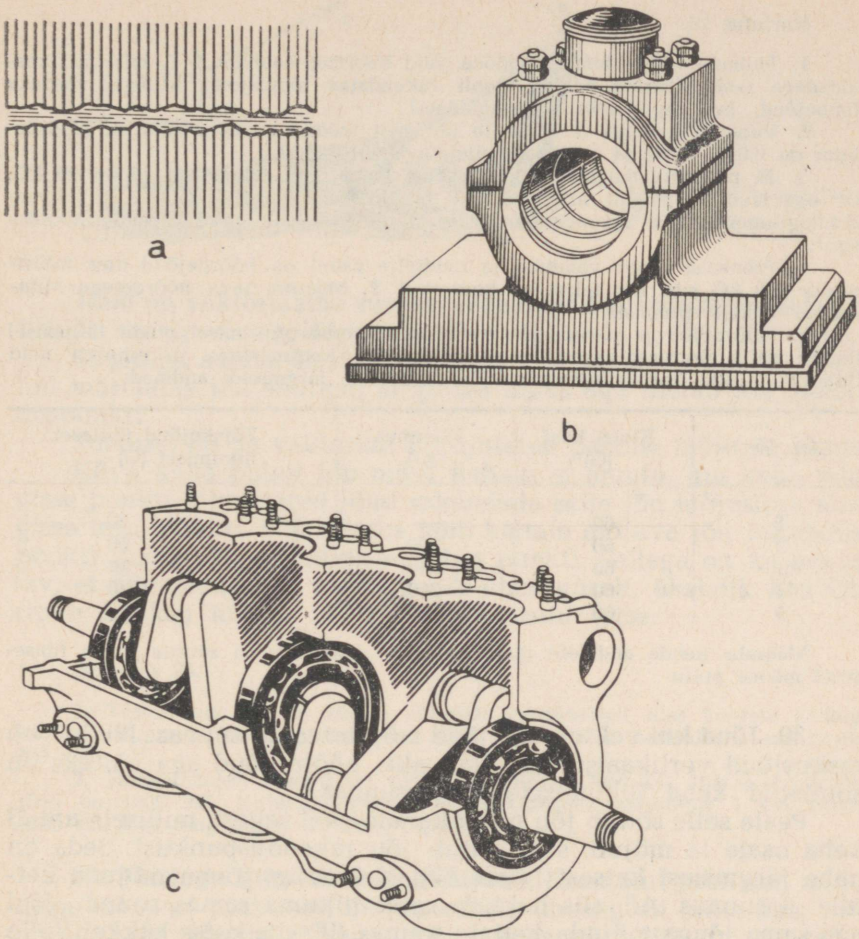
See tõsiasi, et väga libedatel rööbastel ei saada haakumist ja rattad hakkavad libisema (puksima), näitab, et hõõrdetegur sõltub hõõrduvate pindade olukorrast. Hõõrdeteguri suurendamiseks puistatakse rööbastele vajaduse korral liiva ja auto tagumistele ratastele (veoratastele) mähitakse ketid.

Hõõrdumiseta ei saaks liikuda mööda maad ei inimesed ega loomad. Kui puuduks hõõre, ei saaks me midagi kätte võtta.

Vaatleme nüüd juhtumeid, kus tuleb hõõrde vastu võidelda.

Kõikides masinates tehakse osa tööst hõõrdejõu ületamiseks, mille tulemusena toimub laagrite, rihmarataste ja libisevate osade soojenemine. Neil juhtudel on hõõre kahjulik.

Põhiliselt vähendatakse hõõret määrimisega ja libisemise hõõrde muutmisega veeremise hõõrdeks. Määrimine vähendab hõõret tugevasti (keskmiselt 8—10 korda). Et hõõre määrimisega väheneb, seletub sellega, et õli täidab kõik hõõrduvate pindade ebatasasused ja valgub õhukese kihina nende vahele, nii et need



Joon. 66. *a*) Määre hõõrduvate pindade vahel; *b*) liugelaager; *c*) mootori väntvõll kuullaagritel.

pinnad ei puutugi nagu enam teineteist (joon. 66 *a*), seejuures libisevad teineteise suhtes vedelikukihid.

Vahetades masinates liugelaagrid (joon. 66 *b*) kuullaagritega, vähenevad hõõrdekaod 20—30 korda. Joonisel 66 *b* on kujutatud liugelaager. Selle laagri vahetükid tehakse babiidist (seatina, tina, antimoni ja vase suland). Laagri vahetüki sisse paigutatud võlli ja vahetüki vahel tekib võlli pöörlemisel libisemise hõõre. Joonisel 66 *c* on näidatud kuullaagritele seatud auto väntvõll.

Rull- ja kuullaagreid rakendatakse tehnikas laialdaselt. Nende laagriteta on raske endale ette kujutada tänapäeva tööstust ja transporti.

Harjutus 24.

1. Hobune veab ühtlaselt mööda jääd koormat kaaluga 1 T, mis on terastaldadega reel. Määrata hobuse poolt rakendatav tõmbejõud. Millega võrduks tõmbejõud, kui regi oleks terastaldadeta?

2. Veoauto kaaluga 5 T liigub ühtlaselt mööda munakivisillutist. Hõõrdetegur on 0,023. Määrata auto poolt ületatav hõõrdejõud.

3. Et nihutada paigalt 40 kG raskust lauda, tuli rakendada jõudu 20 kG. Kui aga laud oli paigalt nihkunud, oli ta ühtlaseks edasiliikumiseks küllaldane 15-kilogrammise jõu rakendamine. Määrata paigaloleku ja libisemise hõõrdetegur.

4. Pronksist laagri vahetüki ja raudtelje vahel on hõõrdejõud ilma määrimiseta 180 kG siis, kui teljel on koorem 1 T. Määrata raua hõõrdetegur libisemisel mööda pronksi.

5. Hõõrdejõu ja rõhumisjõu vahelise sõltuvuse uurimisel puidu liikumisel mööda puitu koormati puuklotsi mitmesuguste koormustega ja nihutati neid ühtlaselt mööda horisontaalset puuplanku. Saadi järgmised andmed:

Jrk. nr.	Klotsi kaal (G)	Koormus (G)	Tõmbejõud ühtlasel liikumisel (G)
1	60	—	20
2	60	100	60
3	60	200	90
4	60	300	130
5	60	500	200

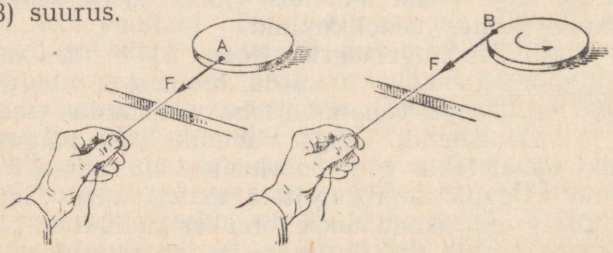
Määrata nende andmete järgi keskmine hõõrdeteguri suurus puidu libisemisel mööda puitu.

39. Jõud kui vektor. Iga jõud mõjub teatud suunas. Nii mõjub raskusjõud vertikaalsuunas ülalt alla, hõõrdejõud aga näiteks on suunatud keha liikumisele vastassuunas.

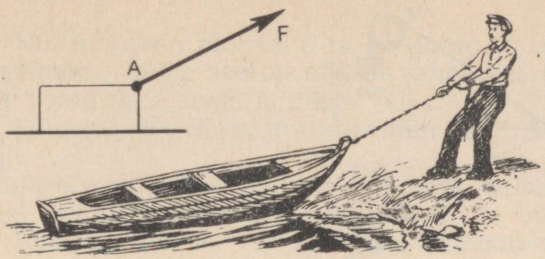
Peale selle sõltub jõu mõju kehale veel sellest, millisele antud keha osale ta mõjub, s. t. sõltub jõu rakenduspunktist. Seda on näha järgmisest katsest (joon. 67). Kui mingi jõuga mõjuda kettale A suunas AF, siis hakkab ketas liikuma samas suunas. Kui aga sama jõuga mõjuda kettale suunas BF, siis ketas hakkab selle jõu suunas liikuma ja üheaegselt ka pöörduma.

Seega iseloomustavad jõudu kolm tunnust:

1) rakenduspunkt,
2) suund ja
3) suurus.



Joon. 67. Jõu mõju sõltub ka rakenduspunkti asukohast.



Joon. 68. Jõu graafiline kujutamine.

Jõud on vektoriaalne suurus, *seepärast kujutatakse teda graafiliselt suunatud sirglõiguna.*

Sirglõigu suund ühtib jõu suunaga, ta pikkus väljendab valitud mastaabis jõu suurust, sirglõigu algus aga näitab jõu rakenduspunkti.

Joonisel 68 on vektorina F kujutatud paadile mõjuvat jõudu.

Kõva keha puhul jõu mõju kehale ei muutu, kui keha mingisse punkti rakendatud jõud rakendada selle jõu mõjusirge mingisse teise punkti. Nii näiteks võib kettale mõjuva jõu rakenduspunkti (joon. 67) viia niidi mistahes punkti. Sellega on ka seletatav, et dünamomeetri vedru venib ühesuguselt, ükskõik kas viht ripub konksu küljes või on seotud niidi otsa.

Harjutus 25.

1. Tõstekraana (lk. 9) tõstab ühtlaselt vertikaalselt üles koorma kaaluga 800 kG. Kujutada koormale mõjuvad jõud vektoritena mastaabis 1 cm vastab 200 kG.
2. Horisontaalsel teeosal on veduri tõmbejõud 3000 kG, liikumist takistav jõud on 1000 kG. Kujutada need jõud vektoritena mastaabis 1 cm vastab 1000 kG. Kas rong liigub ühtlaselt? Miks?

40. Jõudude liitmine. Resultantjõud. Enamikul juhtudel, milledega kohtume praktikas, mõjub kehale üheaegselt mitte üks, vaid mitu jõudu. Nende jõudude mõjul keha võib liikuda või seista paigal.

Paljudel juhtudel, kui kehale mõjub mitu jõudu, võib leida üheainsa jõu, mille mõju kehale on samaväärne antud mitme jõu mõjuga.

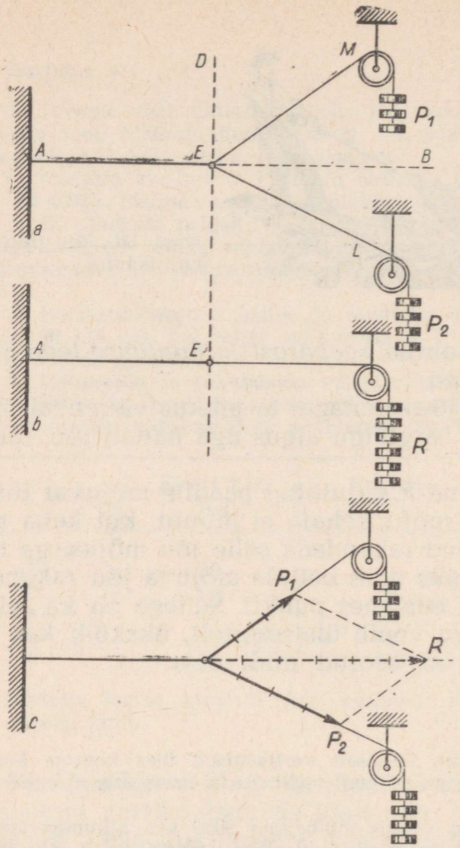
Jõudu, mis avaldab kehale samasugust mõju kui mitu jõudu üheskoos, nimetatakse nende jõudude resultantjõuks.

Neid jõude, mida asendame resultantjõuga, nimetatakse komponentjõududeks.

Mitme antud jõu resultantjõu leidmist nimetatakse jõudude liitmiseks.

Vaatleme, kuidas leida keha ühte punkti rakendatud kahe jõu resultantjõudu.

Joonisel 69 *a* on kujutatud kumminöör AE, mis on jõudude P_1 ja P_2 mõjul venitatud mööda sirget AB vertikaalsirgeni DE.



Joon. 69. Nurgi suunatud jõudude liitmine.

Valime niisuguse jõu R, mis oleks jõudude P_1 ja P_2 resultantjõud. See jõud venitab nööri AE samuti nagu jõud P_1 ja P_2 (joon. 69 *b*) üheskoos mõjudes.

Asetame niitide suundadega EM ja EL paralleelselt lõigud, mis mingis mastaabis vastavad jõududele P_1 ja P_2 (joon. 69 *c*). Konstrueerime neile lõikudele kui külgedele parallelogrammi. Selle parallelogrammi diagonaal, samas mastaabis mõõdetuna, on võrdne jõuga R. R ongi teineteisega nurga all mõjuvate jõudude P_1 ja P_2 resultantjõud.

Meie poolt saadud tulemuse põhjal võime sõnastada üldise jõudude liitmise reegli, mille järgi:

kehale rakendatud kahe nurgi suunatud jõu resultantjõudu kujutatakse suuruse ja suuna poolest parallelogrammi diagonaaliga, mis on ehitatud nendele jõududele kui külgedele.

See reegel on tuntud jõudude parallelogrammi reegli nime all.

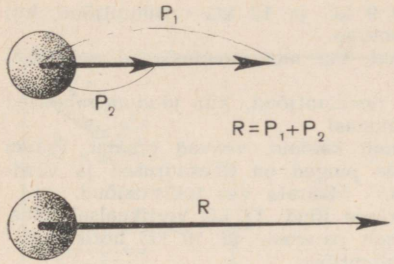
Kui parallelogrammi külgede suurus ei muutu, siis sõltub diagonaali pikkus külgedevahelisest nurgast.

Kui nihutada plokke L ja M (joon. 69 *a*), vähendades nurka kumminööri külge seotud niitide vahel, siis märkame, et kumminöör venib ikka enam ja enam välja.

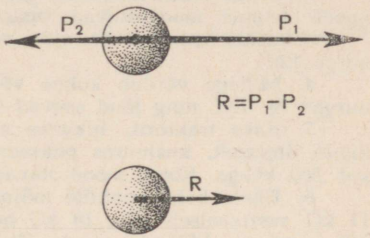
Suurendades nurka niitide vahel venib ka kumminöör vähem välja.

Järelikult, mida väiksem on nurk kehale mõjuva kahe jõu vahel, seda suurem on resultantjõud, ja ümberpöördult.

Kui nurk on 0° või 180°, siis komponentjõud mõjuvad ühel sirgel.



Joon. 70. Kahe ühel sirgel mõjuva samasuunalise jõu resultant.



Joon. 71. Kahe ühel sirgel mõjuva erisuunalise jõu resultant.

Esimesel juhul mõlemad jõud P_1 ja P_2 mõjuvad ühes suunas (joon. 70). Resultantjõud R on võrdne nende summaga:

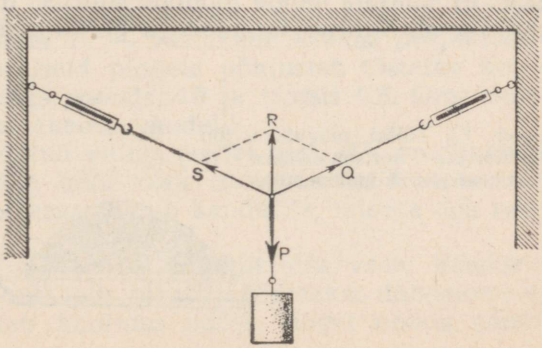
$R = P_1 + P_2$.

Teisel juhul on resultantjõud võrdne jõudude vahega (joon. 71):

$R = P_1 - P_2$.

Mistahes hulka piki üht sirget suunatud jõude võime paarikaupa liitmise teel taandada kaheks jõuks, mis on mõlemad kas ühesuunalised või erisuunalised; kahe jõu resultanti on aga kerge leida.

Resultantjõuga võrdset, kuid temaga vastassuunalist jõudu nimetatakse tasakaalustavaks jõuks.



Joon. 72. Jõudude Q ja S resultantjõud R ja tasakaalustav jõud P.

Joonisel 72 on jõudude Q ja S resultantjõuks R, tasakaalustavaks jõuks aga P.

Kui kehale mõjuvad jõud on tasakaalustatud kehale rakendatud tasakaalustava jõuga, siis keha on kas paigal, või kui ta pannakse mingi kiirusega liikuma, siis ta liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt.

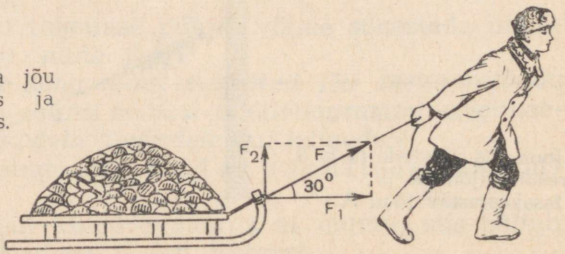
Harjutus 26.

1. Leida konstrueerimise teel jõudude 10 kG ja 6 kG resultantjõud, kui nende suundade vahel on nurk 60°.
2. Leida konstrueerimise teel jõudude 9 kG ja 12 kG resultantjõud, kui nende suunad moodustavad omavahel täisnurga.
3. Leida kahe võrdse jõu resultantjõud, kui nad moodustavad omavahel nurga 120°.
4. Millega võrdub kolme võrdse jõu resultantjõud, kui jõududevahelised nurgad on 120° ning jõud asuvad ühes tasapinnas?
5. Kaks traktorit, liikudes mööda kanali kaldaid, veavad praami. Praam liigub ühtlaselt, kusjuures pukseerivate köite pinged on ühesuurused ja võrdsed 200 kG-ga. Köied moodustavad nurga 45°. Määrata vee takistusjõud.
6. Ühele keha punktile mõjuvad järgmised jõud: 17 kG vertikaalselt üles, 11 kG vertikaalselt alla, 18 kG horisontaalselt paremale ja 10 kG horisontaalselt vasakule. Määrata nende jõudude resultantjõud.

41. Jõu lahutamine kaheks komponendiks, mis mõjuvad teineteise suhtes mingi nurga all. Parallelogrammi reegel võimaldab asendada kaks teineteisega mingi nurga all mõjuvat jõudu ühega. Sama reeglit kasutades võime teostada ka ümberpööratud operatsiooni — asendada ühe jõu kahe teineteise suhtes mingi nurga all mõjuva jõuga (komponentjõududega).

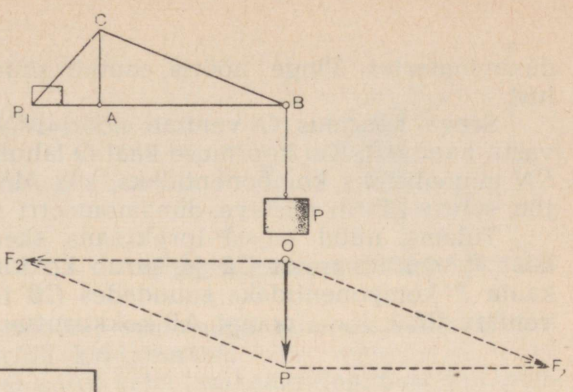
Ühe jõu asendamist kahe teineteisega mingi nurga all mõjuva jõuga, mis koos avaldavad sama mõju mis üks jõud, nimetatakse jõu lahutamiseks.

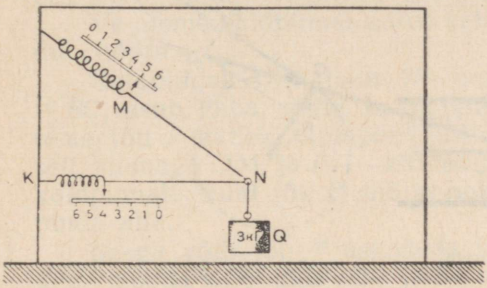
Poiss veab kelku, pingutades nööri, mis moodustab horisontaaltasapinnaga nurga 30° (joon. 73). Kelk liigub horisontaalselt, s. t. ei liigu rakendatud jõu suunas. Kelgule tema liikumise suunas mõjuva jõu suuruse kindlaksmääramiseks lahutame nööri pingutava jõu kaheks komponentjõuks. Ühe komponentjõu suunaks võtame kelgu liikumise suuna, teise suunaks — ristsuuna liikumisele. Et määrata nende jõudude suurusi, tõmbame vektori F otsast meie poolt valitud suundadega paralleelsed sirged. Saadud paral-

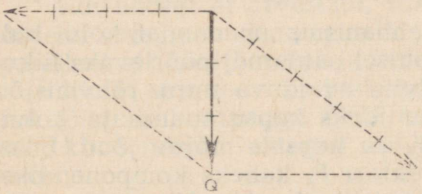


Joon. 73. Nööri pingutava jõu lahutamine horisontaalseks ja vertikaalseks komponendiks.

Joon. 74. Tornkraana ülemise osa skeem.







Joon. 75. Tornkraana ülemise osa mudel.

lelogrammi küljed F_1 ja F_2 kujutavadki endast otsitavaid komponentjõude. Neist ainult jõud F_1, mis on suunatud horisontaalselt, hoiab alal kelgu liikumist. Jõudude F_1 ja F_2 koosmõju on samaväärne jõu F mõjuga.

Vaatleme veel mõnda näidet.

Leheküljel 9 on tornkraana pilt. Joonis 74 annab tornkraana ülemise osa skeemi: *AB* — kraana poom, *CB* — seda ülalhoidev tross, *P* — tõstetav koorem, P_1 — vastukaal. Kraana projekteerimisel on vaja teada, milliseid pingeid põhjustab tõstetav koormus kraana osades, näiteks poomis *AB* ja trossis *CB*. Oma uurimised teostame selle kraanaosa mudelil.

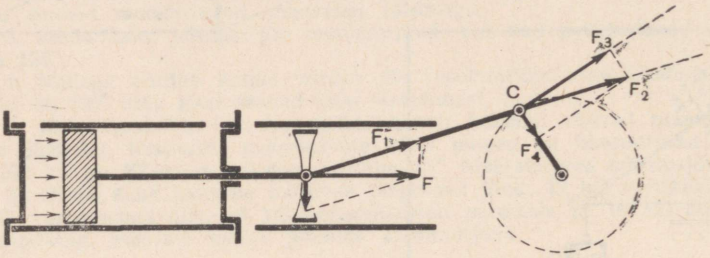
Joonisel 75 on kujutatud selline mudel. Siin *MN* on dünamomeetri külge seotud nöör, mille otsa on riputatud koormus *Q*, *KN* — varras, mis ühe otsaga toetub kandurile, teisega aga nöörile *MN*.

Rippuv koormus surub varda vasakut otsa vastu kandurit. Vardale mõjuvat jõudu, mis teda surub, mõõdetakse dünamomeetriga. Samaaegselt venitab koormus nööri. Pinget nööris näitab

dünamomeeter. Pinge nööris osutub suuremaks koormuse kaalust.

Seega koormus Q venitab nööri MN ja surub varrast KN vastu kandurit. Kui koormuse kaal Q lahutada nööri MN ja varda KN suunalisteks komponentideks, siis MN-suunalise komponentjõu suurus ühtib vastava dünamomeetri näiduga.

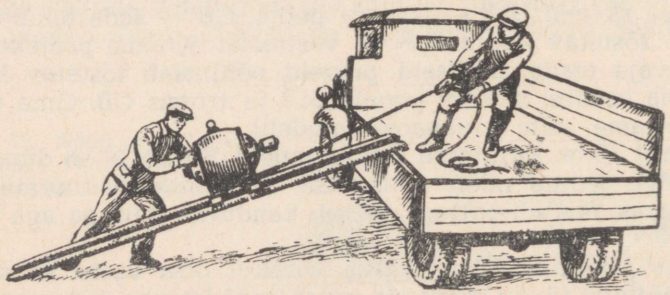
Tuleme nüüd tagasi tornkraana skeemi juurde. Koormuse kaal P venitab trossi CB ja surub kokku poomi AB. Lahutame kaalu P komponentideks suundades CB ja BA. F_1 on trossi CB venitav jõud, F_2 — poomi AB kokkusuruv jõud.



Joon. 76. Väntvõll-mehhanismi skeem.

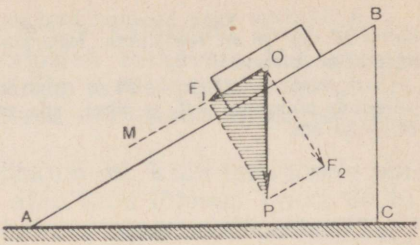
Joonisel 76 on toodud väntmehhanism, mis muudab kolvi kulgeva liikumise hooratta (pole joonisel näidatud) pöörlevaks liikumiseks. F on antud asendis kolvile avalduva auru rõhumisjõu vektor. Lahutame selle komponentideks kepsu suunas ja kolvivarrega ristsuunas. Komponent F_1 on kepsule mõjuv jõud. Edasi lahutame vektoriga F_1 võrdse vektori F_2 kaheks komponendiks: F_3, mis on ringile (seda ringi mööda liigub väntvõlli tapp) punktis C tõmmatud puutuja suunaline, ja F_4, mis on puutujaga risti. Antud asendis pöörab väntvõlli komponent F_3.

42 a. Keha tasakaalu tingimused kaldpinnal. Kaldpinda kasutatakse praktikas sagedasti raskete koormate peale- ja mahalaadimisel, näiteks autodelt (joon. 77), raudteevagunitest jm. Tihti



Joon. 77. Kaldpinna kasutamine laadimisel.

Joon. 78. Kaldpinnal asetsev keha.



kasutatakse neid ehitustöödel; vastumäge minevat lühikest teeosa võib samuti vaadelda kaldpinnana.

Vaatleme kaldpinnal asuva keha tasakaalu tingimusi, kui puudub hõõre.

Kaldpinnal ABC (joon. 78), mille pikkus $l = AB$, kõrgus $h = BC$, asub keha, mille kaalu kujutab joonisel vektor P. Lahutame jõu P kaheks komponendiks: F_1 — kaldpinnaga paralleelselt, suunaga OM, ja F_2 — kaldpinnaga risti. Jõuga F_2 rõhub keha kaldpinnale, kuid jõu F_1 mõjul hakkab keha liikuma mööda kaldpinda alla.

Seega võib jõu P asendada kahe jõuga: jõuga F_1, mis viib keha mööda kaldpinda alla, ja F_2, mis surub teda vastu kaldpinda.

Kui hõõret ei arvestata, siis on keha kaldpinnal paigalhoidmiseks vaja rakendada temale jõudu, mis on suunatud ülespoole paralleelselt kaldpinnaga ja mille suurus on võrdne jõuga F_1.

Jõu F_1 suuruse võib leida kolmnurga ABC ja joonisel viirutatud jõudude kolmnurga F_1OP sarnasusest. Kolmnurgad on sarnased, kuna nende vastavad nurgad on võrdsed. Seepärast kehtib seos:

$$\frac{OF_1}{OP} = \frac{BC}{AB} \text{ ehk } \frac{F_1}{P} = \frac{h}{l}, \text{ millest } F_1 = P\frac{h}{l}.$$

Jõud, mis paneb keha liikuma mööda kaldpinda alla, on nii mitu korda väiksem keha kaalust, kui mitu korda kaldpinna kõrgus on väiksem tema pikkusest.

Samade kolmnurkade sarnasusest leiame jõu, millega keha rõhub kaldpinnale:

$$F_2 = P \cdot \frac{AC}{AB}.$$

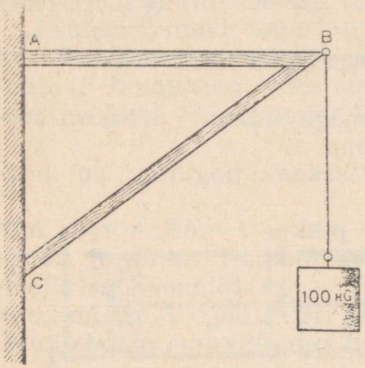
Jõud, millega keha rõhub kaldpinnale, on nii mitu korda väiksem keha kaalust, kui mitu korda kaldpinna alus on väiksem kaldpinna pikkusest.

Harjutus 27.

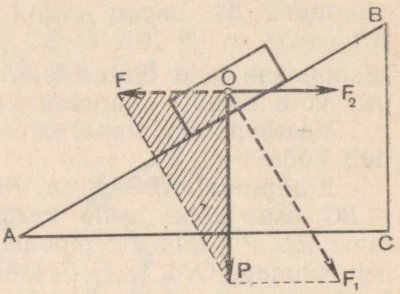
1. Kaldpinna pikkus on 4 m, kõrgus 1 m. Määrata jõud, mida on vaja 100 kG raskuse koorma tasakaalus hoidmiseks kaldpinnal. Hõõret ei arvestata. Millega on võrdne hõõrde olemasolu korral hõõrdejõud, kui keha ei libise mööda kaldpinda alla?

2. Hobune veab koormat kaaluga 800 kG mööda kallakut üles, mille tõus on 1 m iga 16 m tee kohta. Määrata tõmbejõud, arvestamata rataste hõõrdumist vastu pinnast.

3. Kronsteinil (joon. 78 *a*) ripub koorem kaaluga 100 kG. Määrata jõud, mis pingutab põikpuud *AB*, ja jõud, mis surub kokku kaldtuge *BC*; $AB = 64$ cm ja $BC = 80$ cm.



Joon. 78 *a*. Ülesande 3 juurde.



Joon. 79. Jõudude lahutamine kaldpinnal.

42 b. Kaldpinna alusega paralleelselt mõjuv jõud. Keha võib hoida kaldpinnal tasakaalus ka näiteks kaldpinna alusega paralleelselt suunatud jõuga. Selle jõu suuruse leidmiseks lahutame keha kaalu P komponentideks: F on paralleelne alusega AC ja F_1 — risti kaldpinnaga AB (joon. 79).

Komponent F_1 ainult surub keha vastu kaldpinda ega saa esile kutsuda liikumist. Jõu F tasakaalustame temaga võrdse, kuid vastassuunalise jõuga F_2, mis mõjub samal sirgel kui jõud F.

Kolmnurkade FOP ja ABC sarnasusest järgneb, et

$$\frac{F}{P} = \frac{BC}{AC};\ F = P \cdot \frac{BC}{AC}.$$

Kuid $F = F_2$, seega ka $F_2 = P \cdot \frac{BC}{AC}$.

Järelikult, kui ei arvestata hõõret, siis kaldpinna alusega paralleelselt rakendatud jõud, mis hoiab keha kaldpinnal tasakaalus, on nii mitu korda väiksem keha kaalust, kui mitu korda kaldpinna kõrgus on väiksem alusest.

Sarnastest kolmnurkadest järeldub, et $\frac{F}{F_1} = \frac{BC}{AB}$, s. t. *tasakaalu korral on kaldpinna alusega paralleelselt mõjuv jõud nii mitu korda väiksem kaldpinnaga risti mõjuvast jõust, kui mitu korda kaldpinna kõrgus on väiksem ta pikkusest.*

Äsjakäsitletud tasakaalutingimust rakendatakse laialdaselt tehnikas ja igapäevases elus kruvi ja kiilu juures.

42 c. Kiil. Kiil kujutab endast erilist kaldpinda, mida kasutatakse laialdaselt. Kiil näiteks moodustab torkavate, lõikavate ja hööveldavate tööriistade, nagu kääride, kirve, peitli, höövli, adra, saha jt. põhilise osa. Mõnede loetletud tööriistade töötamise skeemid on kujutatud joonisel 80.

Vaatleme kiilu mõju puude lõhkumisel. Kiilu tagumisele pinnale (silmale) mõjub jõud P, mis ajab kiilu lõhesse (joon. 80 *a*).

Jõu, millega kiil mõjub puuhalule, leiame, lahutades jõu P kiilu põskedega (külgedega) ristiolevateks komponentideks F ja F.

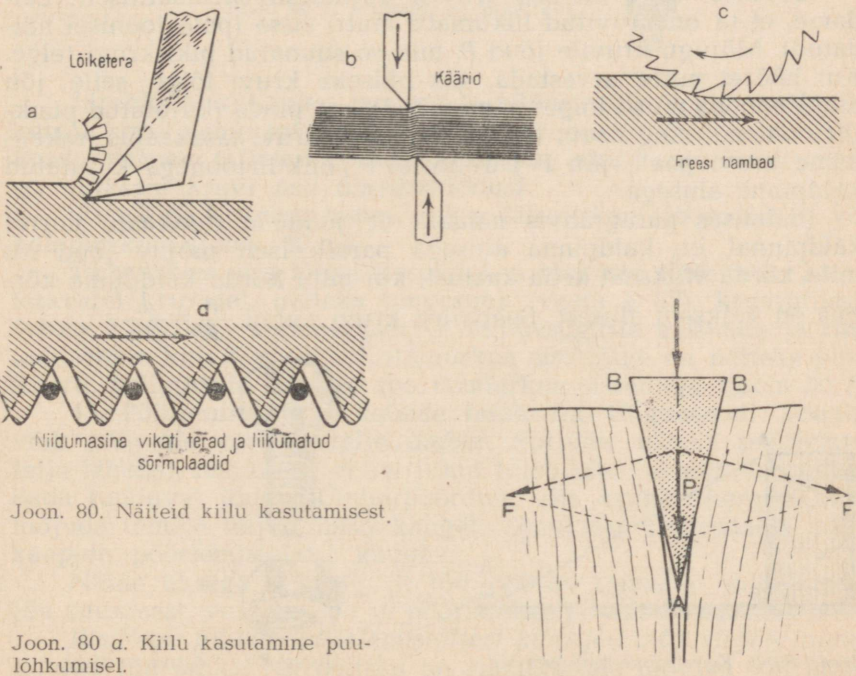
Kumbki neist komponentidest on võrdne ja vastassuunaline selle jõuga (ei ole joonisel kujutatud), millega lõhutav puuhalg mõjub kiilule. Kui poleks rakendatud jõudu P, siis hõõrde puudumisel oleks kiil puuhalust välja tõugatud.

Kahe võrdhaarse kolmnurga sarnasusest järgneb:

$$\frac{F}{P} = \frac{AB}{BB_1},$$

kus AB on kiilu põse pikkus ja BB_1 — kiilu silma laius.

Seega, arvestamata hõõret, on kiil tasakaalus, kui kiilu silmale risti mõjuv jõud on nii mitu korda väiksem kiilu põsele mõjuvast jõust, kui mitu korda silma laius on väiksem põse pikkusest.



Joon. 80. Näiteid kiilu kasutamisest.

Joon. 80 *a*. Kiilu kasutamine puulõhkumisel.

Kuid paljudel juhtudel on rõhumisjõud kiilu põsele küllalt suur, seega ka seda põske pidi mõjuv hõõrdejõud on tunduv. See võib mitmekordselt ületada kiilu silmale risti mõjuva jõu suuruse.

Kui näiteks lüüa puuhalgu väikese teritusnurgaga kirves, siis jääb kirves pärast lööki halgu kinni ja on vaja tugevat jõupingutust, et teda sealt välja kiskuda.

Mõnede kiilu teritusnurkade puhul ei suuda kiilu põsele mõjuvad jõud teda lõhest välja tõugata. Sellel põhineb kiilu kasutamine mitmesuguste osade kinnitamisel.

42 d. Kruvi. Kruvi kujutab endast silindrilist sisselõikega keha. Sisselõige tehakse mööda k r u v i j o o n t.

Vaatleme lihtsat kruvijoone saamise viisi.

Võtame silindri, mille kõrgus on h ja raadius r (joon. 80 *b*). Lõikame paberist välja täisnurkse kolmnurga, mille kõrgus $AB = h$, alus $BC = 2\pi r$ — see on silindri ümbermõõdu pikkus. Selle kolmnurga mähkimisel silindrile moodustab hüpotenuus AC silindri pinnal ühe kruvijoone keeru.

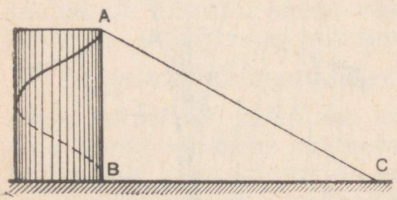
Kruvi kasutatakse koos mutriga (joon. 80 *c*), millel on samasugune sisselõige kui kruvilgi.

Kui kruvi pöörata mutris üks kord, siis, nagu näha jooniselt, tõuseb või laskub ta kõrgus AB võrra, mis on võrdne k r u v i s a m m u g a h.

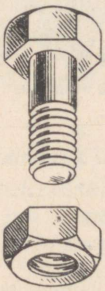
Vaatleme jõudude tasakaalu tingimusi kruvil.

Joonisel 80 *d* on osa kruvist kujutatud skemaatiliselt. Eeldame, et ta on kruvitud liikumatu mutri sisse (pole joonisel näidatud). Mõjugu kruvile jõud P, mis on suunatud piki kruvi telge. Kui hõõret mitte arvestada, siis libiseks kruvi lõige selle jõu mõjul mööda mutri lõiget nagu mööda kaldpinda (kujutatud punktiirjoonena), ning kruvi laskub. Et hoida kruvi tasakaalus, rakendame kruvi peale jõu F paralleelselt punktiirjoonega kujutatud kaldpinna alusega.

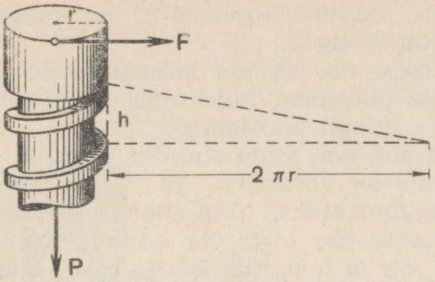
Eelmises paragrahvis näidati, et jõudude tasakaalu korral kaldpinnal on kaldpinna alusega paralleelselt mõjuv jõud nii mitu korda väiksem keha kaalust, kui mitu korda kaldpinna kõrgus on väiksem alusest. Seepärast kruvi puhul $\frac{F}{P} = \frac{h}{2\pi r}$.



Joon. 80 *b*. Kruvijoone kujunemine.

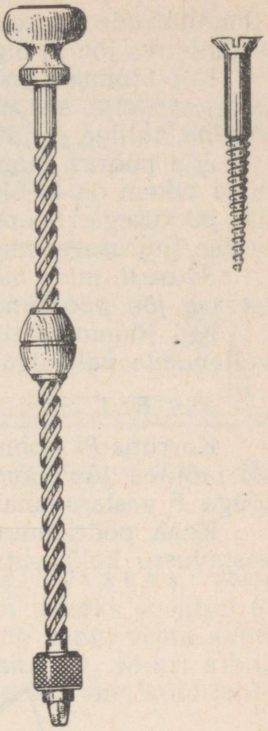


Joon. 80 *c*. Kruvi mutriga.



Joon. 80 *d*. Kruvile mõjuvate jõudude tasakaalu tingimuse määramise juurde.

Joon. 80 *e*. Kolmnurkne vint.



Joon. 80 *f*. Trillpuur ja puukruvi.

Järelikult, kui mitte arvestada hõõret, siis kruvi tasakaalu korral *kruvi peale rakendatud puutujasuunaline jõud on nii mitu korda väiksem teljele mõjuvast jõust, kui mitu korda kruvi samm on väiksem kruvi pea ümbermõõdust.*

Sisselõige kruvisse tehakse kas täisnurkne (joon. 80 *d*) või kolmnurkne (joon. 80 *e*).

Täisnurkset sisselõiget kasutatakse raskuste tõstmiseks kasutatavatel kruvidel, näiteks tungrauas (vaata § 67), kruvipressis (vaata § 68), aga kolmnurkset — mitmesuguste masinate ja riistade osade kinnitamiseks. Kolmnurkne sisselõige on näiteks puukruvil, trillpuurile tehakse aga täisnurkne sisselõige (joon. 80 *f*).

43. Pöörlemisteljega kehade tasakaalu tingimused. Toauks võib pöörelda vertikaaltelje ümber. Surudes uksele pöörlemistelje lähedal, märkame, et sel juhul tuleb ukse avamiseks rakendada tunduvat jõudu. Ümberpöördult, uks avaneb kergesti, kui mõjuda temale teljest hästi kaugel. Seepärast kinnitatakse ukse käepide pöörlemisteljest kaugele.

Näide uksega selgitab, et jõu pöörav toime ei sõltu ainult jõu suurusest, vaid ka jõu ja pöörlemistelje vahelisest kaugusest.

Ristlõigu pikkust pöörlemisteljest kuni jõu mõjusirgeni nimetatakse jõu õlaks. Nii näiteks on rihmarattale mõjuva jõu õlaks

rihmülekande juures rihmaratta raadius. Joonisel 81 on kangile *AB* mõjuva jõu F_1 õlg l_1, kuid jõu F_2 õlg l_2.

Kui tõmmata ust käepidemest nii, et jõu mõjusirge läbiks pöörlemistelje, siis uks ei hakka pöörlema. Sel korral on jõu õlg võrdne nulliga ja jõud ei tekita mingit pöörlemist.

Jõu pöörav toime on seda suurem, mida suurem on jõud ja mida pikem on ta õlg. See toime on võrdeline jõu suuruse ja ta õla pikkusega. Seepärast iseloomustatakse jõu pööravat toimet erilise suurusega, mida mõõdetakse jõu ja ta õla korrutisega.

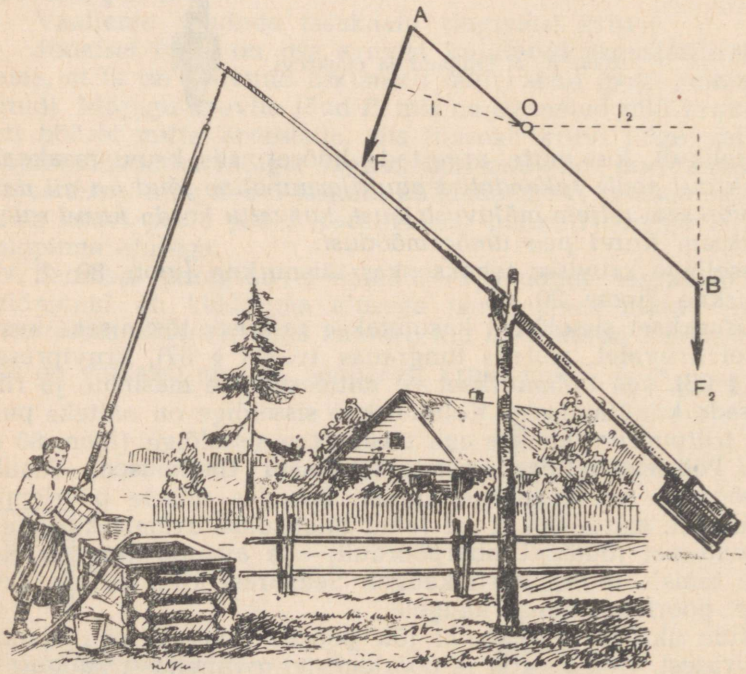
Suurust, mida mõõdetakse jõu ja tema õla korrutisega, nimetatakse jõu pöördemomendiks ehk lihtsalt jõumomendiks.

Kui jõumomenti tähistada tähega *M*, siis võib eelneva lause väljendada valemiga:

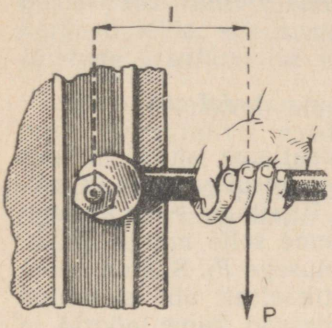
$$M = F \cdot l.$$

Korrutis *Pl* (joon. 81 *a*) on mutrivõtmele mutri kinnikruvimisel mõjuva jõu moment telje *O* suhtes. Kui võtmele rõhuda jõuga *F* vastassuunaliselt jõuga *P*, siis kruvitakse mutter lahti.

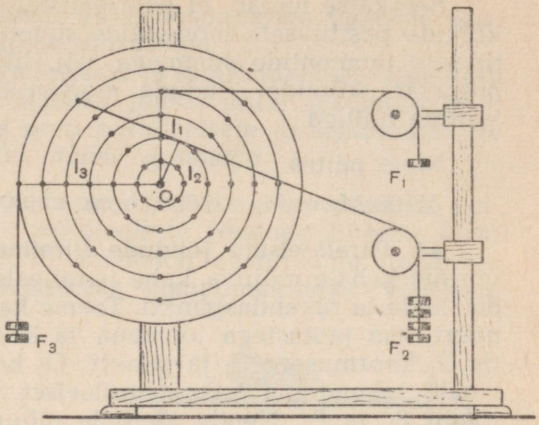
Keha pöörlemissuuna osutamiseks seatakse see pöörlemine vastavusse kellaosuti liikumisega. *Momenti, mis pöörab keha*



Joon. 81. Kangile mõjuvad jõud ja nende õlad.



Joon. 81 *a*. Mutri kinnikruvimine.



Joon. 82. Katseriist momentide reegli kontrollimiseks.

kellaosuti liikumise suunas, loetakse positiivseks, vastu kellaosuti liikumist — negatiivseks. Nii näiteks joonisel 81 on jõu F moment negatiivne, kuna see pöörab kangi vastu kellaosuti liikumist, kuid jõu F_2 moment on positiivne. Mutri kinnikruvimisel on jõu P moment telje O suhtes positiivne, kuid lahtikruvimisel — negatiivne.

Uurime pöörlemisteljega kehade tasakaalu tingimusi. Selleks kasutame joonisel 82 kujutatud ketast. Ketas võib pöörelda tema keskpunkti läbiva telje O ümber.

Et jõudude õlgasid oleks hõlpsam mõõta, on kettale üksteisest võrdsetele kaugustele joonestatud hulk kontsentrilisi ringe. Esimese ringi raadius olgu 1 cm, teise oma 2 cm jne. Ringide diameetrite otstesse on löödud väikesed naelad, millede külge võib riputada koormused. Iga üksiku koormuse kaal on 50 G.

Joonisel 82 kujutatud juhul mõjub kettale kolm jõudu: $F_1 = 50$ G õlaga $l_1 = 4$ cm; $F_2 = 200$ G õlaga $l_2 = 2$ cm; $F_3 = 100$ G õlaga $l_3 = 6$ cm.

Nende jõudude momendid on vastavalt:

$$M_1 = 50\ \text{G} \cdot 4\ \text{cm} = 200\ \text{G} \cdot \text{cm},$$
$$M_2 = 200\ \text{G} \cdot 2\ \text{cm} = 400\ \text{G} \cdot \text{cm},$$
$$M_3 = 100\ \text{G} \cdot 6\ \text{cm} = 600\ \text{G} \cdot \text{cm}.$$

Jooniselt on näha, et jõudude F_1 ja F_2 momendid on positiivsed, jõu F_3 moment aga negatiivne.

Nimetatud jõudude mõjul on ketas tasakaalus.

Positiivsete momentide summa on 600 G · cm ja negatiivne moment on ka 600 G · cm.

See katse näitab, et pöörlemisteljega keha on tasakaalus, kui kõikide positiivsete momentide summa on võrdne kõikide negatiivsete momentide summaga või, lihtsamalt öeldes, kui kehale mõjuvate kõikide jõudude momentide algebraline summa on võrdne nulliga.

Meie näites

$$M_1 + M_2 + M_3 = 200\ \text{G} \cdot \text{cm} + 400\ \text{G} \cdot \text{cm} - 600\ \text{G} \cdot \text{cm} = 0.$$

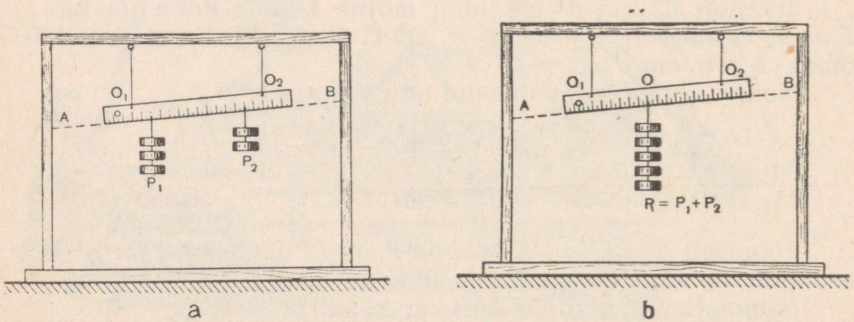
44. Paralleelsete jõudude liitmine. Vaatleme nüüd, millega võrdub kehale mõjuva kahe paralleelse jõu resultantjõud ja kuidas leida ta rakenduspunkti. Teeme katse. Riputame kahe kumminööri otsa jaotustega joonlaua ja koormame selle mingis punktis O_1 koormusega P_1 ja punktis O_2 koormusega P_2. Siis on joonlauale rakendatud kaks paralleelset vertikaalselt alla suunatud jõudu P_1 ja P_2. Nende jõudude mõjul venivad kumminöörid ja joonlaud võtab mingi asendi, näiteks niisuguse, nagu on kujutatud joonisel 83. Märgime joonlaua selle asendi niidiga AB ja võtame koormused ära.

Võtame nüüd koormuse $R = P_1 + P_2$. Joonlaual võib leida niisuguse punkti O, millesse koormuse R riputamisel joonlaud jällegi võtab märgitud asendi AB. Järelikult jõud R kutsub esile samasuguse mõju nagu kaks paralleelset jõudu P_1 ja P_2, s. t. R on nende kahe paralleelse jõu resultantjõud.

Olgu $OO_1 = l_1$ ja $OO_2 = l_2$ (joon. 83). Mõõtes kaugused l_1 ja l_2, leiame, et need on pöördvõrdelised jõududega P_1 ja P_2, see tähendab:

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{P_1}{P_2}.$$

Seega: 1) *kahe paralleelse ja samasuunalise jõu resultant on võrdne komponentide summaga ja on nendega paralleelne ning samasuunaline; 2) kahe paralleelse jõu resultantjõu rakendus-*

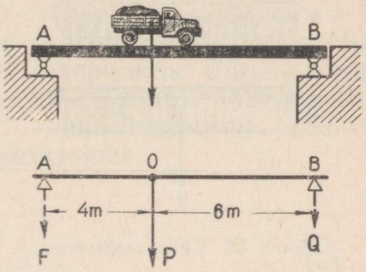


Joon. 83. *a*) Joonlaud kahe jõu P_1 ja P_2 mõju all; *b*) R — jõudude P_1 ja P_2 resultantjõud.

punkt jagab komponentjõudude rakenduspunktide vahelise kauguse pöördvõrdeliselt jõudude suurustega.

Kuna mistahes arvu paralleelseid ja samasuunalisi jõude võib paarikaupa liites taandada kaheks jõuks, mille resultanti võib kergesti leida, siis *mistahes arvu paralleelsete ja samasuunaliste jõudude resultant on võrdne nende summaga.*

44 a. Jõu lahutamine kaheks paralleelseks komponendiks. Eelmises paragrahvis vaadeldi paralleelsete jõudude liitmise küsimust. Paljudel juhtudel tuleb lahendada vastupidine ülesanne: lahutada antud jõud paralleelseteks komponentideks. Vaatleme seda konkreetse näite abil.



Joon. 84. Auto raskusjõu lahutamine komponentideks.

Joonisel 84 on kujutatud sild, millel seisab auto. Rõhugu auto sillale jõuga 3200 kG.

Nõutakse jõudude määramist, mis mõjuvad silla tugedele A ja B, kui silla kaalu ei arvestata.

Kujutame jõudu 3200 kG vektoriga P (vaata alumist joonist). Punkt O on jõu P rakenduspunkt. Ülesanne taandub jõu P lahutamiseks kaheks paralleelseks komponendiks F ja Q; A ja B on nende jõudude rakenduspunktid.

Me teame juba, et kahe paralleelse jõu resultantjõu rakenduspunkt (O) jagab komponentjõudude rakenduspunktide vahelise kauguse osadeks, mis on pöördvõrdelised komponentjõududega, s. t.

$$\frac{F}{Q} = \frac{OB}{OA}.$$

Olgu $OB = 6$ m ja $OA = 4$ m, siis $\frac{F}{Q} = \frac{3}{2}$, millest $F = 1{,}5\ Q$.

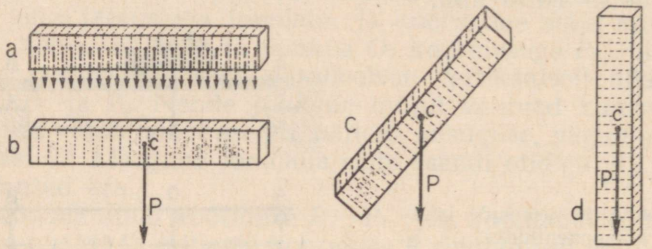
Kuna $P = F + Q$, kuid $P = 3200$ kG, siis võib kirjutada, et $1{,}5\ Q + Q = 3200$, siit $Q = 1280$ kG ja $F = 1920$ kG.

Harjutus 28.

1. 50 cm pikkuse kepi otstesse on rakendatud kaks paralleelset ja samasuunalist jõudu 60 kG ja 40 kG. Leida resultant ja selle rakenduspunkt.
2. 100 cm pikkusele vardale on rakendatud paralleelsed ja samasuunalised jõud: varda vasakule otsale 2 kG, keskele 3 kG ja paremale otsale 9 kG. Leida resultant ja selle rakenduspunkt.

3. Kahele toele *A* ja *B* toetub tala pikkusega 5 m, millele on kinnitatud koorem 4 T. Määrata, arvestamata tala kaalu, millised jõud mõjuvad tugedele, kui koorma ülesriputuspunkti kaugus toest *A* on 2,6 m.

45. Raskuskese. Iga keha võib jaotada suureks arvuks väikesteks osakesteks. Igale niisugusele osakesele mõjub raskusjõud, mis on suunatud vertikaalselt alla. Neid jõude võib lugeda paralleelseteks. Järelikult mõjub igale kehale väga palju paralleelseid jõude, tema osakeste raskusjõude. Kõikide nende raskusjõudude resultant on võrdne kogu keha kaaluga.



Joon. 85. Keha raskuskese.

Kõikidele keha üksikutele osadele mõjuvate raskusjõudude resultantjõu rakenduspunkti nimetatakse keha raskuskeskmeks (raskuspunktiks).

Joonisel 85 *b* on keha raskuskese tähistatud tähega *C*. Järelikult võib öelda, et *raskuskeskmeks* nimetatakse keha raskusjõu rakenduspunkti. Igasugustel keha ümberpaigutustel (joon. 85 *c*, *d*) jääb ta raskuskeskme asend muutumatuks.

Raskuskeskme asukoht võib muutuda ainult keha osade suhtelise asetuse muutumisel.

Kuidas leida mitmesuguste kehade raskuskeskme asukoht?

Vaatleme mõnda lihtsamat juhtu. Me teame juba, et mitme jõu tasakaalustav jõud mõjub piki sama sirget, milles mõjub ka resultant, kuid vastassuunas (§ 40).

Siit järeldub, et *keha raskust tasakaalustav jõud peab olema alati suunatud mööda vertikaaljoont üles.*

Kui riputada keha üles tema mingis punktis (või toetada), siis tasakaalu korral asub ta raskuskese samal vertikaaljoonel, millel on riputuspunkt.

Vaatame, kuidas võib leida ühtlase keha raskuskeskme asukoha.

Ühtlaseks nimetatakse sellist keha, mille mistahes võrdsetel ruumaladel on ühesugune kaal.

Ühes punktis ülesriputatud või toetatud keha tasakaaluks on tarvis, et kehale mõjuvate kõigi raskusjõudude momentide algeb-

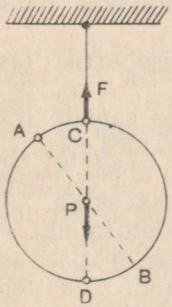
raline summa oleks võrdne nulliga (vaata § 43). Ühtlase keha raskuskese asub tema tsentris. Ühtlasel kettal on raskuskese tema geomeetrilises tsentris.

Kontrollime seda katseliselt. Kinnitame ketta mingisse punkti niidi. Selle niidi otsa riputame ketta. Kettale mõjub kaks jõudu: niidi elastsusjõud F, mis on suunatud vertikaalselt üles (joon. 86), ja ketta kaal P. Kuna ketas on tasakaalus, siis ta raskuskese asub niidi sihi pikendusel. Katse näitab, et see pikendus ühtib ketta diameetriga CD, millel asub jõu P rakenduspunkt.

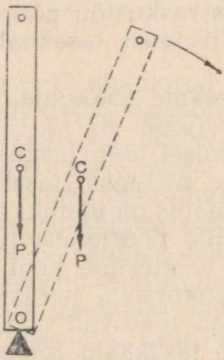
Kui nüüd sama ketas riputada üles mingist teisest punktist A, siis ka sel juhul asub raskuskese ketta diagonaalil AB. Järelikult asub raskuskese kahe diameetri lõikepunktis, s. t. ketta geomeetrilises keskpunktis.

Samuti võib veenduda, et ühtlase õhukese rööpkülikukujulise plaadi raskuskese asub diagonaalide lõikepunktis. Ühtlase rööptahuka raskuskese asub samuti tema diagonaalide lõikepunktis.

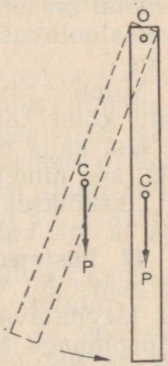
Kasutades ülesriputamise võtet, võime katseliselt määrata mistahes ühtlase lameda keha raskuskeskme.



Joon. 86. Ühtlase ketta raskuskeskme määramine.



Joon. 87 *a*. Joonlaua ebapüsiv tasakaal.

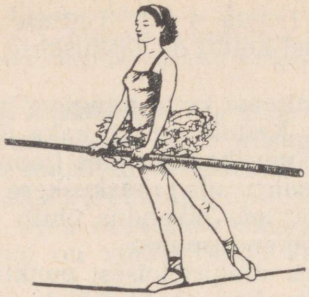


Joon. 87 *b*. Joonlaua püsiv tasakaal.

46. Tasakaalu liigid. Vaatleme, millistel tingimustel on ühest punktist toetatud keha iseenda kaalu mõjul tasakaalus.

Kasutame katse abi. Võtame joonlaua ja toetame seda ühest punktist, nagu on näidatud joonisel 87 *a*. Kui raskusjõu suund (läbi *raskuskeskme* C tõmmatud vertikaaljoon) läbib toetuspunkti O, siis on joonlaud tasakaalus; ta ei pöördu punkti O ümber, sest raskusjõu (kaalu) õlg on võrdne nulliga.

Ei ole kerge hoida joonlauda selles asendis tasakaalus, kuna vähimagi kõrvalekalde juures joonlaua raskuskese langeb ja



Joon. 87 *c*.
Tsirkuse artist hoiab tasakaalu
köiel käies.

raskusjõu moment lakkab olemast null ning joonlaud langeb ümber. Sellist tasakaalu nimetatakse seepärast e b a p ü s i v a k s.

Keha ei saa iseenesest ebapüsivasse tasakaaluasendisse tagasi tulla. Selleks on vaja mõjutamist teise keha poolt.

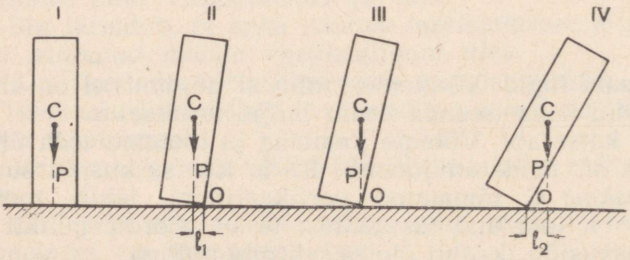
Paneme joonlaua otsas olevasse auku pliiatsi ja, hoides seda horisontaalselt, jätame joonlaua omaette. Joonlaud tuleb tasakaaluolekusse (joon. 87 *b*). Kui joonlaud sellest tasakaaluolekust välja viia, siis joonlaua raskuskese t õ u s e b. Kui nüüd jälle jätta joonlaud omaette, siis raskusjõu pöördemoment toob selle uuesti tasakaaluolekusse. Niisugust tasakaalu liiki nimetatakse p ü s i v a k s.

Muutes raskuskeskme asukohta, hoiab tsirkuse artist tasakaalu köiel käimisel (joon. 87 *c*).

Kui keha nihutamisel jääb raskuskese ühele ja samale tasemele, siis nimetatakse niisugust tasakaalu ü k s k õ i k s e k s.

Ükskõikses tasakaalus on näiteks horisontaalsel alusel asetsev kera ja iga keha, mille pöörlemistelg läbib raskuskeskme.

47. Püsivus. Me vaatlesime kehi, millel on toetuspunkt või pöörlemistelg. Vabrikukorsten, hooned, paljud meie igapäevases elus tarvitatavad asjad toetuvad aga mingile pinnale. Vaatleme toetuspinnaga kehade tasakaalu tingimusi; selleks võtame mingi silindrikujulise keha ja sooritame sellega katse. Niisuguse silindri asendit võime oma äranägemist mööda muuta ja niiviisi katse



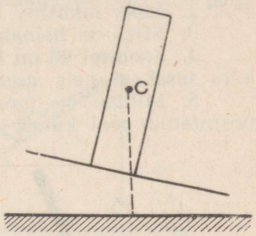
Joon. 88. Silinder erinevates tasakaaluasendites horisontaalsel tasapinnal.

teel uurida selliste kehade tasakaalu tingimusi, mis toetuvad mingile pinnale.

Kallutame pisut niisugust keha, ta tuleb tagasi endisesse asendisse. Kallutades keha ikka enam ja enam, jõuame me selleni, et keha lõpuks langeb ümber ja võtab horisontaalse asendi.

Joonisel 88 on esitatud niisuguse silindri neli asendit.

Asendis I on silinder vertikaalne ja ta on tasakaalus. Silindri raskuskeskmest C tõmmatud vertikaalsirge läbib toetuspinna. Asendis II on silinder pisut kallutatud, raskuskeskmest C tõmmatud vertikaaljoon läbib jällegi toetuspinna. Silindri raskusjõu P moment toetuspunkti O suhtes Pl_1 pöörab silindri tagasi endisesse asendisse.

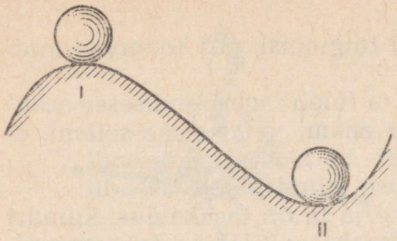


Joon. 89. Silinder kaldpinnal.

Asendis III läbib punktist C tõmmatud vertikaaljoon toetuspunkti — silinder on ebapüsivas tasakaalus. Lõpuks, asendis IV punktist C tõmmatud vertikaaljoon langeb toetuspinnast väljapoole ja moment Pl_2 tõmbab silindri ümber. Selle asemel et kallutada silindrit, me oleksime võinud kallutada alust (joon. 89) ja veenduda, et seni, kuni raskuskeskmest tõmmatud vertikaalsirge läbib toetuspinna, ei lange keha ümber, vaid püsib.

Et lükata ümber vertikaalselt seisvat keha, näiteks kappi, on küllalt, kui viia ta ebapüsiva tasakaalu olekusse; seejuures tõuseb ta raskuskese pisut kõrgemale. Kuid selleks, et viia sama keha horisontaalsest asendist vertikaalsesse (ühest püsiva tasakaalu olekust teise), tuleb ta raskuskeset tõsta suurele kõrgusele, seepärast on niisuguse keha horisontaalne asend püsivam kui vertikaalne.

Mida kõrgemal on keha raskuskese ja väiksem toetuspind, seda väiksem on ta püsivus. Seepärast tuleb suuremaks püsivuseks kas suurendada toetuspinda või viia raskuskese madalamale, kasutades rasket alust, või üht ja teist koos. Nii näiteks riputatakse kooli kangkaal suure toetuspinnaga statiivile; kõrgel koolistatiivil on küllalt suure toetuspinnaga raske malmalus; fotografeerimisel asetatakse fotoaparaat alusele, mille jalgu võib viia laiemale. Mida laiemale viia fotoaparaadi aluse jalad, seda püsivam ta on. Samal põhjusel piiravad kõrgepingeliini kõrge masti tugijalad suurema pindala kui madalama masti jalad; vabrikukorstna alumine läbimõõt on tunduvalt suurem ülemisest.



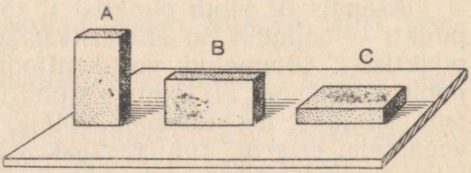
Joon. 90.
Ülesande 4 juurde.

Joon. 91.
Ülesande 5 juurde.

Harjutus 29.

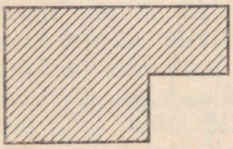
1. Miks on kaht ämbrit vett mugavam kanda kui üht?
2. Miks inimene, kes kannab koormat turjal, on kallutatud ettepoole?
3. Miks on heinakoorem vähem püsiv kui tühi vanker?
4. Joonisel 90 on kujutatud ühtlane kera kahes tasakaaluasendis. Milline on kera tasakaal neis asendeis ja miks?
5. Milline on joonisel 91 kujutatud asendites mitteühtlase kera tasakaal (viirutatud pool kerast on valmistatud tihedamast ainest)?

Joon. 92.
Ülesande 6 juurde.

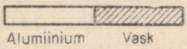


Joon. 93.
Ülesande 7 juurde.

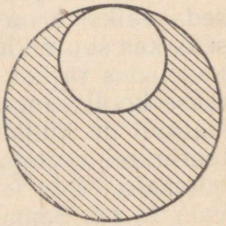
6. Millises tasakaaluasendis on joonisel 92 kujutatud pliiats? Miks?
7. Milline joonisel 93 kujutatud tellise asend on kõige püsivam? Kõige ebapüsivam? Miks?
8. Kaks kera kaaluga 5 kG ja 2 kG on kinnitatud 60 cm pikkuse ja 1 kG raskuse varda otstesse. Suurema kera raadius on 4 cm, väiksemal 2 cm. Leida süsteemi raskuskese.



Joon. 94.
Ülesande 9 juurde.



Joon. 95.
Ülesande 10 juurde.



Joon. 96.
Ülesande 11 juurde.

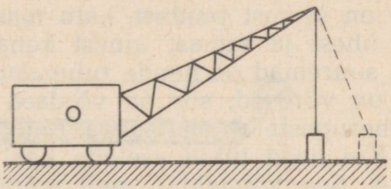
9. Leida konstrueerimise teel joonisel 94 näidatud kujuga ühtlase plaadi raskuskese. Plaadi paksus on igal pool ühesugune.

10. Alumiinium- $\left(d = 2{,}7\frac{G}{cm^3}\right)$ ja vaskplaat $\left(d = 8{,}9\frac{G}{cm^3}\right)$ on kinnitatud nii, nagu on näidatud joonisel 95. Plaatide mõõtmed on ühesugused. Leida raskuskese.

11. Ühtlasesse kettasse raadiusega R lõigata ava raadiusega $\frac{R}{2}$, nagu on kujutatud joonisel 96. Leida järelejäänud kettaosa raskuskese.

12. Kangi pikemale õlale on riputatud koorem 2 kG, lühemale õlale 3 kG. Nende jõudude mõjul on kang tasakaalus. Kas kaob tasakaal, kui kummalegi õlale riputada täiendavalt 1 kG?

13. Kaalukangi õlad on 19,8 cm ja 20 cm. Kaalud on tasakaalus, kuna kaalukausid ei ole üheraskused. Pikemal õlal rippuvale kaalukausile asetatud keha tasakaalustamiseks oli vaja teisele kaalukausile asetada 85 G. Kui palju kaalub keha?



Joon. 97. Ülesande 17 juurde.

14. Tõkkepuu pikkus on 7,8 m ja ta kaal 210 kG. Raskuskese asub 1,2 m kaugusel vasakust otsast. Pöörlemistelg on 6,3 m kaugusel parempoolsest otsast. Millise jõuga tuleb mõjuda parempoolsele otsale, et tõkkepuud alla lasta?

15. Teerulli kaal on 2 T, raadius 50 cm. Määrata horisontaalne tõmbejõud, mis on vajalik, et tõmmata rulli üle 5 cm kõrguse kivi.

16. Uks, mille kõrgus on 2 m, laius 1 m ja kaal 32 kG, on kinnitatud kahe hingega, milledest üks asub ülemisest ja teine alumisest ukseäärest 20 cm kaugusel. Millise jõuga tõmbab uks ülemist hinge horisontaalsuunas?

17. Joonisel 97 on koormat tõstev kraana kujutatud kahes asendis. O — kraana raskuskese. Tõstmisel tekib kraana ümberminemise oht. Miks? Millisel koorma asendil on see oht suurem? Miks? Millal on see oht suurem, kas sujuval tõstmisel või rebimisel, ja miks?

IV PEATÜKK.

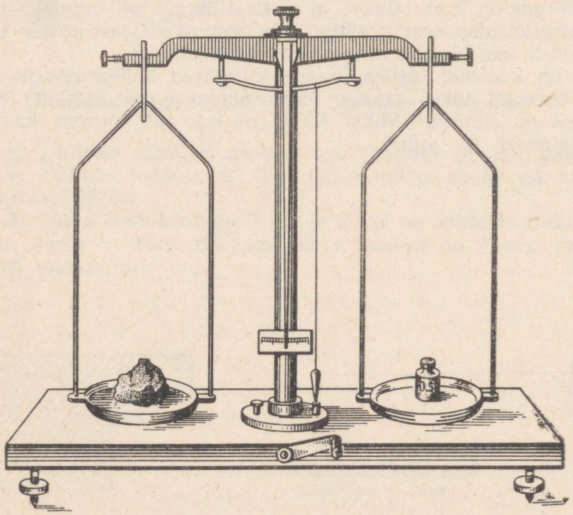
JÕUD, MASS JA KIIRENDUS.

48. Mass. Maa tõmbab külge iga keha. Jõudu, millega Maa tõmbab keha, nimetatakse keha kaaluks. Keha kaalu mõistega on tihedalt seotud teine, palju üldisem mõiste — keha m a s s.

Keha massiks nimetatakse selles kehas sisalduvat aine hulka.

Liitri vee mass on 1000 korda suurem 1 cm^3 vee massist. Palgi mass on samast puidust halu massist mitu korda suurem. Lühidalt, ühest ja samast ainest kehade massid on seda suuremad, mida suuremad on nende ruumalad. Kui niisuguste kehade ruumalad on võrdsed, siis on võrdsed ka nende massid. Nii näiteks on ühesuguste ruumaladega rauatükkide massid omavahel võrdsed. Kui need tükid asetada kaalukaussidele, siis kaal on tasakaalus. See võimaldab meil mõõta kehade masse kaalumisega.

Kahe keha massid on võrdsed, kui Maa tõmbab neid kehi ühel ja samal kohal ühesuguselt, s. t. kui nad kangkaalu kaussidel teineteist tasakaalustavad. Seejuures on täiesti ükskõik, millisest ainest need kehad koosnevad. Kui nendest ühe keha mass võtta



Joon. 98. Keha massi mõõtmine.

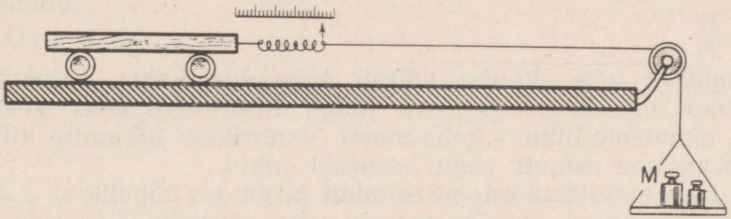
ühikuks, siis ka teise keha mass, mida esimene keha tasakaalustab, on võrdne massiühikuga.

Massiühikuks on võetud plaatinasilindri mass, mida säilitatakse Sèvres'is (Pariisi lähedal). Seda massi nimetatakse **kilogrammiks.** Erinevalt jõuühikust, mida tähistatakse kG, tähistatakse massiühikut lühendatult kg.

Füüsikas on massiühikuks võetud 0,001 kg. Seda ühikut nimetatakse grammiks (lühend g).

Praktikas valmistatakse massiühikud mitmesuguse suurusega vihtide kujul.

Et mõõta keha massi, on vaja asetada ühele kaalukausile see keha, teisele aga vihid. Kaalu tasakaalu korral on keha mass võrdne vihtide massiga. Joonisel 98 on kujutatud keha, mille mass on 0,5 kg.



Joon. 99. Katseriist kiirenduse ja kehale mõjuva jõu sõltuvuse uurimiseks.

49. Newtoni teine seadus. Newtoni teises seaduses püstitatakse seos kehale mõjuva jõu, selle keha massi ja ta liikumise kiirenduse vahel.

Alguses vaatleme, kuidas ühe ja sama keha kiirendus sõltub kehale mõjuvast jõust. Teeme järgmise katse (joon. 99). Vankrikesele, mis võib (väikese hõõrdega) liikuda mööda lauda, on kinnitatud dünamomeeter. Dünamomeetri teise otsa külge on kinnitatud üle ploki pandud niit, mille otsas ripub koormus *M*. Dünamomeetri näidu järgi võime määrata vankrikesele mõjuva jõu. Tilgutajat kasutades märgime vankrikese poolt mitmesuguseil ajavahemikel jääva jõu mõjul toimuval ühtlaselt kiireneval liikumisel läbitud teed. Mõõtmised näitavad, et need teed on võrdelised aegade ruutudega. Seega, *liikumine jääva jõu mõjul on ühtlaselt kiirenev liikumine.*

Mõõtes vankrikese poolt mingil ajavahemikul t läbitud tee, määrame valemi $s = \frac{at^2}{2}$ abil kiirenduse a.

Riputame niidi otsa mitmesuguseid koormusi, mõõtes dünamomeetriga iga kord jõu ja arvutades sellele jõule vastava vankrikese kiirenduse.

Niisuguste mõõtmiste ja arvutuste tulemusi peegeldab järgmine tabel:

Jõud	Kiirendus
F	a
$1{,}5\ F$	$1{,}5\ a$
$2{,}0\ F$	$2{,}0\ a$
$2{,}5\ F$	$2{,}5\ a$
$3{,}0\ F$	$3{,}0\ a$

Tabelist on näha, et jõu suurenemisel 1,5 korda suureneb kiirendus ka 1,5 korda; kui jõud suureneb 2 korda, siis suureneb kiirendus 2 korda jne., s. t. *vankrikese kiirendus on võrdeline vankrikesele mõjuva jõuga.*

Matemaatiliselt võib seda üles kirjutada valemi kujul:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{F_1}{F_2}. \qquad (1)$$

Et kindlaks teha, kuidas sõltub kiirendus keha massist, mõjume vankrikesele mingi jääva jõuga. Koormates vankrikest vihtidega, muudame liikuva keha massi. Vankrikese liikumise kiirendust arvutame samuti nagu esimesel juhul.

Meie katsete tulemused on esitatud järgmises tabelis:

Keha mass	Kiirendus
m	a
$2\ m$	$^1/_2\ a$
$3\ m$	$^1/_3\ a$
$^1/_2\ m$	$2\ a$
$^1/_3\ m$	$3\ a$

Tabeli andmed näitavad, et muutumatu jõu puhul keha massi suurendamisel 2 korda väheneb kiirendus 2 korda ja, vastupidi, keha massi vähendamisel 2 korda suureneb kiirendus 2 korda jne., seega, *koormatud vankrikese kiirendused on pöördvõrdelised ta üldmassiga,* mida võib matemaatiliselt väljendada valemiga:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}. \qquad (2)$$

Katsete tulemused näitavad seega, et **kiirendus, millega keha liigub, on võrdeline kehale mõjuva jõuga ja pöördvõrdeline selle keha massiga.**

Peale selle ühtib kiirendus suuna poolest selle jõuga.

Sellel tulemusel, nagu näitas Newton, on üldine iseloom. Seda seaduspärasust nimetatakse N e w t o n i t e i s e k s s e a d u s e k s.

Newtoni teises seaduses kõneldakse ühe jõu mõjust. Kuid praktiliselt mõjub kehale alati mitu jõudu. Me juba teame, et arvutamise eesmärgil võime mitme jõu toime asendada ühe jõu — resultantjõu toimega. Seepärast juhul, kui kehale mõjub mitu jõudu, mõistame kiirendust esile kutsuva jõu all nende resultantjõudu.

Newtoni teist seadust võib matemaatiliselt väljendada järgmise valemi kujul:

$$a = \frac{F}{m}, \qquad \text{millest } F = ma.$$

Jõu suurus on võrdne keha massi ja kiirenduse korrutisega. Seega võimaldab Newtoni teine seadus arvutada jõu suurust, kui on teada keha mass ja kiirendus, millega ta liigub.

Näiteks võib Newtoni teise seaduse põhjal väljendada keha kaalu P selle keha massi m ja vaba langemise kiirenduse g kaudu:

$$P = mg.$$

Valemite $F = ma$ ja $P = mg$ kõrvutamisest on näha, et

$$\frac{a}{g} = \frac{F}{P},$$

s. t. mingi jõu mõjul on keha liikumise kiirendus nii mitu korda suurem või väiksem vaba langemise kiirendusest, kui mitu korda on mõjuv jõud suurem või väiksem keha kaalust.

Ülesannete lahendamisel ülalesitatud seoste abil peab ühte liiki suurused väljendama ühtedes ja samades ühikutes.

Näide. Kelk koos sõitjaga kaalub 70 kG ja libiseb mäest alla kiirendusega $1\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Määrata kelku liikumapanev jõud.

$P = 70$ kG;
$a = 1\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
$g = 9{,}8\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
$F = ?$

Valemist $\frac{a}{g} = \frac{F}{P}$ määrame F.

$$F = P\,\frac{a}{g};\quad F = 70\ \text{kG}\ \frac{1\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{9{,}8\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \approx 7{,}1\ \text{kG}.$$

Harjutus 30.

1. Vasta valemeid kasutamata: a) millise kiirendusega liigub keha, kui temale mõjuv jõud on 2; 7 ja 14 korda väiksem keha kaalust? b) mitu korda on keha kaal suurem temale mõjuvast jõust, mis annab talle kiirendused

$0{,}98\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$? $0{,}49\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$? $0{,}14\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$?

2. Paigalseisvale vagonetile, mis kaalub 350 kG, mõjuti jõuga 7 kG. Hõõrdetakistus on 2 kG. Määrata: a) millise kiirendusega liigub vagonett? b) esimese 10 sekundiga läbitud tee, c) keskmine kiirus sellel ajavahemikul, d) kiirus kümnenda sekundi lõpul.

50. Mass — keha inertsi mõõt. Newtoni esimene seadus väidab, et iga keha on inertne. Mis on keha inertsi mõõduks? Selgitame seda katsega.

Liikugu mööda horisontaalset teed ühesuguse kiirusega kaks vagunit, üks tühi, teine koormaga. Hakaku mõlemale üheaegselt mõjuma liikumist pidurdavad ühesuurused jõud. Kumb vagun liigub kauem? Katse näitab, et koormatud vagun liigub kauem. Järelikult võib öelda, et tal on ka suurem inerts. Kuid koormatud vaguni mass on tühja vaguni massist suurem; siit järeldub, et *mida suurem on keha mass, seda inertsem ta on.*

See järgneb vahetult ka Newtoni teisest seadusest. Tõepoolest, Newtoni teise seaduse järgi $a = \frac{F}{m}$, s. t. kiirendus on pöördvõrdeline massiga; kuna aga koormatud vaguni mass on suurem tühjast, siis ka ta liikumise kiirendus on väiksem (kiirendus on suunatud liikumise vastu). Järelikult ta liigub kauem.

Seega, **keha mass on ta inertsi mõõduks.**

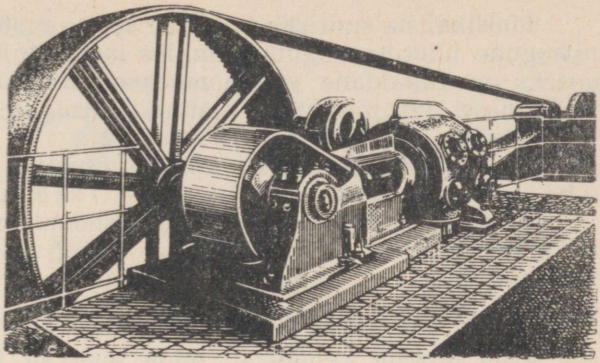
Newtoni teisest seadusest $a = \frac{F}{m}$ järeldub, et iga kuitahes väike jõud võib põhjustada keha kiirenevat liikumist.

Kas sellele ei räägi vastu asjaolu, et me mõnikord tõugates rasket kappi ei suuda seda paigalt nihutada? Hoopiski mitte. Asi on selles, et kapi ja põranda vahel on hõõrdumine ja selleks, et kappi liikuma panna, tuleb meil ületada hõõret; selleks peab jõud, millega tõukame kappi, olema suurem hõõrdejõust; seda ta aga alati ei ole.

Keha kiiruse muutus sõltub keha massist ja jõu mõjumise ajast. Seda on hästi näha järgmise katsega.

Paneme ühele kaalukausile raske plaadi ja tasakaalustame selle vihtidega või mingi teise koormaga. Kui järsku lüüa väikese vasaraga vastu plaati, siis kaal ei lähe tasakaalust välja.

Joon. 100. Alasi mass on tunduvalt suurem vasara massist.



Joon. 101. Masin massiivsel alusel.

Kui kaal koormata väikese massiga, siis juba kõige tühisema löögi mõjul kaob kaalul tasakaal.

Mida suurem on keha mass, seda väiksemat kiiruse muutust põhjustab temale mõjuv jõud. Seda arvestatakse tehnikas. Nii näiteks tehakse tõugetest tekkiva põrumise vältimiseks sillasambad, alused ja alasid massiivsed ja ühendatakse tugevasti maaga. Alasi ja vasara suhtelised mõõtmed on näha joonisel 100. Samal põhjusel ehitatakse tööpingid ja masinad massiivsetena ning püstitatakse need massiivsetele vundamentidele. Joonisel 101 on kujutatud massiivsele alusele ülesseatud masin.

Me tunneme keha massi määramise viisi kangkaalu abil. Newtoni teine seadus annab meile teise viisi massi kui keha inertsi mõõdu määramiseks, nimelt kiirenduse ja jõu suuruse kaudu:

$$m = \frac{F}{a}.$$

Katseliselt on kindlaks tehtud, et need mõlemad keha massi määramise viisid (kaalu ja inertsi järgi) annavad täiesti ühesugused tulemused.

51. Mehhaaniliste ühikute süsteem. Et rakendada valemeid numbrilisteks arvutusteks, on vaja kindlaks teha, millistes ühikutes mõõdetakse füüsikalisi suurusi.

Füüsika seadused seovad teatud sõltuvuste abil füüsikalisi suurusi omavahel. Seepärast on küllaldane valida ainult mõnede suuruste ühikud, ülejäänud suuruste ühikud saadakse vastavate seaduste alusel. Näiteks valemiga $s = vt$ on antud sõltuvus kolme suuruse vahel. Kui me meelevaldselt valime mingi kahe suuruse ühikud, siis kolmanda suuruse ühik määratakse sellest valemist. Lepime näiteks kokku mõõta teed meetrites ja aega sekundites; kiirust peame siis mõõtma ühikutes $\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Füüsikaliste suuruste vaheline seos annab võimaluse koostada niisugune ühikute kogumik, milles mehhaaniliste suuruste mõõtmiseks on küllaldane valida meelevaldselt kolm ühikut: pikkusühik, massi- või jõuühik ja ajaühik. Niisugust ühikute kogumikku nimetatakse ühikute süsteemiks.

Süsteemi meelevaldselt valitud ühikuid nimetatakse põhiühikuteks, kõiki ülejäänuid — tuletatud ühikuteks.

Füüsikas kasutatakse ühikute süsteemi, milles põhiühikuteks on pikkusühikuna 1 cm (sajandik osa rahvusvahelisest meetrist), massiühikuna 1 g (tuhandik osa rahvusvahelisest kilogrammist) ja ajaühikuna 1 s $\left(\frac{1}{86\,400}\right.$ keskmisest päikese ööpäevast, mõõdetud väga täpsete kelladega, mida pidevalt kontrollitakse astronoomide poolt taevavõlvi näiva pöörlemise vaatlemisega[1]).

Seda süsteemi nimetatakse *CGS* ühikute süsteemiks (prantsuskeelsete sõnade *centimètre, gramme, seconde* esimeste tähtede järgi).

Kiirusühikuks selles süsteemis on $1\,\frac{\text{cm}}{\text{s}}\left(v = \frac{s}{t}\right)$, kiirendusühikuks $1\,\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}\left(a = \frac{v}{t}\right)$.

Asetades Newtoni teise seaduse valemisse $F = ma$ m asemele 1 g, a asemele $1\,\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$, saame *CGS*-süsteemi jõuühiku:

$$1\ \text{g} \cdot 1\,\frac{\text{cm}}{\text{s}^2} = 1\,\frac{\text{g} \cdot \text{cm}}{\text{s}^2}.$$

CGS-süsteemi jõuühikuks võetakse niisugune jõud, mille mõjul mass 1 g *liigub kiirendusega* $1\,\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$. *See ühik on düün* (lühendatult dyn).

$$1\ \text{dyn} = \frac{\text{g} \cdot \text{cm}}{\text{s}^2}.$$

Rahvusvahelises mõõtühikute süsteemis (SI), mis kehtestati Nõukogude Liidus alates 1. jaanuarist 1963. a., on mehhaanika põhiühikuteks:

pikkusühik	1 m,
massiühik	1 kg,
ajaühik	1 s.

Jõuühikuks rahvusvahelises süsteemis on niisugune jõud, mille mõjul mass 1 kg *liigub kiirendusega* $1\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Seda ühikut nimetatakse njuutoniks (lühendatult N).

[1] Päikese ööpäev on ajavahemik kahe teineteisele järgneva keskpäeva vahel. Kuna päikese ööpäevade kestus on erinevatel aastaaegadel pisut erinev, siis kasutatakse praktikas keskmist päikese ööpäeva, mille pikkus on võrdne aasta päevade keskmise pikkusega.

Seega $1\ \mathrm{N} = 1\frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$.

Arvutame, mitu düüni on njuutonis.

$$1\ \mathrm{N} = 1\frac{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} = 1\frac{1000\ \mathrm{g} \cdot 100\ \mathrm{cm}}{\mathrm{s}^2} = 100\,000\frac{\mathrm{g} \cdot \mathrm{cm}}{\mathrm{s}^2}$$

ehk $1\ \mathrm{N} = 10^5$ dyn.

Praktikas on laialdaselt levinud nõndanimetatud tehniline ühikute süsteem. Selles süsteemis on põhiühikuteks:

pikkusühik 1 m,
jõuühik 1 kG (või ka 1 kilopond, sest 1 kG = 1 kp),
ajaühik 1 s.

Selles süsteemis on massiühik tuletatud ja selle võib määrata võrdusest $m = \frac{F}{a}$, s. t. *tehnilises ühikute süsteemis on massiühikuks niisugune mass, mis jõu* 1 kG (1 kp) *mõjul liigub kiirendusega* $1\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$.

Selle ühiku lühendatud tähis on m.t.ü. (massi tehniline ühik). Seega

$$1\ \text{m.t.ü.} = \frac{1\ \mathrm{kG}}{1\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}} = 1\frac{\mathrm{kG} \cdot \mathrm{s}^2}{\mathrm{m}}.$$

Mitmesuguste massi- ja jõuühikute vahel kehtivad järgmised seosed:

1 kG on jõud, millega maa tõmbab külge massi 1 kg kiirendusega $g = 980{,}665\frac{\mathrm{cm}}{\mathrm{s}^2}$. Siit

$$1\ \mathrm{kG} = 1000\ \mathrm{g} \cdot 980{,}665\frac{\mathrm{cm}}{\mathrm{s}^2} = 980\,665\ \text{dyn},$$

või ümardatult

$$1\ \mathrm{kG} = 980\,000\ \text{dyn} = 9{,}8 \cdot 10^5\ \text{dyn}.$$

Kuna $1\ \mathrm{N} = 10^5$ dyn, siis $1\ \mathrm{kG} = 9{,}8\ \mathrm{N}$.

$$1\ \text{m.t.ü.} = 1\frac{\mathrm{kG} \cdot \mathrm{s}^2}{\mathrm{m}} = \frac{9{,}8 \cdot 10^5\frac{\mathrm{g} \cdot \mathrm{cm}}{\mathrm{s}^2} \cdot \mathrm{s}^2}{100\ \mathrm{cm}} = 9800\ \mathrm{g} = 9{,}8\ \mathrm{kg}.$$

Harjutus 31.

1. Kumb kahest jõust 200 000 dyn ja 2 kG on suurem ja mitu korda?
2. Ühe keha mass on 5 kg, teisel 5 m.t.ü. Kumma keha mass on suurem ja mitu korda?
3. Traktori ЧТЗ mass on 11 200 kg. Väljendada see mass kuni ühiku täpsusega massi tehnilistes ühikutes.
4. Sammuva ekskavaatori kopp mahutab 14 m^3 pinnast. Võttes pinnase erikaaluks $2\frac{\mathrm{G}}{\mathrm{cm}^3}$, arvuta korraga tõstetava pinnase kaal tonnides, kilogrammides ja düünides.

52. Ülesannete lahendamise näiteid Newtoni teise seaduse kohta.

1. Jääv jõud 2 kG mõjub kehale, mille mass on 19,6 kg. Kui suure kiirusega liigub keha pärast 5 sek. möödumist, kui algkiirus on võrdne nulliga?

Arvutused teostame *CGS*-süsteemis.

Antud $F = 2$ kG $= 2 \cdot 980\,000$ dyn $= 1\,960\,000$ dyn;

$m = 19\,600$ g; $t = 5$ s. Leida v_t.

Jääva jõu mõjul liigub keha ühtlaselt kiirenevalt. Selle keha kiirus leitakse valemi abil:

$v_t = at$.

Aeg t on ülesande tingimustes antud. Kiirenduse leiame mehhaanika teise seaduse põhjal: $a = \frac{F}{m}$.

$$a = \frac{1\,960\,000 \text{ g } \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}}{19\,600 \text{ g}} = 100 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}.$$

Vastus: $v_t = 100 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} \cdot 5 \text{ s} = 500 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$.

2. 98 kG raskuse keha kiirus on $420 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Kui suurt jõudu on vaja rakendada, et jätta see keha seisma 5 min. jooksul? Arvutused teostada tehnilises ühikute süsteemis.

Antud: $P = 98$ kG; $v_0 = 420 \frac{\text{m}}{\text{s}}$; $t = 300$ s.

Leida F.

Otsitav jõud leitakse teise seaduse põhjal:

$F = ma$.

Selle jõu mõjul liigub keha ühtlaselt aeglustuvalt. Liikumise negatiivne kiirendus a määratakse valemi abil: $v_t = v_0 + at$. Kuna $v_t = 0$, siis

$$v_0 = -at \text{ ja } -a = \frac{420 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{300 \text{ s}} = 1{,}4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

Newtoni teise seaduse järgi $P = mg$, millest

$$m = \frac{98 \text{ kG}}{9{,}8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 10 \text{ kG} \frac{\text{s}^2}{\text{m}}.$$

Vastus: $F = 10 \frac{\text{kG} \cdot \text{s}^2}{\text{m}} \cdot \left(-1{,}4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = -14$ kG. (Miinusmärk jõu väärtuse ees näitab, et see jõud on vastupidine keha liikumise suunale.)

3. Algkiirusega $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ liikuvale kehale mõjuti liikumise suunas jõuga 10 G. Jõu mõjumise algusest 5 sek. jooksul läbis keha 200 m. Määrata keha kaal. Arvutused teostada *CGS*-süsteemis.

CGS-süsteemi ühikutes, düünides, väljendatud keha kaal leitakse Newtoni teise seaduse põhjal: $P = mg$; $g = 980 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$.

On vaja leida keha mass grammides. Selleks kasutame samuti teist seadust: $m = \frac{F}{a}$; ülesande tingimuste järgi arvutame kiirenduse a valemist:

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}\ ;\quad 20\,000\ \text{cm} = 1000\frac{\text{cm}}{\text{s}} \cdot 5\ \text{s} + \frac{a\,25\ \text{s}^2}{2}\ .$$

Siit: $a = \frac{40\,000\ \text{cm} - 10\,000\ \text{cm}}{25\ \text{s}^2} = 1200\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$.

Keha mass

$$m = \frac{9800\frac{\text{g} \cdot \text{cm}}{\text{s}^2}}{1200\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}} \approx 8\ \text{g}.$$

Vastus: $P \approx 8\ \text{g} \cdot 980\frac{\text{cm}}{\text{s}^2} \approx 7840\ \text{g}\frac{\text{cm}}{\text{s}^2} \approx 7840$ dyn.

Ülesannete lahendamisel teostame matemaatilised tehted mitte ainult suuruste arvuliste väärtustega, vaid ka nende nimetustega. Kui enne lahendamist kõik ülesandes antud suurused väljendada ühes ühikute süsteemis ja õigesti rakendada füüsikaliste suuruste vahelisi seoseid, siis saadakse vastus alati selle süsteemi ühikutes. See võimaldab meil arvutusi mitte koormata ühikute nimetuste arvutustega: on küllaldane näidata ainult lõpptulemuses suuruse nimetus.

Näide: Keha massiga 0,01 kg liikus ühtlaselt kiirenevalt ilma algkiiruseta. 1 min. jooksul läbis ta tee 18 m. Määrata kehale mõjuv jõud.

Antud: $m = 0{,}01$ kg; $t = 1$ min.; $s = 18$ m.

Leida F.

Väljendame kõik ülesandes antud suurused ühe süsteemi, näiteks *CGS*-süsteemi ühikutes.

$m = 10$ g, $t = 60$ s, $s = 1800$ cm.

Newtoni teise seaduse järgi $F = ma$. (1)

Mass on antud, kiirenduse a leiame ühtlaselt kiireneva liikumise tee valemi järgi:

$$s = \frac{at^2}{2}\ ,\ \text{millest}\ a = \frac{2s}{t^2}\ . \qquad (2)$$

Asetame a väärtuse võrdusest (2) võrdusesse (1), saame:

$$F = m\frac{2s}{t^2}\ . \qquad (3)$$

Asetades suuruste arvulised väärtused võrdusesse (3), määrame jõu F suuruse:

$$F = \frac{10 \cdot 2 \cdot 1800}{3600} = 10\ \text{dyn}.$$

Vastus: $F = 10$ dyn.

Harjutus 32.

1. Kuulus renessansiaegne itaalia kunstnik ja teadlane Leonardo da Vinci püstitas järgmised laused:

a) kui jõud F nihutab keha massiga m ajaga t kaugusele s, siis sama jõud nihutab poole massiga keha sama aja jooksul kahekordsele kaugusele;

b) või sama jõud nihutab poolt massi niisama kaugele poole ajaga;

c) või sama jõud nihutab kahekordset massi niisama kaugele kahekordse ajaga;

d) või pool jõudu nihutab poolt massi niisama kaugele sama aja jooksul;

e) või pool jõudu nihutab kogu keha poolele kaugusele sama aja jooksul.

Kas need laused on õiged?

2. Näidata, et Newtoni esimene seadus on täielikus vastavuses Newtoni teise seadusega.

3. Näidata, et kahe keha poolt sama aja jooksul läbitud teed on võrdelised mõjuvate jõududega, kui kehade massid on võrdsed, ja pöördvõrdelised massidega, kui neile mõjuvad jõud on võrdsed.

4. Millist jõudu peab rakendama kehale, mille mass on 1 kg, et ta hakkaks liikuma kiirendusega $5\frac{cm}{s^2}$?

5. 500-düünise jõu mõjul liigub keha kiirendusega $0{,}2\ \frac{m}{s^2}$. Määrata keha mass.

6. Millise kiirendusega hakkab liikuma keha massiga 0,1 kg 2-grammise jõu mõjul?

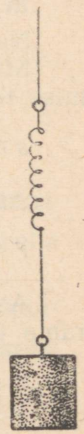
7. Keha, mille mass on 100 g, hakkab liikuma ühtlaselt kiirenevalt ja liigub 4 sek. jooksul 80 cm edasi. Määrata kehale mõjuv jõud, kui hõõrdejõud on 2000 dyn. Millist jõudu on vaja, et keha, läbinud selle vahemaa, liiguks edasi ühtlaselt?

8. Üle ploki on pandud niit, mille kummassegi otsa on seotud koormused, kumbki 240 G. Ühele koormusele asetatakse lisakoormus 10 G. Määrata 3 sek. jooksul läbitud vahemaa.

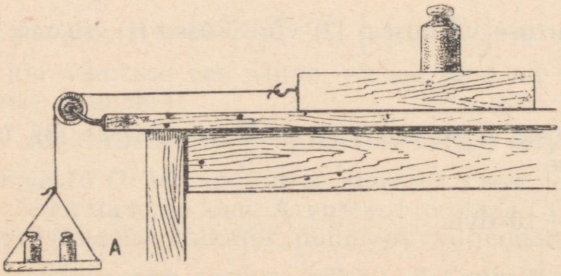
9. Keha, mille kaal on 49 000 dyn, hakkab jõu mõjul liikuma ühtlaselt kiirenevalt ja, läbinud liikumise algusest 50 cm, liigub kiirusega $0{,}72\ \frac{km}{h}$. Määrata kehale mõjuv jõud.

10. Klots (joon. 102) koos koormusega kaalub 5 kG. Kui taldrik A koos

Joon. 103.
Ülesande 14 juurde.



Joon. 102. Ülesande 10 juurde.



koormusega kaalub 2 kG, siis liigub klots mööda horisontaalselt asetatud lauda kiirendusega $20\frac{cm}{s^2}$. Määrata hõõrdejõud.

11. Auto, kaaluga 1400 kG, hakkab liikuma kiirendusega $0{,}7\ \frac{m}{s^2}$. Liikumist takistav jõud moodustab auto kaalust 0,02 osa. Määrata mootori poolt arendatav tõmbejõud.

12. Pärast jalgpalluri lööki pallile, mis kaalub 700 G, saab see kiiruse $14\frac{m}{s}$. Määrata löögi keskmine jõud, kui löök kestis 0,02 sekundit.

13. Rongi, mis kaalub 490 T, pidurdati, kui ta sõitis kiirusega $36\ \frac{km}{h}$, mille järel ta, läbinud 200 m, peatus. Eeldades, et liikumine oli pidurdamise algusest kuni seismajäämiseni ühtlaselt aeglustuv, määrata pidurdav jõud.

14. Kuidas muutub vedru deformatsioon, kui teda koos koormusega (joon. 103) viia kiirendusega vertikaalselt üles? vertikaalselt alla? Selgitada seda.

15. Vihi külge, mis kaalub 500 G, on seotud niit, mis on ette nähtud jõule kuni 520 G. Kas niit katkeb, kui niidi otsast kinni võttes anda vihile alt üles liikumisel kiirendus $60\frac{cm}{s^2}$?

16. Vedrukaalule on riputatud koormus 14 kG. Kui palju näitab kaal, kui viia ta vertikaalselt üles kiirendusega 28 $\frac{cm}{s^2}$? Kui viia samasuguse kiirendusega alla? Kui viia üles ja alla kiirendusega 490 $\frac{cm}{s^2}$?

Kui palju näitab vedrukaal, kui ta koos tema külge seotud koormusega langeb vabalt?

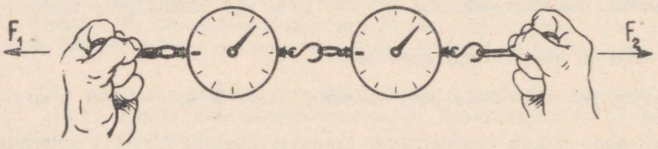
17. Tõstekraana tõstab maaslamavat koormat kaaluga 980 kG kiirendusega $1\ \frac{m}{s^2}$ vertikaalselt üles. Määrata kraana terastrossile mõjuv jõud momendil, mil koorem eemaldub maapinnalt.

V PEATÜKK.

KEHADE VASTASTIKUNE MÕJU.

53. Newtoni kolmas seadus. Ühe keha mõju teisele iseloomustab mehhaanikas jõud. Kui me näiteks kõneleme, et kehale mõjub jõud, siis tähendab see, et sellele kehale mõjub mingi teine keha. Kuid mitte ühelgi korral, kui üks keha mõjub teisele, ei ole tegemist ühepoolse mõjuga, vaid kehade vastastikuse mõjuga. See tähendab, kui üks keha mõjub teisele, siis ka see teine keha mõjub esimesele kehale.

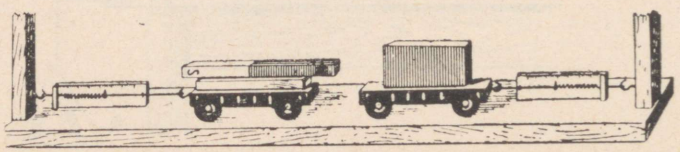
Ülalöeldud väidet võib kontrollida katsetega.



Joon. 104. Mõlemad dünamomeetrid näitavad ühesuurust jõudu.

Joonisel 104 on kujutatud katse kahe dünamomeetriga, mis on teineteisega ühendatud. Üht dünamomeetrit tõmmatakse rõngast ühele poole, teist aga vastassuunas. Mõlemad dünamomeetrid näitavad üht ja sama jõu suurust. Järelikult jõud F_1 ja F_2, millega dünamomeetrid mõjuvad teineteisele, on suuruselt võrdsed, kuid vastassuunalised.

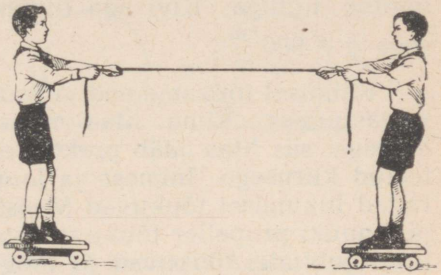
Jõud F_1 on rakendatud ühele dünamomeetrile, jõud F_2 aga teisele. See katse näitab, et esimese dünamomeetri vedrut võib teise dünamomeetriga välja venitada mingi jaotuseni ainult sel juhul, kui ka teise dünamomeetri vedrut venitatakse esimese dünamomeetri poolt sama jaotuseni.



Joon. 105. Mõlemad dünamomeetrid näitavad ühesuurust jõudu.

Vaatleme veel juhtu, kus kehad vastastikku mõjuvad, olles teineteisest mingil kaugusel.

Paneme ühele vankrikesele magneti, teisele tüki rauda (joon. 105). Vankrite taha kinnitame dünamomeetrid. Magneti ja raua vahelise külgetõmbe tagajärjel liiguvad vankrikesed teineteisele vastu, venitades seejuures välja dünamomeetrite vedrud. Kui vankrikesed peatuvad, näitavad mõlemad dünamomeetrid ühesuurust jõudu. Selle katse põhjal võime öelda, et sama jõuga, millega magnet tõmbab rauda, tõmbab raud külge ka magnetit.



Joon. 106. Liikuvate kehade vastastikune mõju.

Me vaatlesime paigalseisvate kehade vastastikuse mõju juhte. Nüüd vaatleme liikuvate kehade vastastikust mõju.

Joonisel 106 on kujutatud kaks vankrikestel seisvat poissi. Käes on neil nöör. Kui poisid tõmbavad nöörist, siis hakkavad nad mõlemad liikuma teineteisele vastu. Jõud, mis seejuures on rakendatud poistele, osutuvad alati võrdseteks ja vastassuunalisteks ega sõltu sellest, kuidas poisid tõmbavad nööri. Tõepoolest, mõõtes vankrikeste poolt läbitud teed ja nende liikumise aja, veendume, et poisikestega vankrikeste liikumise kiirendused a_1 ja a_2 on pöördvõrdelised liikuvate massidega m_1 ja m_2, s. t.

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1} \text{ ehk } m_1a_1 = m_2a_2.$$

Kuid $m_1a_1 = F_1$ ja $m_2a_2 = F_2$.

Tähendab, suuruselt $F_1 = F_2$ (1); seejuures ei tule aga unustada, et jõud F_1 on rakendatud ühele vankrikesele, kuid F_2 — teisele. Need jõud on vastupidiste suundadega. Arvestades vastastikku mõjuvate jõudude F_1 ja F_2 vastassuunalisust, võib võrduse (1) kirjutada järgmiselt: $F_1 = -F_2$ (2).

Seega kõikidel juhtudel **jõud, millega kaks keha mõjuvad teineteisele, on suuruselt võrdsed ja suunalt vastupidised.**

Kui ühte neist jõududest nimetada m õ j u v a k s jõuks, siis teine on v a s t u m õ j u v jõud.

Niisugune jõudude jagamine mõjuvateks ja vastumõjuvateks on tinglik; meist sõltub, kumba neist jõududest nimetada mõjuvaks, kumba vastumõjuvaks.

Eespool sõnastatud m õ j u ja v a s t u m õ j u võrdsuse

seaduse avastas juba Newton, kes võttis selle dünaamika aluste kolmandaks liikumise seaduseks.

Kolmandast seadusest järeldub, et mitte ainult Maa ei tõmba näiteks kivi, vaid ka kivi tõmbab Maad külge kivi kaaluga võrdse jõuga. Selle vastastikuse mõju tulemusena liiguvad mõlemad kehad — Maa ja kivi — teineteisele vastu (näiteks liikumatute tähtede suhtes) kiirendustega, mis on pöördvõrdelised nende massidega.

Kuna Maa mass on palju, palju kordi suurem mistahes kivi massist, siis liikumise kiirendus kivi suunas on praktiliselt võrdne nulliga. Kivi aga liigub Maa suunas (langeb) kiirendusega $g = 980 \frac{cm}{s^2}$.

Käimisel tõukame end jalgadega Maast ära. Maa tõukab meid vastassuunas. Kuna Maa mass on suur võrreldes meie keha massiga, siis Maa jääb praktiliselt liikumatuks, meie aga liigume teatud kiirusega. Inimese ja loomade jalad, auto ja veduri veorattad liikumisel tõukuvad Maast, laeva kruvi tõukub veest, lind ja lennuki propeller tõukuvad lendamisel õhust jne. Kõikidel taolistel juhtudel tõukuvad ja tõugatavad kehad hakkavad liikuma vastupidistes suundades kiirendustega, mis on pöördvõrdelised nende massidega.

Et õigesti rakendada Newtoni kolmandat seadust, tuleb meeles pidada, et *mõjuv ja vastumõjuv jõud,* millest kõneldakse selles seaduses, *on alati võrdsed ja vastassuunalised, kuid kunagi ei tasakaalusta teineteist, sest nad on rakendatud erinevatele kehadele.*

Kui hobune veab vankrit, siis ei tähenda see, et hobune tõmbab vankrit tugevama jõuga, kui vanker tõmbab hobust vastassuunas. Mõlemad jõud on suuruselt võrdsed. Kuid hobune ja vanker ei hakka mõlemad liikuma ühes ja samas suunas ainuüksi teineteise vastastikuse mõju tagajärjel.

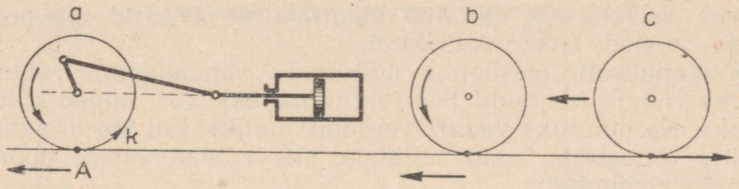
Selleks on vaja kolmandat jõudu, mis on üheaegselt rakendatud nii hobusele kui ka vankrile. Niisugune jõud tekib hobuse ja Maa vastastikusel mõjutamisel. Hobune tõukab raudadega Maad ühele poole, kuid Maa tõukab hobust koos vankriga teisele poole.

Täpselt samuti ei tõuka auto mootor, mis paneb pöörlema auto rattad, teda paigalt, kui puudub küllaldane auto rataste haakumine tee pinnaga (§ 38).

53 a. Veojõud. Kooskõlas Newtoni kolmanda seadusega on kahe keha vahel vastastikku mõjuvad jõud suuruselt võrdsed, kuid vastassuunalised. Need jõud ei saa panna mõlemat vastastikku mõjuvat keha liikuma ühes ja samas suunas. Näiteks ei saa ainult vastastikused mõjujõud veduri ja vagunite vahel panna rongi liikuma. Selleks on vaja kolmandat jõudu. Selliseks kolmandaks jõuks, nagu nägime (§ 38), on hõõrdejõud veduri veorataste ja rööbaste vahel. See küsimus on väga hästi esitatud meie silma-

paistva teadlase V. L. Kirpitšjovi raamatus «Vestlusi mehhaanikast». Toome katkendi sellest raamatust.

«Auru rõhumisjõud aurumasinas on sisejõud ega või põhjustada rongi raskuskeskme liikumist. Seda kinnitab katse, mida on mitu korda tehtud veduritega: vedur riputatakse ahelate otsa, köetakse katelt ja käivitatakse masin. Osutub, et kolvi edasi-tagasi käikude tagajärjel tekivad ainult kogu ülejäänud massi väikesed vastassuunalised võnked, kuid veduri raskuskese jääb liikumatuks.



Joon. 107.

Kui vedur on asetatud rööbastele ja ta masin käivitatud, siis tekib veduri veorataste ja rööbaste vahel hõõrdejõud, mis ongi selleks vajalik horisontaalne jõud, et panna liikuma vedurit koos rongiga. Nähtus on lähemal vaatlemisel järgmine. Rööpal seisva ratta pöörlemisel (joon. 107) püüab punkt *A* mööda rööbast libiseda noolega *k* näidatud suunas. Seda segab ratta ja rööpa vaheline hõõre. Hõõrdejõu suund on joonisel näidatud noolega. Ratas oma konarustega toetub vastu rööbast, mis rattale avaldab vasturõhumist. Rattal ja rööpal olevad konarused kujutavad endast nagu pisikesi hambakesi, millede vahel tekkiv põrge põhjustabki rõhumist. Sama vasturõhumine, s. t. hõõrdejõud, mida avaldab rööbas rattale, ongi välisjõud, mis nihutab veduri raskuskeset. See peab ületama veduri külge haagitud kogu rongi takistused, s. t. peab olema suurem sellest takistusest. Seepärast on vaja veduri veorataste ja rööbaste vahel tõhusat hõõrdejõudu, kuid hõõrdejõud on võrdeline rõhumisega, järelikult on vaja, et veorattad avaldaksid rööbastele tõhusat rõhumist. Teiste sõnadega, selleks et vedada rasket rongi, on vaja rasket vedurit.

Kõik see kehtib veduri veorataste kohta, milledele mõjub neid pöörlema panev aurumasina kolb. See osa veduri kaalust, mida need rattad kannavad, on kasulik kaal: mida suurem see on, seda tugevam on vedur, s. t. seda raskemat rongi võib ta vedada. Peale veorataste on veduril veel kanderattad, mis ei ole ühendatud aurumasinaga. See osa veduri kaalust, mida need rattad kannavad, ei too mingit kasu ega suurenda veduri veojõudu. Need rattad ei anna liikumapanevat jõudu, vaid, hoopis vastupidi, pannakse ise liikuma, samuti nagu vagunite rattadki. Kui rong liigub noolega näidatud suunas (joon. 107 *c*), siis rööbaste hõõre vastu

rattaid paneb need pöörlema. See vaguni ratastele kui ka veduri kanderatastele mõjuv hõõrdejõud on liikumisele vastassuunaline ja on rongi liikumist takistavaks välisjõuks.

Seega on vedurit liikumapanev jõud ta veorataste ja rööbaste vaheline hõõrdejõud. Seda jõudu me suurendame veduri kaalu suurendamisega. Kui sellest pole küllalt, siis kasutame teist võtet, millele võib vaadata kui hõõrdejõu suurendamisele. Rööbas tehakse hambuline, millega haakub veduri teljele kinnitatud terasest hammasratas, s. t. rattal ja rööpal olevate konaruste — pisikeste hambakeste — asemele asetatakse suured rauast või terasest hambad. Selliselt on ehitatud mägiraudtee vedurid, mis peavad tõusma mööda järske kallakuid.

Vastupidiselt, igasugune hõõrdejõu vähendamine vähendab kohe ka veduri veojõudu. See juhtub näiteks, kui rööpad kuluvad siledaks. Ka muutuks veduri veojõud nulliks, kui me asetaksime ta mitte rööbastele, vaid rullidele, mis võivad vabalt pöörelda oma telgede ümber.»

Vaatleme nüüd, kuidas võib veduri veojõudu arvutada.

Veoratastele langevat osa veduri kaalust nimetatakse h a a k e k a a l u k s.

Nagu juba nägime, on veorataste ja rööbaste vahel libisemise hõõrdejõud. Veduririataste terasbandaažide libisemisel mööda terasrööpaid on hõõrdetegur umbes $^1/_6$. Seepärast moodustab veduri veojõud ühe kuuendiku veduri haakekaalust.

$F_{veo} = k_{libisemise} \cdot P_0$, kus P_0 on haakekaal.

Veeremise takistuse rongi liikumisel kiirusega 20—40 $\frac{km}{h}$ võib võtta võrdseks umbes $^1/_{300}$ rongi kaalust. Järelikult võib vedur horisontaalsel teel vedada rongi, mille kaal on veduri veojõust 300 korda suurem. Kuna veduri veojõud on $^1/_6$ veduri haakekaalust, siis täiesti horisontaalsel teel võib rongi kaal olla (arvestades sellesse ka veduri kaalu) 50 korda suurem veduri haakekaalust.

Kuid isegi tühine tee tõus vähendab tugevasti veduri veovõimet. Nii näiteks teel, mille tõusunurk on pool kraadi, veab «Э»-seeria vedur, mis kaalub 80 T, mitte raskemat rongi kui 1500 T.

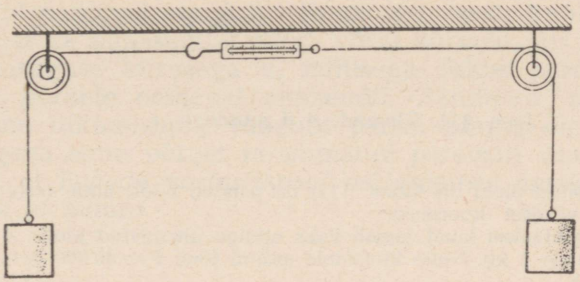
Sõltuvalt teest moodustab traktori veojõud $^1/_3$ kuni $^4/_5$ osa traktori kaalust.

Hobuse veojõuks on samuti nagu veduril ja traktoril hõõrdejõud, siin aga hobuseraudade ja maapinna vahel. Hobuse veojõud on 0,1—0,2 ta kaalust. Kui hobune kaalub 400 kG, siis võib ta arendada 40 kuni 80 kG-st veojõudu. Vankriratastе ja munakivisillutise vahel on hõõrdejõud umbes $^1/_{20}$ koorma kaalust. Järelikult võib hobune horisontaalsel teel vedada vankrit koos koormaga, mille kaal on 2 kuni 4 korda suurem hobuse kaalust.

Harjutus 33.

1. Laual lamab koormus. Millised jõud mõjuvad koormusele? Millised jõud mõjuvad lauale?

2. Üle kahe liikumatu ploki on pandud nöör, mille kummaski otsas ripub viht 5 kG (joon. 107 *a*). Nöör plokkide vahel lõigati katki ja otsad ühendati dünamomeetriga. Kui palju näitab dünamomeeter?



Joon. 107 *a*.
Ülesande 2 juurde.

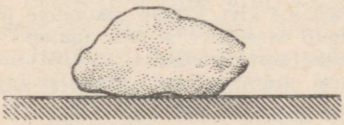
3. Oletame, et vankrikestega katses (joon. 106) asetati parempoolsele vankrikesele niisugune lisakoormus, et parempoolse vankrikese mass oli kaks korda suurem pahempoolse massist. Kui pika tee läbib kumbki vankrike kuni kohtumiseni, kui vankrikeste eesmiste äärte vaheline kaugus enne liikumise algust oli 2,7 m (hõõrdumist ei arvestata)?

4. Milliseid jõude nimetatakse järgmistes näidetes mõjuvateks ja milliseid vastumõjuvateks?

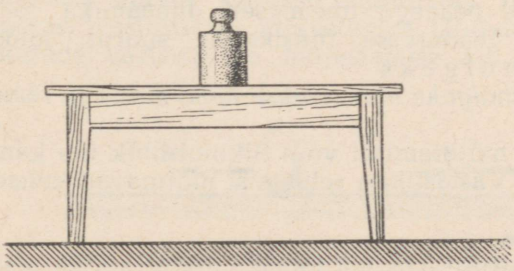
a) Horisontaalsel maapinnal lamab kivi (joon. 108).

b) Horisontaalsel põrandal seisab laud, mille horisontaalsel pinnal asetseb koorem (joon. 109).

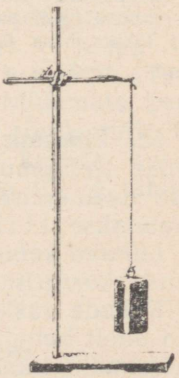
c) Nööri *AB* otsa *B* on riputatud koorem *P* (joon. 110).



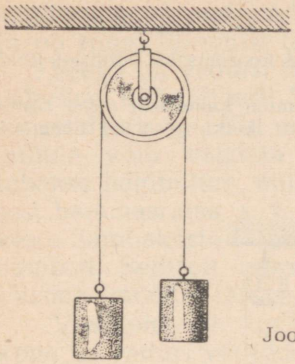
Joon. 108. Ülesande 4 *a* juurde.



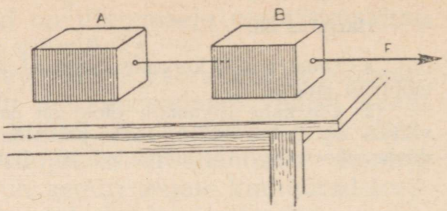
Joon. 109. Ülesande 4 *b* juurde.



Joon. 110.
Ülesande 4 *c* juurde.



Joon. 111. Ülesande 4 *d* juurde.



Joon. 112. Ülesande 5 juurde.

d) Lakke kinnitatud ploki üle (joon. 111) on pandud nöör, mille otste külge on riputatud kaks võrdset koormust.

5. Siledal horisontaalsel laual lamab kaks niidiga ühendatud klotsi *A* ja *B*. Kummagi klotsi mass on 1 kg. Neile klotsidele mõjub jõud $F = 40\,000$ dyn, nagu näidatud joonisel 112.

Arvestamata hõõret määrata:

a) millise kiirendusega liiguvad klotsid;

b) kui suur jõud liikumise suunas mõjub vasakule klotsile;

c) millise jõuga on niit pingutatud;

d) kui suured jõud mõjuvad parempoolsele klotsile ta liikumise suunas.

6. 50 T kaaluv vedur, mille järele on haagitud kaks vagunit, kumbki 20 T, liigub kiirendusega 0,2 $\frac{m}{s^2}$. Liikumise takistus moodustab 0,005 rongi kaalust. Määrata vedurile ja kummalegi vagunile mõjuvad jõud ja pingutusjõud haakekohtades. Kui suured oleksid need jõud, kui koosseis liiguks ühtlaselt? Võtta $g = 10\frac{m}{s^2}$.

7. Üle liikumatu ploki on pandud niit, mille otstesse on riputatud vihid 120 g ja 125 g. Määrata kummalegi vihile mõjuv jõud ja niidi pingsus.

8. 5 m kõrguselt langeb vabalt 600 G raskune kivi. Mitme sekundiga jõuab kivi maapinnale? Kui suure kiirendusega liigub Maa kivi suunas (näiteks Päikese suhtes)? Kui pika ajaga (aastates, lugedes aasta võrdseks $3{,}2 \cdot 10^7$ sekundiga) läbiks Maa 0,5 cm, liikudes niisuguse kiirendusega? Maa mass on $6 \cdot 10^{27}$ g. Võtta $g = 10\frac{m}{s^2}$.

54. Liikumishulk. Liikumishulga jäävuse seadus. Kehade liikumise iseloomustamiseks peaaegu üheaegselt dünaamika seaduste avastamisega viidi teadusesse füüsikaline suurus, mida nimetatakse liikumishulgaks.

Liikuva keha liikumishulgaks nimetatakse keha massi ja tema kiiruse korrutist (mv).

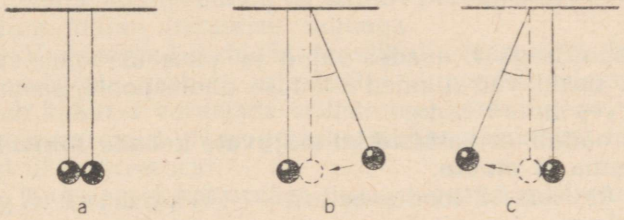
Kehade vastastikusel mõjutamisel võib liikumishulk üle kanduda ühelt kehalt teisele. Vastastikku teineteist mõjutavad kehad vahetavad liikumishulki.

Teeme järgmise katse.

Riputame kaks ühesuuruse massiga teraskuulikest niitide otsa nii, et niidid oleksid paralleelsed ja kuulikesed puudutaksid teine-

teist (joon. 113 *a*). Kallutame parempoolse kuulikese nii, et ta niit moodustaks esialgse suunaga mingi nurga (joon. 113 *b*), ja laseme ta lahti. Lüües vastu vasakpoolset liikumatut kuulikest ta peatub, kuid vasak kuulike hakkab liikuma ja teda hoidev niit kaldub kõrvale niisama suure nurga võrra (joon. 113 *c*).

Olgu kummagi kuulikese mass m ja parempoolse kuulikese kiirus põrke momendil v. Kuna vasak kuulike kuni põrkeni seisis paigal, siis mõlema kuulikese üldine liikumishulk oli mv ja suunatud paremalt vasakule. Kuna aga vasak kuulike pärast põrget kaldus ka samasuguse nurga võrra kõrvale, siis hakkas ta liikuma samasuguse kiirusega v, millisega liikus parempoolne kuulike just põrkele eelneval momendil. Järelikult, mõlema-kuulikese üldine liikumishulk vahetult pärast põrget on võrdne liikumishulgaga enne põrget ja suunatud paremalt vasakule. See tähendab, et *kehade vastastikusel mõjutamisel nende üldine liikumishulk ei muutu.*

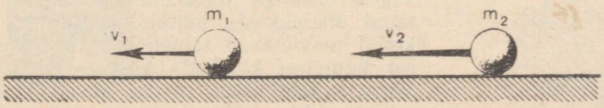


Joon. 113. Liikumishulga jäävuse seaduse juurde.

Selle tulemuse võib saada teoreetiliselt, järeldusena Newtoni teisest ja kolmandast seadusest.

Joonisel 114 on kujutatud kaks kera massidega m_1 ja m_2; need liiguvad piki sirget ühes suunas kiirustega v_1 ja v_2.

Olgu teise kera kiirus esimesest suurem, s. t. $v_2 > v_1$. Teatud aja pärast jõuab teine kera esimesele järele. Mõlemate kerade kokkupõrkamisel tekivad vastastikku mõjuvad jõud, mille tulemusena kerade kiirused muutuvad. Tähistame kerade kiirused pärast vastastikust mõjustamist tähtedega v'_1 ja v'_2 ja tähega t kerade vastastikuse mõjustamise aja.



Joon. 114. Kaks kera liiguvad ühes suunas erinevate kiirustega.

Vastastikusel mõjustamisel tekkinud kiirendused a_1 ja a_2 määratakse võrdustest:

$$a_1 = \frac{v'_1 - v_1}{t}; \qquad a_2 = \frac{v'_2 - v_2}{t}.$$

Newtoni teise seaduse järgi on kummalegi kerale mõjuvad jõud vastavalt:

$$F_1 = m_1 a_1 = m_1 \frac{v'_1 - v_1}{t}; \tag{1}$$

$$F_2 = m_2 a_2 = m_2 \frac{v'_2 - v_2}{t}. \tag{2}$$

Newtoni kolmanda seaduse järgi on vastastikusel mõjustamisel jõud F_1 ja F_2 suuruselt võrdsed ja vastassuunalised:

$$F_1 = -F_2. \tag{3}$$

Asetame võrdusesse (3) F_1 ja F_2 väärtused võrdustest (1) ja (2); saame:

$$m_1 \frac{v'_1 - v_1}{t} = -m_2 \frac{v'_2 - v_2}{t}.$$

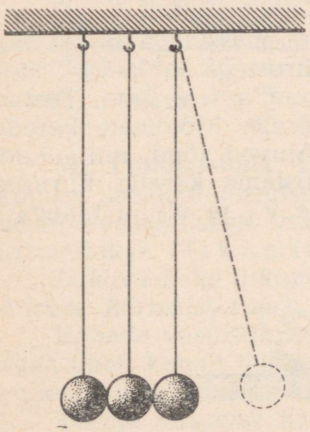
Taandades suurusega t, avades sulud ja viies ülakoma abil märgitud kiirust sisaldavad liikmed võrduse ühele poole, saame:

$m_1 v'_1 + m_2 v'_2 = m_1 v_1 + m_2 v_2$.

Saadud seos näitab, et **vastastikku mõjuvate kehade liikumishulkade summa ei muutu.**

See on üks üldisemaid loodusseadusi — liikumishulga jäävuse seadus.

Me jõudsime sellele seadusele kahe keha vastastikuse mõju vaatlemisest, kuid on võimalik näidata, et see seadus on õige mistahes arvu vastastikku mõjuvate kehade puhul.



Joon. 115. Ülesande 3 juurde.

Harjutus 34.

1. Kui veepinnal liikumatult seisvas paadis hakata liikuma paadipärast paadininasse, siis hakkab paat liikuma vastassuunas. Seletada seda.

2. Ideaalselt siledal horisontaalsel pinnal istub inimene. Kas ta võib seda pinda mööda liikuda? Seletada seda.

3. Joonisel 115 on kujutatud kolm ühesuguse massiga teraskuulikest, mis on riputatud ühepikkuste niitide otsa nii, et kuulikesed puudutavad teineteist. Kui parempoolset kuulikest kallutada kõrvale mingi nurga võrra ja lahti lasta, siis ta, lüües vastu keskmist kuulikest, jääb seisma; seejuures hüppab aga sama nurga võrra eemale vasak. Keskmine kuulike jääb paigale. Seletada seda.

55. Tagasilöök laskmisel. Reaktiivmootorid. Nagu teada, tekib laskmisel tagasilöök: mürsk liigub edasi, kuid kahur veereb tagasi. Mürsk ja kahur on kaks vastastikku mõjuvat keha. Kahuri tagasiveeremise kiiruse määramiseks võib kasutada liikumishulga jäävuse seadust. Selgitame seda näite varal.

Millise kiiruse saab laskmisel kahur tagasilöögi tõttu, kui kahuri mass on 1000 kg, mürsu mass 2,5 kg ja ta kiirus kahuri torust väljalendamise momendil 600 $\frac{m}{s}$?

Kuni lasuni olid mürsk ja kahur paigal, nende üldine liikumishulk võrdus nulliga. Liikumishulgia säilivuse seaduse järgi üldine liikumishulk jääb ka pärast lasku võrdseks nulliga. Järelikult võib kirjutada:

$$1000\ \text{kg} \cdot v\,\frac{m}{s} + 2{,}5\ \text{kg} \cdot 600\,\frac{m}{s} = 0,$$

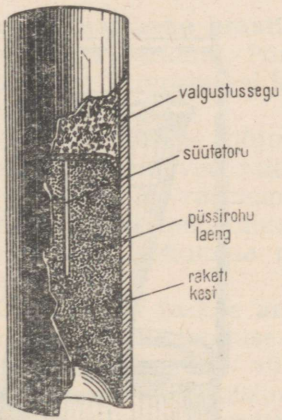
millest

$$v = -\frac{2{,}5\ \text{kg}}{1000\ \text{kg}} \cdot 600\,\frac{m}{s} = -1{,}5\,\frac{m}{s}.$$

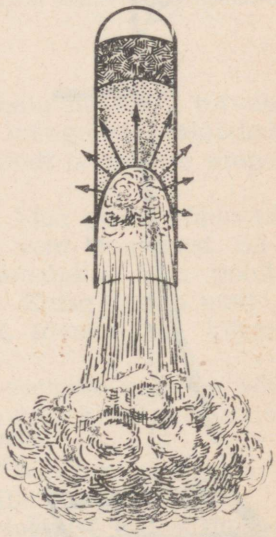
Märk miinus näitab, et kahuri liikumiskiiruse suund on vastupidine mürsu liikumise suunaga.

Vanaaegsed kahurid tegelikult veeresidki laskmisel tagasi. Kaasaegsete raskete mürskude ja nende hiiglakiiruste juures tuleb kahurid varustada eriliste mehhanismidega, mis pidurdavad tagasiveeremist. Niisugusteks mehhanismideks on õhk-, õli- või vedrukompressorid.

Kaasaegses kahurväes liigub tagasilöögil tagasi ainult kahuri-



Joon. 116. Signaalraketi läbilõige.



Joon. 116 *a*. Rakett lennus.

toru, lafett (alus) aga jääb paigale. Laskmisel tagasiliikuv kahuritoru surub kokku vedru või temaga ühendatud kolviga rõhub vedelikule, mis surub kokku õhu erilises reservuaaris. Pärast lasku viib kokkusurutud vedru või õhk kahuritoru endisesse asendisse. Automaatrelvades kasutatakse tagasilööki taaslaadimiseks.

Tagasilööki võib kasutada ka nii, et «kahur» saab seejuures tunduva kiiruse. Sel viisil kasutatakse tagasilööki kõikides niinimetatud reaktiivmootorites.

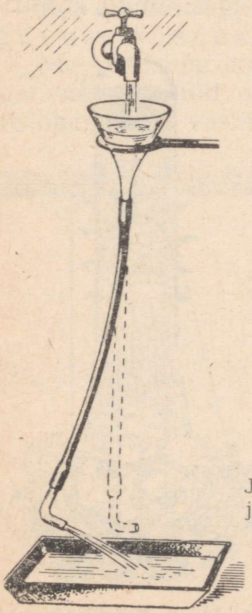
Reaktiivmootori töötamise printsiipi võib jälgida tavalise signaalraketi ehituse juures.

Joonisel 116 on näidatud sellise raketi läbilõige. Ta koosneb torust, mille alumises osas on püssirohu ja söetolmu segu, ülemises aga valgustussegu. Püssirohi süüdatakse süütenööriga. Segus oleva söetolmu tõttu ei plahvata see korraga, vaid põleb mõne sekundi.

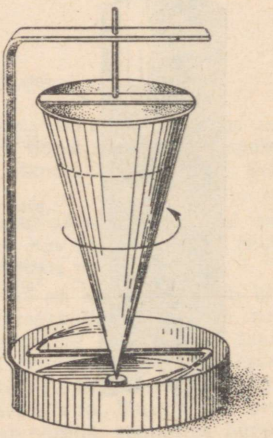
Antud juhul on omamoodi mürskudeks püssirohu põlemisel tekkivad gaasid, mis suure kiirusega paiskuvad välja toru alumisest otsast. Toru ise — «kahur» kogu oma sisuga — saab püssirohu gaaside rõhumise tõttu ülespoole suunatud kiiruse (joon. 116 *a*).

Sama printsiip on aluseks Suures Isamaasõjas kuulsaks saanud kaardiväe miinipildujate «katjuušade» mürskude liikumisele.

Kaasajal on reaktiivmootoritega lennukeid, mis arendavad kiirust 2000 $\frac{km}{h}$ ja rohkem.



Joon. 117. Väljavoolava joa reaktsioon.



Joon. 118. Segneri ratas.

Esimesena väljendas raketi printsiibil lendamise võimalikkuse mõtte vene revolutsionäär K i b a l t š i t š 1881. a., mitte kaua enne tema hukkamist.

Esimesed vedelkütusega töötavad lennuraketid esitati ja töötati välja kuulsa vene teadlase T s i o l k o v s k i poolt aastal 1903. Tsiolkovski töötas välja ka reaktiivliikumise teooria.

Väljavoolava vedeliku toime on samasugune kui väljavoolava gaasi toime. Selles võib veenduda järgmise katsega.

Kinnitame statiivile kummitoruga lehtri. Kummitoru otsa tõmbame kõverale klaastorule (joon. 117). Suleme kõvera toru otsa korgiga ja täidame lehtri veega. Kui nüüd, võtnud ära korgi, laseme vett välja voolata, siis kaldub kummitoru kõrvale, vastupidiselt veejoa suunaga. Üheaegselt rõhumisjõuga, mis tõukab vett torust välja, ilmub jõud, mis tõukab toru vastassuunas. Seda jõudu nimetatakse väljavoolava joa reaktsiooniks. Joonisel 118 on kujutatud niinimetatud s e g n e r i r a t a s, mis pöörleb väljavoolava vedelikujoa reaktsiooni tõttu. Torukestest välja voolates paneb vedelik anuma pöörlema torukeste kõverusele vastassuunas.

Veejoa reaktsiooni rakendatakse võimsates veeturbiinides, mis töötavad Dneprogessis, Volhovi hüdroelektrijaamas ja paljudes teistes hüdroelektrijaamades.

Harjutus 35.

1. Kui veevoolik ühendada veevarustusvõrguga ja lasta vett voolata täie survega, siis hakkab maaslamava vooliku ots liikuma. Seletada seda.
2. Vintpüssi mass on 4,1 kg, kuuli mass 9,6 g. Kuuli kiirus väljalendamise momendil on 865 $\frac{m}{s}$. Määrata kiirus tagasilöögil.

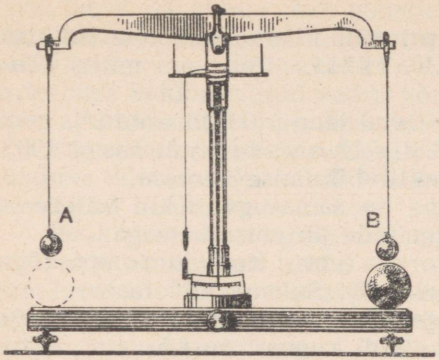
56. Ülemaailmne gravitatsiooniseadus. Kaalu mõistega tutvub inimene väga varakult. Põrandale langenud mänguasi, äralöödud käsi või jalg tutvustavad last kõige näitlikumalt langemise jõuga ehk keha kaaluga.

Maa külgetõmbe mõjul langevad kehad Maa peale, rõhuvad alustele või venitavad niite, mis takistavad neid langemast. Silmale nähtamatut väiksematki aatomit tõmmatakse Maa poolt samuti nagu iga eset, mida võime vaadelda. Katse näitab meile, et kõiki kehi, sõltumata nende mõõtmetest, tõmmatakse külge Maa poolt.

Kas on aga raskus ainult maapealsete esemete omadus või kuulub see kõigile looduse kehadele? Kas on kaal kehal, mis asub mõnel teisel planeedil või Kuul?

Vastuse nendele küsimustele andis Isaac Newtoni poolt avastatud ülemaailmne gravitatsiooniseadus, mille järgi:

kaks mistahes aineosakest tõmbuvad teineteise külge jõuga, mis on võrdeline nende masside korrutisega ja pöördvõrdeline nendevahelise kauguse ruuduga.



Joon. 119. Gravitatsioonikonstandi määramine (skeem).

Selle seaduse avastas Newton, uurides Kuu liikumist ümber Maa ja planeetide liikumist ümber Päikese, ning laiendas seda kõikidele looduse kehadele ja kõikidele osakestele, milledest need kehad koosnevad.

Kooskõlas ülemaailmse gravitatsiooniseadusega iga planeedi osakest ja planeeti tervikuna tõmmatakse külge Päikese poolt, iga planeet aga omakorda tõmbab külge Päikest. Maa tõmbab külge Kuud nii, nagu tõmmatakse külge iga keha Maa pinnal. Seega, *keha kaal Maal kujutab endast gravitatsioonijõudu.*

Ülemaailmse gravitatsiooniseaduse abil kirjeldatakse suure täpsusega taevakehade liikumist, samuti ennustatakse paljudeks aastateks ette päikese- ja kuuvarjutused, mis ongi selle seaduse põhiliseks katseliseks kontrolliks.

Kehadevahelised tõmbejõud, milledega kohtume praktikas, on väga väikesed, neid ei saa vahetult ilmsiks teha, kuid neid võib mõõta laboratoorsete peenkatsetega. Me vaatleme üht niisugust gravitatsioonijõu mõõtmise meetodit, kuid enne väljendame ülemaailmse gravitatsiooniseaduse matemaatilise valemiga.

Tähega F tähistame tõmbejõu kahe massi m_1 ja m_2 vahel, mis asetsevad teineteisest kaugusel r. Siis:

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r_2}. \qquad (1)$$

Selles valemis tähistame tähega γ (kreeka täht gamma) suurust, mis arvuliselt on võrdne jõuga, millega tõmbuvad kaks massi, kumbki 1 g, kui nad asuvad teineteisest 1 cm kaugusel. Seda suurust nimetatakse g r a v i t a t s i o o n i k o n s t a n d i k s. Seda võib määrata näiteks järgmise katse abil.

Kaks võrdse kaaluga (umbes 20 kG) seatinakera A ja B on riputatud suure võrdõlgse kaalukangi külge (joon. 119). Kolmas kera C, mille kaal on umbes seitse korda suurem A või B kaalust, on kinnitatud pöörlevale lauakesele nii, et teda võib asetada täpselt kas kera A või B keskpunkti alla. Iga kera mass ning kerade A ja C (või B ja C) keskpunktide vaheline kaugus mõõdetakse hoolsasti. Kui kera C asub kera B all, siis kera B kaal suureneb

umbes 0,4 mG võrra; see ongi jõu F suurus, millega kerad B ja C tõmbuvad teineteise külge.

Seega on valemis (1) teada kõik suurused peale gravitatsioonikonstandi, mida nüüd on kerge arvutada.

Paljude katsete põhjal on kindlaks tehtud gravitatsioonikonstandi arvuline väärtus: $\gamma = \frac{1}{15\,000\,000} \approx 6{,}66 \cdot 10^{-8} \frac{\text{dyn} \cdot \text{cm}^2}{\text{g}^2}$ (kui jõud on mõõdetud düünides, mass grammides ja kaugus sentimeetrites).

See tähendab, et *kaks keha, mille massid on* 1 g *ja millede vaheline kaugus on* 1 cm, *mõjutavad teineteist jõuga* $\frac{1}{15\,000\,000}$ *düüni.*

Ajaloost. Ülemaailmne gravitatsiooniseadus on taevamehhaanika (teadus planeetide liikumise kohta) aluseks. Selle seaduse alusel arvutatakse suure täpsusega taevakehade liikumise trajektoorid ja määratakse nende asendid taevavõlvil mitukümmend aastat ette.

Kõige tähelepanuväärsemaks ülemaailmse gravitatsiooniseaduse kasutamise juhuseks oli planeet Neptuuni avastamine. 1781. a. avastas inglise astronoom Herschel (1738—1822) planeet Uraani. Arvutati tema orbiit ja koostati tabel ta asendite kohta paljudeks aastateks ette. Kuid selle tabeli kontrollimine 1840. a. näitas, et selle andmed lähevad lahku tegelikkusest. Ilmnes, et Uraanile mõjub mingi tundmatu jõud, häirides ta liikumist. Tundes neid kõrvalekaldumisi (Uraani häireid), püstitasid inglane Adams ja prantslane Leverrier (l. leverjee) ülesande: kasutades ülemaailmset gravitatsiooniseadust leida tundmata planeedi asukoht, mis asub Uraanist kaugemal ja häirib selle liikumist. Adams lõpetas töö varem, kuid vaatlejad, kellele ta tegi teatavaks oma tulemused, ei rutanud kontrollimisega. Samal ajal Leverrier, lõpetanud arvutuse, juhatas saksa atsronoomile Galle'le koha, kust peab otsima tundmata planeeti. Kohe esimesel õhtul, 23. septembril 1846. a., leidis Galle selle planeedi taevalaotusel, Leverrier' poolt juhatatud asukohast ainult pool kraadi kõrval. See planeet sai nimeks Neptuun.

Samal teel avastati 14. märtsil 1930. a. Neptuunist kaugem planeet Pluuto.

Ülemaailmne gravitatsiooniseadus ei sisalda mingit vihjet kehadevahelise tõmbe põhjuse kohta. Selle seaduse avastaja Newton ise ei arvanud, et aine osakestele on omane mingisuguse vahemaa tagant külgetõmbumine, ta eeldas aine osakeste vahel erilise keskkonna olemasolu, mis ongi külgetõmbe edasiandjaks. Newton luges seega võimatuks ühe keha mõju teisele teatud kauguselt ilma kehi eraldava, vahepealse keskkonna olemasoluta.

57. Keha mass ja kaal. On olemas kaks kehade kaalumise viisi: 1) vedrukaalul ja 2) kangkaalul. Kumbki viis erineb põhimõtteliselt teisest.

Kui vedrukaaluga mõõta ühe ja sama keha kaalu erinevatel kõrgustel Maa pinnast, siis võib märgata, et *kõrguse suurenedes keha kaal väheneb.*

See kaalu vähenemine on väike, kuid on tähtis, et see eksisteerib ja on kõikide kehade juures ühesugune, nimelt: tõusmisel väheneb keha kaal iga kilomeetri kohta umbes 0,0003 osa võrra oma suurusest. Kasutades vedrukaalu võib samuti kindlaks teha *keha kaalu ja koha geograafilise laiuse vahelise sõltuvuse:* lähenedes ekvaatorile väheneb keha kaal. Iga pooluselt ekvaatorile

toodud keha kaal väheneb ligikaudu 0,005 osa võrra kaalust poolusel.

Vedrukaaluga mõõdame jõudu, millega Maa tõmbab külge keha, s. t. mõõdame keha kaalu. Seega, **keha kaal ei ole muutumatu suurus: keha asukoha muutmisega muutub ka ta kaal.** Kui me kaalume keha aga kangkaalul, siis saame igas kohas ühe ja sama tulemuse, kuna sel korral määrame keha massi. Vaatleme seda lähemalt.

Olgu mingi kahe keha massid m_1 ja m_2, nende kehade kaalud ühes ja samas kohas Maal P_1 ja P_2 (g on mõlema keha jaoks ühesuurune).

Newtoni teise seaduse järgi võib kirjutada, et

$$P_1 = m_1 g; \quad (1)$$
$$P_2 = m_2 g. \quad (2)$$

Jagades võrduse (1) võrdusega (2), saame:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{m_1}{m_2}, \quad (3)$$

s. t. *kehade massid on võrdelised nende kaaludega.*

1 kg massi etalon kaalub tema hoiukohas 1 kG, seepärast on seal mingi keha massi arvuline väärtus meetermõõdu ühikutes võrdne tema kaalu arvulise väärtusega samades ühikutes. Teistes Maa kohtades ei ole niisugust kokkulangemist.

Siiski on Maal keha asukoha muutumisest põhjustatud kaalu muutumine tühine, nagu on näha eespool öeldust. Seepärast paljudel juhtudel me praktikas seda muutust ei arvesta. Seega enamikul juhtudel, *sõltumatult keha asukohast, me võime võtta meetermõõdu süsteemi ühikutes väljendatud kaalu arvulise väärtuse võrdseks massi arvulise väärtusega samades ühikutes.* Nii näiteks, kui mingi keha kaalub 100 G, siis ta mass grammides on ka 100 g, ja kui keha mass on 5 t, siis ta kaal on ka 5 T jne.

Järgnevas tabelis on antud massi ja kaalu iseloomustus.

Mass (m)	Kaal (P)
1. Kehas sisalduv aine hulk. Mehhaaniline mass avaldub keha inertsis ja kaalus.	1. Jõud, mis põhjustab vabalt langeva keha kiirenduse. Kaal on võrdne jõuga, millega keha rõhub liikumatule horisontaalsele alusele või venitab niiti, mille otsa ta on riputatud.
2. Suunata suurus (skalaar).	2. Suunaga suurus (vektor).
3. Antud keha puhul muutumatu suurus; ei sõltu keha asukohast.	3. Antud keha puhul muutuv suurus, sõltuv asukohast Maal.
4. $m = \frac{F}{a}$; $m = \frac{P}{g}$	4. $P = mg$.

Meetermõõdu süsteemis on massi- ja kaaluühikutel ühesugused nimetused.

Et eristada kaaluühikuid massiühikutest, on kokku lepitud järgmise tähistuse suhtes:

Massiühikud	Kaaluühikud
1 g (massi gramm)	1 G (jõu gramm)
1 kg (massi kilogramm)	1 kG (jõu kilogramm)
1 t (massi tonn)	1 T (jõu tonn)

Mõnede kehade massid

Vesinikuaatom	$1{,}675 \cdot 10^{-24}$ g	Veoauto ЗИС-150 (ilma koormata)	3900 kg
Vee molekul	$3 \cdot 10^{-23}$ g	Traktor ДТ-54	5400 kg
Liivatera	$1 \cdot 10^{-4}$ — $5 \cdot 10^{-4}$ g	Vedur ФД	120 t
Vintpüssi kuul	9,65 g	Liinilaev	25 000—50 000 t
Auto «Pobeda» (ilma koormata)	1530 kg		

Harjutus 36.

1. Üks õpilane väidab, et terve tellis langeb mingilt kõrguselt Maa peale kaks korda kiiremini kui pool tellist, kuna Maa tõmbab seda külge kaks korda suurema jõuga. Teine väidab, et terve tellis langeb kaks korda aeglasemalt, kuna ta on kaks korda inertsem. Kummal neist on õigus? Selgitada seda. Kontrollida katse teel.

2. a) Milline on tulemus, kui mõõta üht ja sama keha kangkaalul Elbruse jalamil ja ta tipul? Kas on keha kaal neis kahes kohas ühesugune?

b) Tundlikul vedrukaalul kaaluti üks keha mäejalamil ja teine keha samal kaalul sama mäe tipul. Kaalude näidud osutusid võrdseteks; kas on võrdsed ka nende kahe keha massid?

58. Erikaal ja tihedus. *Aine erikaaluks nimetatakse suurust, mida mõõdetakse sellest ainest koosneva keha kaalu P ja ta ruumala V suhtega.* Tähistades erikaalu tähega *d*, võime kirjutada:

$$d = \frac{P}{V}.$$

Sellest definitsioonist järgneb, et aine erikaal on arvuliselt võrdne keha ruumalaühiku kaaluga[1].

Erikaalu ühikuteks võivad olla: $1\ \frac{G}{cm^3}$, $1\ \frac{kG}{dm^3}$, $1\ \frac{T}{m^3}$ jne.

SI-süsteemis on erikaalu ühikuks $\frac{N}{m^3}$.

Erikaalu mõiste kõrval kasutatakse füüsikas aine tiheduse mõistet.

Aine tiheduseks nimetatakse keha massi ja tema ruumala suhet.

Tähistades tiheduse tähega *D*, võime kirjutada:

$$D = \frac{m}{V}.$$

[1] Eeldatakse, et keha on ühtlane ja koosneb vaadeldavast ainest.

SI-süsteemis on tiheduse ühikuks $\frac{kg}{m^3}$.

Aine tihedus on arvuliselt võrdne keha ruumalaühikus sisalduva massiga. Näiteks 1 cm^3 elavhõbedas on 13,6 g massi, järelikult on elavhõbeda tihedus $13{,}6\frac{g}{cm^3}$, kuid 1 cm^3 korgis on kõigest 0,24 g massi, järelikult on ta tihedus $0{,}24\ \frac{g}{cm^3}$.

Alljärgnevalt on toodud mõnede gaasiliste, vedelate ja tahkete ainete tiheduste tabel ühikutes $\frac{g}{cm^3}$, $\frac{kg}{dm^3}$, $\frac{t}{m^3}$.

Gaasid

(0° C ja 760 mm Hg rõhu puhul)

Lämmastik	0,00125		
Õhk	0,00129	Vesinik	0,00009
Hapnik	0,00143	Heelium	0,00018

Vedelikud

Etüüleeter 20° C juures	0,71
Bensiin 15° C juures	0,68—0,70
Etüülalkohol veeta 18° C juures	0,79
Petrooleum 15° C juures	0,79—0,82
Taimeõli	0,90—0,93
Puhas vesi 4° C juures	1,0
Merevesi 15° C juures	1,02—1,03
Piim 15° C juures	1,028—1,032

Tahked kehad

Kuusepuit (kuiv)	0,60	Tina	7,2—7,4
Kasepuit (kuiv)	0,72	Raud	7,7—7,8
Tammepuit (kuiv)	0,80	Valgevask	8,4—8,5
Jää	0,9	Vask	8,8—8,9
Magneesium	1,74	Hõbe	10,5
Tellis	1,8	Plii	11,4
Alumiinium	2,56—2,75	Kuld	19,3
Klaas	2,5—2,7	Plaatina	21,5
Tsink	7,0	Iriidium	22,4

Teades aine tihedust ja keha ruumala, võib määrata keha massi:

$m = DV$.

Võttes arvesse, et $P = mg = DVg$, asetame selle kaalu väärtuse erikaalu avaldisesse, saame: $d = Dg$.

Aine erikaal on võrdne aine tiheduse ja vaba langemise kiirenduse korrutisega.

Järelikult on erikaalu ja tiheduse vahel samasugune seos kui keha kaalu ja ta massi vahel. Kasutades seost $d = Dg$, on vaja, nagu kõikidel juhtudel, väljendada kõik suurused ühe süsteemi ühikutes.

Harjutus 37.

1. Määrata 1 m^3 vee, raua ja männipuidu mass.
2. Leida 1 t tammepuidu, 1 kg korgi ja 11 g kulla ruumala.
3. Millega võrdub vee erikaal *CGS*-süsteemis?
4. Plii tihedus on 11,4 $\frac{g}{cm^3}$. Millega võrdub plii erikaal $\frac{dyn}{cm^3}$ -tes, $\frac{G}{cm^3}$ -tes, $\frac{kG}{cm^3}$ -tes ja $\frac{T}{m^3}$ -tes?
5. Millega võrdub vee erikaal ja tihedus *SI*-süsteemis? Tehnilise süsteemi ühikutes?

59. Maa massi ja tiheduse määramine. Ülemaailmse gravitatsiooniseaduse järgi kahe keha vaheline vastastikune tõmbejõud

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Kui on teada jõud F, millega kaks keha vastastikku teineteist mõjustavad, ja neist ühe keha mass m_1, siis, teades kaugust nende vahel, võime määrata teise keha massi valemi järgi:

$$m_2 = \frac{Fr^2}{\gamma m_1}. \qquad (1)$$

Keha massiga $m_1 = 1$ g tõmmatakse Maa poole jõuga:

$$F = 1 \text{ g} \cdot 980 \frac{cm}{s^2} = 980 \text{ dyn}.$$

Kaugus keha ja Maa keskpunkti vahel on ligikaudu:

$$r = 6400 \cdot 10^5 \text{ cm}, \text{ kuid } \gamma = \frac{1}{15\,000\,000} \frac{dyn \cdot cm^2}{g^2}.$$

Asetades suuruste arvulised väärtused valemisse (1), võime arvutada Maa massi m_2:

$$m_2 = \frac{Fr^2}{\gamma m_1} = 980 \cdot 15\,000\,000 \cdot 6400^2 \cdot 10^{10} \text{ g} \approx 6 \cdot 10^{27} \text{ g}.$$

Kuna Maa ruumala V on umbes $1{,}1 \cdot 10^{21}$ m^3, siis keskmine Maa tihedus on ligikaudu $5{,}5 \frac{g}{cm^3}$.

Maa keskmine tihedus on peaaegu kaks korda suurem Maa kõva koore (litosfääri) uuritud osa keskmisest tihedusest. See on kooskõlas geoloogide oletusega, et Maa keskmine osa sisaldab endas suurel hulgal rauda.

Allpool on toodud mõnede taevakehade massid, nende keskmised tihedused ja vaba langemise kiirendused neil.

	Mass (g)	Tihedus $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$	Vaba langemise kiirendus $\left(\frac{cm}{s^2}\right)$
Maa	$5{,}98 \cdot 10^{27}$	5,5	980
Kuu	$7{,}34 \cdot 10^{25}$	3,3	160
Marss	$6{,}43 \cdot 10^{26}$	3,8	360
Päike	$1{,}99 \cdot 10^{33}$	1,4	27 500

Liikumise seadused või aksioomid.

Newtoni raamatust «Loodusfilosoofia matemaatilised alused». (Ladina keelest tõlkinud akad. A. N. Krõlov)

I seadus.

Iga keha jätkab püsimist paigalolekus või ühtlase ja sirgjoonelise liikumise olekus, kuni ja niivõrd, kui ta temale rakendatud jõudude mõjul ei ole sunnitud muutma seda olekut.

Visatud keha säilitab oma liikumise niikaua, kui teda ei aeglusta õhutakistus, ja seni, kuni raskusjõud ei sunni seda keha allapoole. Vurr, mille kõik osad vastastikuse kinnihoidmise tõttu üksteist kisuvad kõrvale sirgjoonelisest liikumisest, ei lakka pöörlemast (ühtlaselt), kuni seda pöörlemist ei aeglustata õhutakistusega. Suured planeetide ja komeetide massid, kohates vabas ruumis väiksemat takistust, säilitavad nii oma kulgeva kui ka pöörleva liikumise märksa pikema aja vältel.

II seadus.

Liikumishulga muutus on võrdeline rakendatud liikumapaneva jõuga ja toimub seda sirget mööda selles suunas, milles mõjub jõud.

Kui mingi jõud tekitab mingi liikumishulga, siis kahekordne jõud tekitab kahekordse, kolmekordne — kolmekordse, kas nad on rakendatud kõik koos ja korraga või järjestikku ja järk-järgult. See liikumishulk toimub alati samas suunas, milles mõjub teda tekitav jõud; kui keha juba oli liikumises, siis suundade ühtelangemisel liidetakse see keha liikumishulgaga, mis oli varem; vastupidisuse korral lahutatakse, kalduoleku korral liidetakse kaldu ja ühendatakse varemolnutega vastavalt nende igaühe suurusele ja suunale.

III seadus.

Mõju on alati võrdne ja vastassuunaline vastumõjuga, ehk kahe keha vastastikused mõjud teineteisele on omavahel võrdsed ja vastassuunalised.

Kui midagi rõhub mingile teisele või tõmbab seda, siis teda ennast selle viimasega rõhutakse või tõmmatakse. Kui keegi surub sõrmega vastu kivi, siis ka ta sõrme surutakse kivi poolt. Kui hobune veab köie külge seotud kivi, siis, vastupidi (kui nii võib väljendada), teda tõmmatakse niisama suure pingutusega kivi poole, kuna venitatud köis oma elastsuse tõttu avaldab ühesugust pingutust hobusele kivi poolt ja kivile hobuse poolt, ja niipalju kui köis takistab hobuse liikumist edasi, sedavõrd sunnib ta kivi liikuma edasi. Kui mingi keha, lüües vastu teist keha, muudab oma jõuga mõnevõrra selle liikumishulka, siis ta tunneb teise keha jõu poolt omaenese liikumishulgas samasugust muutust, kuid vastupidiselt suunatud, kuna nende kehade rõhumised teineteisele on alaliselt võrdsed. Niisugustest vastastikustest mõjudest tekivad alati võrdsed mitte kiiruste, vaid liikumishulkade muutused, eeldades muidugi, et kehad ei allu mingitele muudele mõjutustele. Kiiruste muutused, mis toimuvad samuti vastassuundades, on pöördvõrdelised kehade massidega, kuna liikumishulgad saavad võrdsed muutused. See seadus on õige ka külgetõmbe jaoks, nagu seda tõestatakse õpetuses.

VI PEATÜKK.

MEHHAANILINE ENERGIA.

60. Sissejuhatus. Tööl ja energial on inimese elus eriti tähtis osa. Mõlemad suurused on teineteisega tihedalt seotud. Et näiteks meie vabrikutes ja tehastes võiksid töötada mitmesugused tööpingid ja masinad, tuleb neid panna liikuma elektrimootoritega, mis vajavad elektrienergiat. Autod ja lennukid töötavad bensiini põlemisel tekkiva energia arvel, vedurid ja auruturbiinid kulutavad töötamisel kivisöes ja naftas peituvat energiat, veeturbiinid aga kõrgelt langeva vee energiat. Ja et elada ning töötada, peame ka meie ise uuendama energiat.

Igapäevases elus kasutatakse sageli sõnu «töö» ja «energia» teises, palju laiemas mõttes kui teaduses. Nii näiteks nimetatakse inimese tööks tema mitmeid tegevusi, sealhulgas ka vaimset. Seejuures me ei otsusta töö suuruse üle mitte selle tulemuste põhjal, vaid vahel selleks kulutatud aja järgi, sagedasti aga ka väsimuse astme järgi, mida ta tekitab meie organismis.

Mehhaanikas on töö ja sellega tihedalt seotud energia mõiste kitsamad, kuid seevastu enam piiritletud. Nende mõistetega tutvume lähemalt järgnevates paragrahvides.

61. Töö. Nihutades edasi vankrikest, tõstes koormat, lüües naela või venitades vedrut, teeme m e h h a a n i l i s t t ö ö d või lihtsalt t ö ö d.

Vaatleme, millega iseloomustatakse tööd.

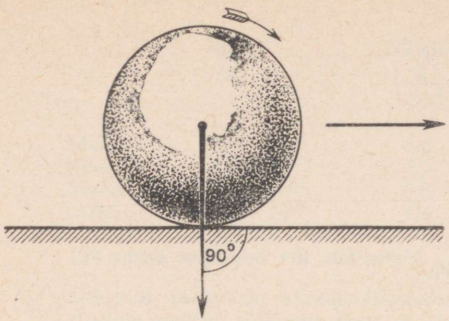
Rakendades jõudu liigutame vankrikest, tõstame koormat, nihutame naela või venitatava vedru otsi.

Kui ei ole nihkumist, siis ei ole ka tööd. Nii näiteks, kui nööri otsas rippuv koorem on liikumatu, siis temale mõjuv raskusjõud ei tee tööd. Koorma langemisel aga teeb raskusjõud tööd.

Teisest küljest, kui keha liigub inertsi tõttu, kohtamata takistust, ka siis ei tehta tööd. Järelikult, *kui kehale ei rakendu jõudu, siis tööd ei tehta.*

Seega *mehhaaniline töö kujutab endast protsessi, mille puhul toimub takistuse ületamine keha liikumisel.*

Kõigis liikuvates mehhanismides mõjuvad jõud, mis teevad tööd. Näiteks aurumasina silindris teeb tööd auru rõhumisjõud, lükates kolbi, puksiirauriku tõmbejõud teeb tööd praami vedamisel; tööd teeb ka jõud, mida avaldab ramminui vaiale selle löömisel pinnasesse.



Joon. 120. Veereva kera raskusjõud ei tee tööd.

Silmanähtavalt on mitmesugustel juhtudel jõu töö erinev. On täiesti loomulik lugeda tehtud tööd seda suuremaks, mida suurem on jõud ja mida kaugemale nihkub jõu rakenduspunkt. Näiteks, mida raskem on koorem ja mida suurem on kõrgus, millele seda tõstame, seda enam teeme tööd.

Töö suuruseks loetakse jõu korrutist jõu suunas läbitud teega.

Kui tähistada tööd tähega A, jõudu tähega F ja teed tähega s, siis võib kirjutada, et

$A = Fs$.

Seda valemit võib kasutada sel juhul, kui jõud F on muutumatu ja ta suund ühtib tee s suunaga.

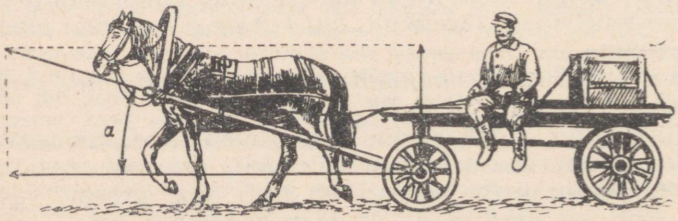
Kui jõu suund ühtib liikumise suunaga, siis töö $A = Fs$ on positiivne suurus. Sel juhul nimetatakse jõudu liikumapanevaks jõuks. Kui aga liikumine toimub jõu mõjule vastassuunas, siis on töö negatiivne: $A = -Fs$. Sel juhul nimetatakse jõudu F takistusjõuks.

Seega, *liikumapaneva jõu töö on positiivne, takistusjõu töö on negatiivne.*

Joonisel 120 on kujutatud horisontaalset lauda mööda veerev kera. Kerale mõjuv raskusjõud P on kera liikumise suunaga risti. Kera ei liigu raskusjõu suunas, järelikult raskusjõud tööd ei tee.

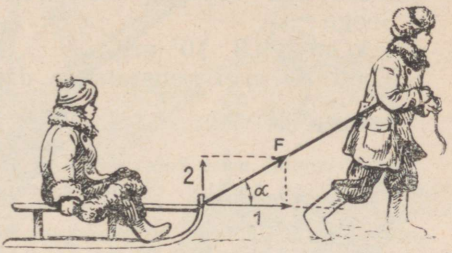
Üldiselt, *kui kehale mõjuva jõu suund on risti liikumise suunaga, siis niisuguse jõu töö võrdub nulliga.*

Nüüd vaatleme üldisemat töö juhtu, kus jõu suund moodustab liikumise suunaga mingi nurga α. Kaks niisugust juhtu on kujutatud joonistel 121 ja 122.



Joon. 121. Jõu suund moodustab liikumise suunaga nurga α.

Moodustagu jõud F (joon. 123) tee s suunaga nurga α. Lahutame selle jõu kaheks komponendiks: F_1 — suunatud risti teega s ja F_2 — tee suunas. Resultantjõu F töö on võrdne komponentjõudude F_1 ja F_2 tööde summaga. Kuid liikumissuunalise komponentjõu F_2 töö on $F_2 s$; jõu F_1 töö on null, kuna selle jõu suunas ei toimu mingit nihkumist.



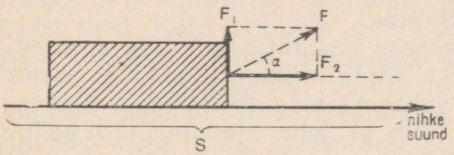
Joon. 122. Jõu suund moodustab liikumise suunaga nurga α.

Seega jõu F töö on $F_2 s$: $A = F_2 s$. Kuid $F_2 = F \cos \alpha$, järelikult

$A = Fs \cos \alpha$.

Tähendab, *üldjuhul on töö võrdne jõu ja käidud tee ning jõu ja tee suundade vahelise nurga koosinuse korrutisega.*

On kerge näidata, et valem $A = Fs \cos \alpha$ sisaldab kõik eespool käsitletud töö erijuhud. Kui $\alpha = 0$, s. t. jõu suund ühtib liikumise suunaga, siis sel juhul $A = Fs$; kui $\alpha = 90°$, s. t. jõud on risti liikumise suunaga, siis $A = 0$ ja lõpuks, kui $\alpha = 180°$, s. t. jõud on liikumisele vastassuunaline, siis töö $A = -Fs$.



Joon. 123. Töö valemi tuletamise juurde.

62. Tööühikud. *Tööühikuks on jõuühiku töö jõu suunaga ühtival teeühikul.*

1 tööühik = 1 jõuühik · 1 teeühik.

CGS-süsteemi tööühikuks on erg. *Erg on töö, mida teeb jõud 1 düün 1 cm pikkusel teel.*

$$1 \text{ erg} = 1 \text{ dyn} \cdot 1 \text{ cm} = 1 \text{ dyn} \cdot \text{cm} = 1 \text{ g} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}^2}.$$

SI-süsteemis on tööühikuks džaul (tähis J). *Džaul on töö, mida teeb jõud 1 njuuton 1 m pikkusel teel.*

1 džaul = 1 njuuton · 1 meeter = 1 njuuton-meeter = 1 N · m.

Tehnilises mõõduühikute süsteemis on tööühikuks kilogramm-meeter (kGm). *Kilogramm-meeter on töö, mida teeb jõud* 1 kG 1 m *pikkusel teel.*

1 kilogramm-meeter = 1 kG · 1 m = 1 kG · m.

Leiame seose tööühikute ergi ja džauli vahel. Kuna 1 njuuton $= 10^5$ dyn, 1 m $= 100$ cm, siis

1 J $= 1$ N $\cdot$ m $= 10^5$ dyn $\cdot 10^2$ cm $= 10^7$ dyn $\cdot$ cm $= 10^7$ erg.

Seega 1 J $= 10^7$ erg.

Seose kilogramm-meetri ja ergi vahel võib leida järgmistest võrdustest: 1 kG $= 980\,000$ dyn ja 1 m $= 100$ cm; siit 1 kG $\cdot$ m $=$ $= 980\,000$ dyn $\cdot 100$ cm $= 98\,000\,000$ dyn $\cdot$ cm $= 9{,}8 \cdot 10^7$ erg.

Seega

1 kGm $= 9{,}8 \cdot 10^7$ erg.

Tööd 10^7 ergi nimetatakse džauliks. Seega 1 kG $\cdot$ m $= 9{,}8$ J.

Harjutus 38.

1. Veeämbri mass koos veega on 15 kg. Vett täis ämber tõuseb ühtlaselt 10 m sügavusest kaevust. Arvutada seejuures tehtud töö ergides, džaulides ja kilogramm-meetrites.
2. Arvutada hobuse töö kilogramm-meetrites, kes mööda horisontaalset teed veab ühtlaselt koormat 2 T 0,5 km kaugusele. Hõõrdetegur on 0,02.
3. Lift, kaaluga 1,5 T, alustab tõusmist kiirendusega 1 $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Arvutada lifti töö kilogramm-meetrites tõusmise esimese 2 sek. vältel. Võtta $g = 10\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.
4. Kirjutage *CGS*-süsteemi tööühiku nimetus (dimensioon).

63. Võimsus. Ühe ja sama töö võivad erinevad masinad sooritada erineva ajaga.

Nii näiteks künnab linttraktor ДТ-54 tööpäeva jooksul ligi kaks korda suurema maatüki kui neljarattaline traktor СТЗ. Sammuv ekskavaator, mille kopp mahutab 14 kuupmeetrit (kuni 25 t) pinnast, tõstab tööpäevas vundamendiaugust välja 10 000 korda rohkem mulda kui üks mullatööline.

Masinate töövõime võrdlemiseks kasutatakse erilist suurust, mida nimetatakse v õ i m s u s e k s. Mida rohkem tööd võib masin teha antud ajavahemikus, seda suurem on ta võimsus, ja ümberpöördult — mida vähem tööd võib ta selle ajavahemiku vältel teha, seda väiksem on ta võimsus.

Seega, *võimsus iseloomustab mitmesuguste mootorite, masinate, mehhanismide, loomade ja inimese võimet teha suurem või väiksem hulk tööd antud ajavahemikus.*

Kõige lihtsam on iseloomustada masina võimsust tema poolt ajaühikus, näiteks ühes sekundis tehtud tööga.

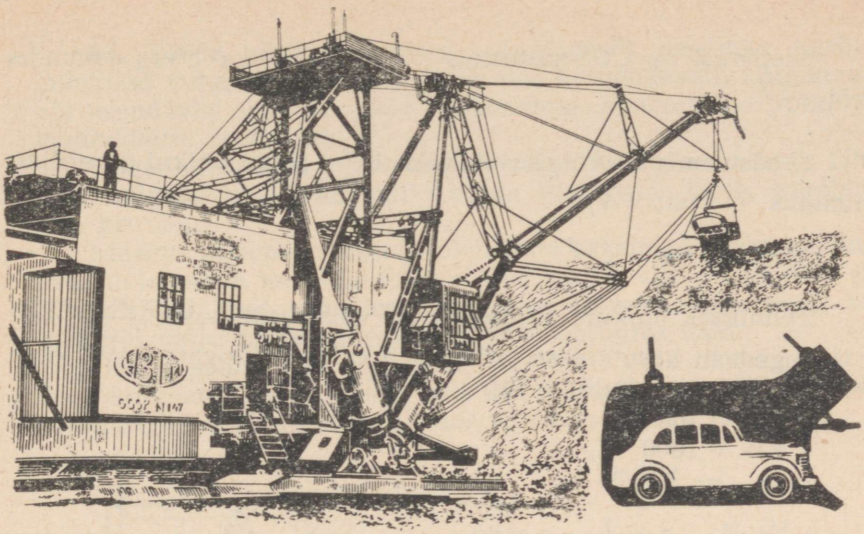
Tehtagu aja t sek. vältel tööd A kGm, siis 1 sekundis tehtud töö on $\frac{A}{t}\,\frac{\text{kG} \cdot \text{m}}{\text{s}}$. Selle suurusega iseloomustataksegi masina võimsust.

Võimsuseks nimetatakse suurust, mida mõõdetakse töö ja selle töö tegemiseks kulunud aja suhtega.

Tähistades võimsuse tähega N, võime kirjutada $N = \frac{A}{t}$.

Kui masin arendab võimsust N, siis tema poolt mingis ajavahemikus t tehtud töö määratakse valemi järgi

$A = Nt$.



Joon. 124. Sammuv ekskavaator. Paremal «Moskvitš» ekskavaatori kopas.

Valemi $N = \frac{A}{t}$ järgi määrame praktiliselt keskmise võimsuse; üksikutel hetkedel võib jõuallika võimsus olla keskmisest võimsusest suurem või väiksem. Nii näiteks mingite takistuste ületamisel (liikudes vastumäge, mööda porist teed jne.) arendab auto mootor $1^1/_2$—2 korda suuremat võimsust kui sõitmisel mööda tasast teed. Kuid kestvalt ei või mootor sellise võimsusega töötada: ta, nagu teada, kuumeneb üle.

Üksikutel lühikestel ajavahemikkudel, näiteks hüpetel, võib inimene arendada tema keskmisest võimsusest, millega ta töötab pikemat aega, mitu korda suuremat võimsust.

Kuna $A = Fs$, siis võimsus

$$N = \frac{Fs}{t}.$$

Võttes $\frac{s}{t} = v$, saame

$$N = Fv,$$

s. t. *võimsus on arvuliselt võrdne jõu ja kiiruse korrutisega.*

Kui me tõuseme mööda treppi üles kord käies, teine kord aga sama treppi mööda samale kõrgusele joostes, siis teeme mõlemal juhul ühepalju tööd. Kuid teisel juhul me tõuseme suurema kiirusega, kulutades selleks vähem aega kui esimesel juhul. Sellepärast on arendatav võimsus teisel juhul suurem kui esimesel.

Valem $N = Fv$ näitab, et jõuallika poolt arendatava ühe ja sama võimsuse puhul võib kiiruse muutmisega muuta veojõudu.

64. Võimsusühikud. *Võimsusühikuks on võetud niisugune võimsus, mille puhul ajaühikus tehakse tööd üks tööühik.*

Seepärast on *CGS*-süsteemis võimsusühikuks 1 erg sekundis või $1 \frac{\text{erg}}{\text{s}}$.

SI-süsteemis on võimsusühikuks $1 \frac{\text{J}}{\text{s}}$, sellel ühikul on eriline nimetus — vatt (W).

Seega $1\ \text{W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}}$.

Tehnilises ühikute süsteemis on võimsusühikuks $1 \frac{\text{kG} \cdot \text{m}}{\text{s}}$.

Sagedasti kasutatakse võimsusühikuid: hektovatt (hW), kilovatt (kW) ja hobujõud (hj).

$1\ \text{hW} = 100\ \text{W}$,

$1\ \text{kW} = 1000\ \text{W}$,

$1\ \text{hj} = 75 \frac{\text{kG} \cdot \text{m}}{\text{s}}$.

$1 \frac{\text{kG} \cdot \text{m}}{\text{s}} = 9{,}8 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 9{,}8\ \text{W}$.

Võimsuste tabel.

Inimene	0,05—0,1 hj
Hobune	0,8—0,9 hj
Sõiduauto mootor	
«Moskvitš»	45 hj
«Pobeda»	50 hj
ЗИЛ-110	140 hj
Veoauto mootor	
ГАЗ-51	70 hj
ЗИЛ-150	90 hj
ЯАЗ-200	110 hj
Traktori mootor	
ДТ-54	54 hj
Võimsa lennuki mootor	1000—2000 hj
NLKP XXII Kongressi nimeline Volga HEJ	2 530 000 kW
V. I. Lenini nimeline Volga HEJ	2 300 000 kW

Harjutus 39.

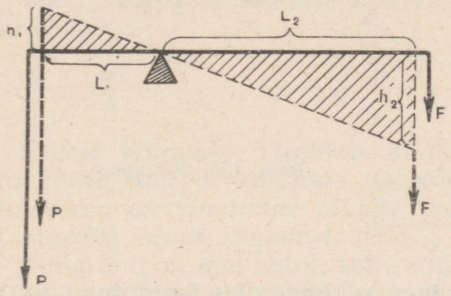
1. Arvuta, mitu $\frac{\text{erg}}{\text{s}}$ ja mitu vatti on 1 hj.
2. Arvuta täpsusega kuni 0,01, mitme hobujõuga on võrdne 1 kW.
3. Inimene, kes kaalub 75 kg, tõuseb joostes mööda treppi üles 12 m kõrgusele 0,25 minutiga. Määrata selle juures arendatav võimsus $\frac{\text{kG} \cdot \text{m}}{\text{s}}$-tes ja vattides.
4. Arendades võimsust 800 hj sõidab vedur ühtlaselt liikudes 20 sekundiga 0,3 km. Määrata veduri veojõud.
5. Kopa kaal koos sõega on 0,3 T. Määrata tõstekraana mootori võimsus, kui kopp tõuseb 5 sekundiga 15 m kõrgusele.
6. Määrata töö, mida teeb mootor võimsusega 100 kW 1 tunni jooksul.
7. Kuibõševi ehitusmehhanismide tehase poolt loodud võimas tornkraana võib tõsta koormat kaaluga 5 T. Kui pika ajaga tõstetakse niisugune koorem 20 m kõrgusele, kui tõstmisel rakendatakse võimsust 30 kW?

65. Tööde võrdsuse seadus. Ammustest aegadest kasutab inimkond mitmesuguseid masinaid, mis kergendavad, kiirendavad või asendavad inimese tööd. *Masinateks nimetatakse kõiki jõu muundamise seadmeid.*

Nagu uurimused näitavad, võib iga keerulise masina lahutada hulgaks lihtsateks, mille hulka kuuluvad: kang, kaldpind, kiil, kruvi jt.

Masina töölepanemiseks tuleb talle rakendada liikumapanev jõud (inimese ja loomade lihaste jõud, tuule, vee, auru, gaasi jm. rõhumisjõud), mis, mõjudes mingil teepikkusel, ületab teisel teepikkusel mõjuvat takistusjõudu, tehes seejuures tööd.

Üht ja sama tööd võib teha erinevalt. Võib näiteks suurendada ärakäidud teed, vähendades sama arv korda jõudu; ümberpöördult, võib jõudu suurendades vähendada ärakäidud teed.



Joon. 125. Kang.

Joonisel 125 on näidatud, et kangi pikemale õlale rakendatud jõu F mõjul tõuseb kangi lühemale õlale rakendatud koormus P. h_1 ja h_2 on jõudude P ja F rakenduspunktide poolt ärakäidud teed.

Mõõtmised näitavad, et jõud on pöördvõrdelised teedega:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{P}{F}.$$

Seega kangi nihutamisel võidetakse jõus nii mitu korda, kui mitu korda kaotatakse teepikkuses. Kuid liikumapaneva jõu ja takistusjõu poolt tehtud tööd on võrdsed:

$$Fh_2 = Ph_1.$$

Kangi abil tehtud töö vaatlemisel saadud järeldused on õiged iga masina kohta. Need järeldused väljendavad ühte mehhaanika tähtsamat seadust: *nii mitu korda võidame jõus, kui mitu korda kaotame tees.* Üheaegselt ei või võita tees ja jõus.

Seda seadust nimetatakse mehhaanika kuldreegliks. Seda kasutasid laialdaselt oma töödes Leonardo da Vinci, Galilei ja Newton. Galilei arvas, et selle reegli avastas vana-kreeka teadlane Aristoteles. Kuid pole kahtlust selles, et inimkond kasutas praktikas seda reeglit juba ammu enne Aristotelest.

Tähistame masina poolt ületatavat takistusjõudu tähega F_2,

tema rakenduspunkti nihet tähega s_2, rakendatud liikumapanevat jõudu tähega F_1 ja selle rakenduspunkti nihet tähega s_1. Siis võib mehhaanika kuldreegli kirjutada järgmiselt:

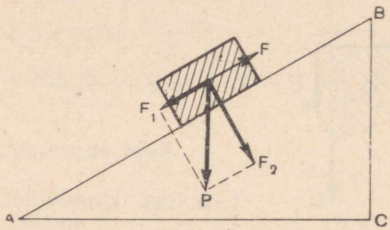
$$F_1 s_1 = F_2 s_2.$$

Kui ei arvestata kadusid hõõrdele ja muude kahjulike takistuste ületamisele, siis *liikumapaneva jõu töö on võrdne takistusjõu tööga.* Niisugusel kujul väljendatud mehhaanika kuldreegel kujutab endast t ö ö d e j ä ä v u s e s e a d u s t.

Ühegi masinaga ei võideta töös.

See loodusseadus on osutunud teaduse ja tehnika arenemises väga viljakaks. See oli aluseks üldisema loodusseaduse — energia jäävuse ja muundumise seaduse püstitamisele (§ 77).

Vaatleme tööde võrdsuse seaduse praktilise kasutamise näiteid.



Joon. 126. Kaldpind.

66. Tööde võrdsuse seaduse rakendamine kaldpinna juures. Joonisel 126 on kujutatud kaldpinna *ABC* skeem. Kasutades tööde võrdsuse seadust, tuletame seose kaldpinda mööda keha tõstmiseks vajaliku jõu *F* ja keha kaalu *P* vahel.

Kui tõsta keha ühtlaselt mööda kaldpinda üles, siis hõõrde puudumisel on keha ülespoole nihutamiseks vajalik jõud *F* võrdne keha allapoole tõmbava jõuga F_1.

Töö, mida tehakse keha nihutamisel mööda kaldpinda, mille pikkus $l = AB$, on Fl. Koorma *P* ümberpaigutamisel piki vertikaaljoont kõrgusele $h = BC$ tehakse tööd Ph. Tööde võrdsuse seaduse järgi

$$Fl = Ph,$$

millest

$$F = P\,\frac{h}{l}\,.$$

Samasuguse seose jõudude *F* ja *P* vahel annab ka jõu lahutamine komponentideks (§ 42 *a*).

Harjutus 40.

Kasutades ühtlaselt kiireneva liikumise seadusi ja teades kiirendust liikumisel mööda kaldpinda, tõestage, et keha kiirus kaldpinna lõpul on võrdne kaldpinna kõrguselt vabalt langeva keha kiirusega.

67. Tööde võrdsuse seaduse rakendamine kruvi juures. Tungraud. Suurte raskuste tõstmisel kasutatakse sageli erilist mehhanismi, mida nimetatakse t u n g r a u a k s. Tungraud kujutab endast liikuva kruvi ja kangi ühendust (joon. 127).

Loobudes hõõrde arvestamisest kasutame tööde võrdsuse seadust tungraua juures.

Tungraua käepidemele kruvi teljest kaugusele l on rakendatud liikumapanev jõud F. Tõstetav koorem (auto, vagun jne.) mõjub tungraua peale ülalt alla jõuga Q. Samasuguse jõuga mõjub tungraua pea koormale alt üles.

Tungraua käepideme ühe tiiruga läbib sellele rakendatud jõu rakenduspunkt tee, mis on võrdne ringjoone pikkusega $2\pi l$. Seejuures sooritatud töö $A_1 = F \cdot 2\pi l$.

Samal ajal tõuseb koormat tõstva jõu Q rakenduspunkti kruvi sammu kõrguse h võrra. Seejuures sooritatakse töö $A_2 = Q \cdot h$.

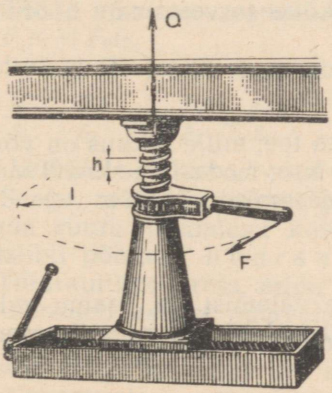
Tööde võrdsuse seaduse põhjal: $A_1 = A_2$ ehk $F \cdot 2\pi l = Q \cdot h$, millest

$$\frac{Q}{F} = \frac{2\pi l}{h}.$$

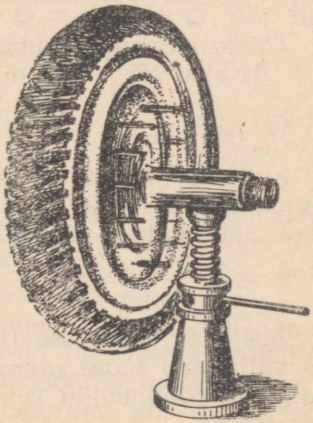
Sellest võrdusest järeldub, et *tõstetava koorma kaal on nii mitu korda suurem tungraua käepidemele rakendatud jõust, kui mitu korda on ringjoone pikkus, mida mööda liigub käepideme ots, suurem kruvi sammust.*

Tungraud on igal autol; selle abil tõstab autojuht üles masina, kui tahab ratastel vahetada kumme, ja paljudel teistel juhtudel (joon. 128).

Tungrauda kasutatakse laialdaselt ka vagunite tõstmisel raudteetranspordis, samuti ka ehitustöödel.



Joon. 127. Kruvitungraud.

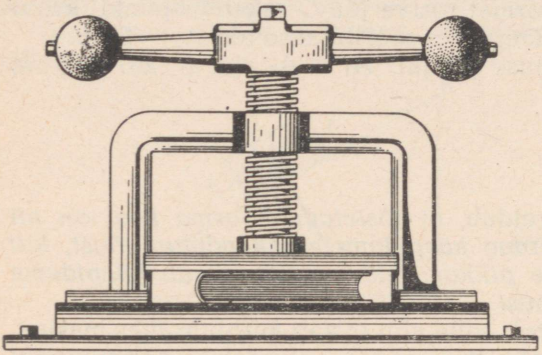


Joon. 128. Tungraua kasutamine.

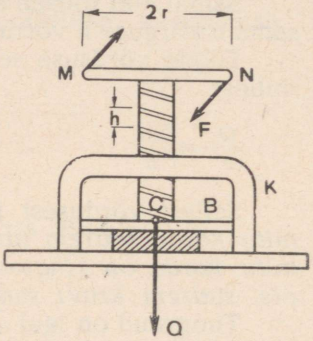
68. Kruvipress. Joonisel 129 on kujutatud käsitsi töötav kruvipress, mida tavaliselt kasutatakse köitmistöödel. Kasutades tööde võrdsuse seadust, arvutame, mitu korda on kruvipressis esemele mõjuv rõhumisjõud suurem pressile rakendatud jõust. Vaatame pressi skeemi (joon. 130).

Kruvi avaldab liikumatusse raami K sissekruvimisel pressi alla pandud esemele rõhumisjõudu Q. Olgu kruvi käepideme pikkus $2r$ ja kruvi samm h. Kruvi käepidemele on punktides M ja N rakendatud kaks võrdset jõudu F, millede vektorid on risti käepidemega.

Tähistame jõudude F ja F rakenduspunktide *(M* ja *N)* nihke tähega s, kuid tähega z — jõu Q rakenduspunkti *(C)* nihke.



Joon. 129. Kruvipress.



Joon. 130. Jõudude Q ja F vahelise seose väljendamiseks.

Sellel nihkel mõlemate jõudude F poolt tehtud töö $A_1 = 2F \cdot s$, kuid jõu Q töö $A_2 = Q \cdot z$.

Tööde võrdsuse seadusega kooskõlas (arvestamata hõõret) on $A_1 = A_2$ ehk $2Fs = Qz$, millest

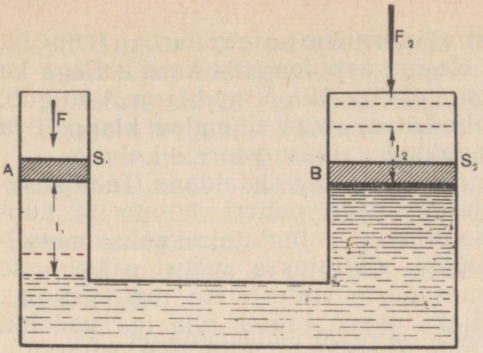
$$Q = 2F \cdot \frac{s}{z}. \qquad (1)$$

Kui kruvi käepideme ots käib ära tee, mille pikkus on võrdne ringjoone pikkusega $2\pi r$, siis nihkub kruvi edasi ühe kruvi sammu võrra. Selle põhjal võime kirjutada järgmise võrduse:

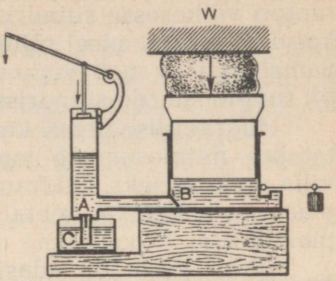
$$\frac{s}{z} = \frac{2\pi r}{h}. \qquad (2)$$

Asetades valemisse (1) avaldise valemist (2), saame valemi, mis väljendab seose pressile rakendatud jõu ja pressilt esemele avaldatud rõhumisjõu vahel:

$$Q = \frac{4\pi r}{h} \cdot F.$$



Joon. 131. Ühendatud silindrid kolbidega.



Joon. 132. Hüdraulilise pressi ehituse skeem.

69. Hüdrauliline press. Vedeliku omadust anda edasi temale avaldatud rõhku ja olla praktiliselt mittekokkusurutav kasutatakse mitmesuguste hüdrauliliste masinate ehitamisel.

Joonisel 131 on kujutatud kaks ühendatud silindrit koos kolbidega *A* ja *B*. Silindrid kolbide all on täidetud vedelikuga. Mõjugu kolbidele jõud F_1 ja F_2. Vaatleme, milline on tasakaalu korral nende jõudude suhe, kui kolbide pindalad on vastavalt S_1 ja S_2. Kasutame selleks tööde võrdsuse seadust.

Laskugu kolb *A* jõu F_1 mõjul pikkuse l_1 võrra. Seejuures tehakse tööd F_1l_1. Kolvi laskumisel surutakse vasakpoolsest silindrist välja vedelik ruumalaga S_1l_1. See vedelik läheb üle parempoolsesse silindrisse, seejuures tõuseb kolb *B* selles silindris kõrguse l_2 võrra, mille võib määrata võrdusest:

$$S_1l_1 = S_2l_2. \qquad (1)$$

Kolvi *B* tõstmisel kõrguse l_2 võrra tehakse tööd, mis on võrdne F_2l_2.

Tööde võrdsuse seaduse põhjal võib kirjutada:

$$F_1l_1 = F_2l_2. \qquad (2)$$

Võrdustest (1) ja (2) järeldub, et

$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2} \text{ ehk } \frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1}{S_2},$$

s. t. *kolbidele mõjuvad jõud on võrdelised kolbide pindaladega.*

Seega, mõjudes väikese pindalaga kolvile väikese jõuga, võib ületada suure pindalaga kolvile mõjuvat suurt takistust. Sellel printsiibil põhineb h ü d r a u l i l i s e p r e s s i ehitus.

Hüdrauliline press, mille ehituse skeem on näidatud joonisel 132, koosneb kahest omavahel ühendatud tugevast metallsilindrist, milledes on kolvid. Silindrid on ühendatud metalltoruga ja täidetud õliga. Pressitav ese asetatakse suurema kolviga ühendatud platvormile ja surutakse sellega ülemise liikumatu platvormi *W* vastu. Väikese kolvi käepideme tõstmisel üles kerkib

klapp A, mis ühendab väikest silindrit lisareservuaariga C, ja õli tungib väikesesse silindrisse. Kolvi käepideme ja koos sellega ka kolvi allavajutamisel rõhutakse kolviga õlile ning klapp A sulgub. Samal ajal avaneb väikest silindrit suurega ühendav klapp B ja õli tungib suurde silindrisse, avaldades rõhku suurele kolvile.

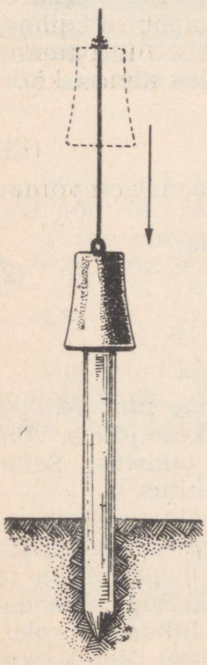
Hüdraulilise pressi kasutamisala on väga laialdane. Teda kasutatakse mitmesuguste materjalide, nagu paberi, heinte ja puuvilla pressimiseks. Hüdraulilise pressiga painutatakse pakse metallplaate, stantsitakse metallesemeid, muljutakse avausi paksudesse plaatidesse, proovitakse mitmesuguste materjalide tugevust jne. Üldse võib jõu edasiandjaks pressi juures olla iga vedelik. Siiski kasutatakse tehnikas kõige sagedamini õlipresse. Hüdrauliliste presside abil on arendatud jõudu enam kui 10 000 T.

70. Lihtmasinate kasutegur. Töö sooritamisel ei tule ületada mitte ainult kasulikku takistust, vaid ka kahjulikku, näiteks hõõrdetakistust masina liikuvates osades.

Seepärast on liikumapaneva jõu poolt tehtud kogu töö alati suurem kasulike takistuste ületamisel tehtud tööst (seda nimetatakse kasulikuks tööks).

Kasuliku töö suhet kogu tööga nimetatakse masina kasuteguriks.

Kui näiteks kaldpinda mööda ilma hõõrdumiseta tõstmiseks on vaja jõudu F, siis hõõrdumise puhul tuleb kehale rakendada jõudu $F + f$, ainult siis võime keha ühtlaselt nihutada mööda kallakut üles.



Seejuures tehtud kasulik töö on võrdne $Ph = Fl$. Kogu töö on aga $(F + f)l$.

Kaldpinna kasutegur η leitakse võrdusest:

$$\eta = \frac{Fl}{(F + f)l} = \frac{F}{F + f}.$$

Selliselt leitakse iga lihtmasina kasutegur.

71. Energia. Seni kõnelesime tööst. Tööga on tihedalt seotud teine, samuti eriti tähtis füüsikaline suurus — energia.

Kui keha või mitu isekeskis vastastikku mõjuvat keha (kehade süsteem) on võimelised tegema tööd, siis neil on olemas energia.

Energia on näiteks maapinna suhtes teatavale kõrgusele tõstetud koormal, kuna ta sellelt kõrguselt langemisel võib teha tööd. Raske keha (rammimisnuia) langemist kasutatakse näiteks vaia löömiseks pinnasesse (joon. 133). Vaia löömisel pinnasesse ületatakse pinnase takistusjõudu, tähendab tehakse tööd.

Joon. 133. Vaia löömine pinnasesse.

Seega **energia on suurus, mis iseloomustab keha või kehade süsteemi töötegemise võimet.**

Asugu näiteks koorem kaaluga 10 kG 5 m kõrgusel. Sellelt kõrguselt langemisel tehakse tööd $A = 10\ \text{kG} \cdot 5\ \text{m} = 50\ \text{kG} \cdot \text{m}$.

See suurus määrabki 5 m kõrgusel asuva keha energiat, kui maapinnal asuva koorma energia loeme võrdseks nulliga.

Seega, *võimaliku töö suurus määrab ära keha või kehade süsteemi energiavaru.*

Siit on näha, et energiat mõõdetakse samade ühikutega, millega töödki.

72. Potentsiaalne energia. Energiat, mille määrab kehade (näiteks keha ja Maa) või ühe ja sama keha osade vastastikune asend, nimetatakse potentsiaalseks energiaks.[1]

Potentsiaalse energia näiteks on maapinna suhtes mingile kõrgusele tõstetud keha energia. Kui tinglikult lugeda maapinnal asuva keha potentsiaalne energia nulliks, siis teatud kõrgusele tõstetud keha potentsiaalset energiat mõõdetakse tööga, mida teeb raskusjõud selle keha langemisel maapinnale.

Kui keha kaaluga P on tõstetud kõrgusele h, siis ta langemisel tehtud töö A on võrdne keha kaalu P ja langemise kõrguse h korrutisega, s. t. $A = Ph$. Tähistame keha potentsiaalse energia tähega W_p. Kuna $W_p = A$ ning $P = mg$, siis võime kirjutada:

$$W_p = A = mgh.$$

Näiteks keha massiga $m = 10$ g omab kõrgusel $h = 100$ cm potentsiaalse energia

$$W_p = 10\ \text{g} \cdot 980\ \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} \cdot 100\ \text{cm} = 980\,000\ \frac{\text{g} \cdot \text{cm}^2}{\text{s}^2}\ \text{ehk}\ 980\,000\ \text{erg}.$$

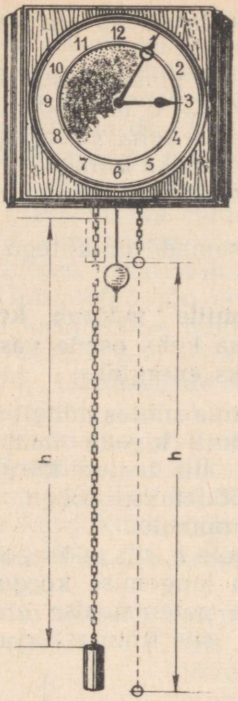
10 m kõrgusel on kehal kaaluga 5 kG potentsiaalne energia $W_p = 5\ \text{kG} \cdot 10\ \text{m} = 50\ \text{kG} \cdot \text{m}$.

Potentsiaalset energiat kasutatakse näiteks vihtidega kellades (joon. 134). Tõstes vihi kaaluga P kõrgusele h, teeme tööd $A = Ph$, millise suuruse võrra suureneb vihi potentsiaalne energia $W_p = A = Ph$. Hiljem kasutatakse seda energiat kella mehhanismi liikumapanekuks; selle juures viht laskub, s. t. ta potentsiaalne energia väheneb.

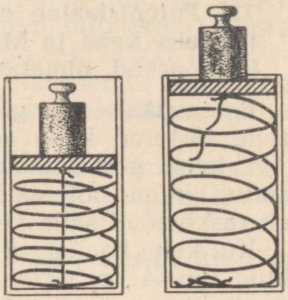
Potentsiaalne energia on hüdroelektrijaama paisu taha ülespaisutatud veel. Langedes alla paneb vesi liikuma hüdroelektrijaama turbiinid.

Potentsiaalset energiat ei ole mitte ainult maapinna suhtes kõrgemale tõstetud kehadel. Näiteks vedru venitamisel või kokkusurumisel tehakse tööd (joon. 135). Seejuures muudavad vedru üksikud osad oma asendit üksteise suhtes. Venitatud või kokku-

[1] Sõna potentsiaal tuleneb ladinakeelsest sõnast *potènta*, mis tähendab võimet.



Joon. 134. Ülestõstetud vihi potentsiaalset energiat kasutatakse kella tööks.



Joon. 135. Kokkusurumisega antakse vedrule potentsiaalset energiat.

surutud vedru saab potentsiaalset energiat, mille arvel ta võib teha tööd, kui vedru lahti lasta.

Kokkusurutud vedrude potentsiaalset energiat kasutatakse näiteks püsside lööknõela liikumapanemiseks. Kui vintpüssi lukk seatakse laskeasendisse, siis luku vedru surutakse kokku, sellega varutakse temasse potentsiaalset energiat. Kui vajutada päästikule, tõukab vabanenud vedru lööknõela, mis lööb sütikule ning süütab sel teel padrunis oleva püssirohulaengu.

Kokkukeeratud vedrude energiat rakendatakse kellades, grammofonides ja mitmesugustes tööstuses toodetavates mänguasjades.

Autodel, vagunitel ja tõldadel vedrud deformeerudes vähendavad tõukeid.

Potentsiaalset energiat on igal elastsel deformeeritud kehal.

Kokkusurutud gaasi potentsiaalset energiat kasutatakse lahtiraiumishaamrites, mida laialdaselt rakendatakse mäetööstuses, teede ehitamisel, kõva pinnase väljavõtmisel jne.

Elastselt deformeeritud keha potentsiaalset energiat mõõdetakse selle tööga, mida tehakse keha deformeerimisel.

73. Kineetiline energia. Tutvusime potentsiaalse energiaga, mille määrab kehade asend. Kuid kehadel on energiat mitte ainult

seetõttu, et neil on teatud asend, vaid ka sellepärast, et nad liiguvad. Mingil kõrgusel horisontaalselt lendav mürsk, kohates oma teel mingit takistust (näiteks lennukit), läbib selle, ületades takistust, s. t. teeb tööd. Seejuures ei pruugi mürsu potentsiaalne energia muutuda. Mürsk teeb töö oma kiirusest tingitud energia arvel, mis seejuures väheneb.

Kiiruse tõttu võib keha liikuda üles, ületades seejuures raskusjõudu, s. t. tehes tööd.

Seega on igal liikuval kehal energiat.

Energiat, mis kehal on tema liikumise tõttu, nimetatakse liikumisenergiaks ehk kineetiliseks energiaks.

Kui paigaloleva keha kineetiline energia lugeda nulliks, siis on kineetiline energia võrdne selle tööga, mis tehakse keha kiiruse vähenemisel nullini.

Et selgitada, millest sõltub kineetilise energia suurus, kasutame katset.

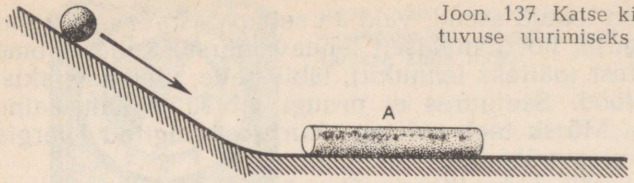
Joonisel 137 on kujutatud kaldrenn, millega on liidetud horisontaalrenn. Horisontaalrennil lamab väike sile puusilinder *A*. Kui lasta langeda mööda kaldpinda metallkuulike, siis pärast kaldpinnalt allaveeremist lööb kuulike vastu puusilindrit ja nihutab seda mingile kaugusele, s. t. teeb tööd.

Laseme kuulikest veereda erinevatelt kõrgustelt. Märkame, et mida kõrgemalt veereb alla kuulike, seda suurem on ta kiirus, millega ta põrkab vastu silindrit, ja seda kaugemale nihutatakse silindrit.

Selles katses libiseb puusilinder mööda horisontaalrenni pärast põrget väikese kiirusega, seepärast võib hõõrdejõudu lugeda muutumatuks. Mida kaugemale nihkub silinder, seda rohkem tegi kuulike tööd, seda enam oli kuulikesel kineetilist energiat enne põrkamist vastu silindrit. Seega sõltub kineetiline energia keha kiirusest.

Kui teha katse kuulikestega, millede massid on erinevad, siis võib veenduda selles, et kuuli-

Joon. 136. Suure voolamiskiirusе tõttu on veel mägijõekestes palju kineetilist energiat, mida võib kasutada hüdroelektrijaamades.



Joon. 137. Katse kineetilise energia sõltuvuse uurimiseks keha kiirusest.

kese kineetiline energia on seda suurem, mida suurem on ta mass.

Üeldust on selge, et keha kineetiline energia sõltub keha massist ja kiirusest. Tuletame selle sõltuvuse muutumatu jõu mõjul toimuva keha sirgjoonelise liikumise kohta.

Et panna keha liikuma, on vaja temale mõjuda mingi jõuga F, on tarvis teha tööd mingil teepikkusel s. Kui mitte arvestada hõõret ja õhutakistust, siis on jõu F töö tulemuseks keha kiiruse muutus. Jääva jõu mõjul liigub keha ühtlaselt kiirenevalt.

Kuna $F = ma$ ja $s = \frac{v^2}{2a}$, siis jõu F töö

$$A = Fs \text{ ehk } A = \frac{mav^2}{2a} = \frac{mv^2}{2}.$$

Avaldis $\frac{mv^2}{2}$ määrab keha kineetilise energia (W_k) suuruse

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

Näide 1. Arvutame kuuli kineetilise energia, mis lendab püssist välja kiirusega $v = 600 \frac{m}{s}$, kuuli mass on 7,5 g.

Väljendame kuuli kineetilise energia *CGS*-süsteemi ühikutes ergides. Selleks tuleb valemis $\frac{mv^2}{2}$ kuuli mass ja kiirus väljendada samuti *CGS*-süsteemi ühikutes.

$$v = 600 \frac{100 \text{ cm}}{\text{s}} = 60\,000 \frac{\text{cm}}{\text{s}};$$

$$W_k = \frac{7{,}5 \text{ g} \left(60\,000 \frac{\text{cm}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 1{,}35 \cdot 10^{10} \frac{\text{g} \cdot \text{cm}^2}{\text{s}^2} = 1{,}35 \cdot 10^{10} \text{ erg}.$$

Näide 2. Lennuk kaaluga 2000 kG liigub kiirusega 360 $\frac{km}{h}$. Väljendada lennuki kineetiline energia džaulides.

Alguses kirjutame, millega võrdub mass ja kiirus selle süsteemi ühikutes.

$$m = 2000 \text{ kg}, \; v = 360 \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 100 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

$$W_k = \frac{mv^2}{2}\ ;\ W_k = \frac{2000\ \text{kg} \cdot \left(100\ \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 10^7\ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} = 10^7\ \text{J}.$$

Näide 3. Määrata tehnilise süsteemi ühikutes — kilogramm-meetrites — vaguni kineetiline energia, kui vagun kaalub 39,2 T ja ta liigub kiirusega 36 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$.

Alguses väljendame vaguni massi ja kiiruse tehnilise süsteemi ühikutes. $m = \frac{39\,200\ \text{kG}}{9{,}8\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 4000\ \frac{\text{kG} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$;

$$v = 36\ \frac{1000}{3600}\ \frac{\text{m}}{\text{s}} = 10\ \frac{\text{m}}{\text{s}}\ ;$$

$$W_k = \frac{mv^2}{2}\ ;\ W_k = \frac{4000\ \frac{\text{kG} \cdot \text{s}^2}{\text{m}} \cdot 100\ \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{2} = 200\,000\ \text{kG} \cdot \text{m}.$$

74. Langeva keha koguenergia. Vaatleme, kuidas muutub vabalt langeva keha potentsiaalne ja kineetiline energia.

Asugu keha massiga m kõrgusel h (joon. 138). Kuni keha ei liigu, ta kineetiline energia $W_k = 0$. Keha potentsiaalne energia $W_p = mgh$.

Keha koguenergia on võrdne mõlemat liiki energiate summaga, s. t.

$$W_p + W_k = mgh.$$

Määrame keha, mille mass on m, kineetilise ja potentsiaalse energia muutuse pärast t sekundi möödumist langemise algusest.

Keha langemisel väheneb kõrgus, seega väheneb ka ta potentsiaalne energia. Langedes t sekundit, väheneb kõrgus suuruse $\frac{gt^2}{2}$ võrra. Potentsiaalse energia kahanemine selle aja sees väljendub suurusega

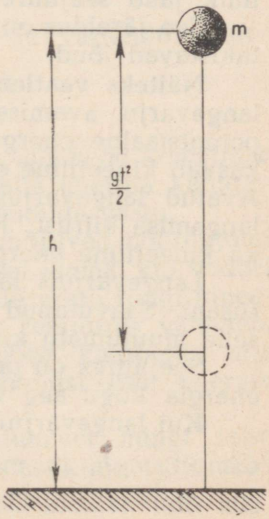
$$W_p^1 = mg\ \frac{gt^2}{2} = \frac{mg^2t^2}{2}\ . \qquad (1)$$

Keha potentsiaalne energia kujuneb võrdseks tema algväärtuse ja ajavahemikus t toimunud kahanemise vahega.

$$W_p = mgh - \frac{mg^2t^2}{2}\ . \qquad (2)$$

Teisest küljest, t sekundiga kasvab keha kiirus suuruse $v = gt$ võrra; järelikult kasvab ka ta kineetiline energia. Kineetilise energia juurdekasvu väljendab suurus

$$W_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{mg^2t^2}{2}\ . \qquad (3)$$



Joon. 138. Keha langeb ülevalt.

Võrreldes avaldist (3) potentsiaalse energia kahanemise suurust väljendava avaldisega (1), näeme, et *keha potentsiaalse energia kahanemine mingil ajavahemikul on võrdne kineetilise energia juurdekasvuga samal ajavahemikul.*

Seega, keha langemisel muundub potentsiaalne energia kineetiliseks.

On samuti arusaadav, et keha liikumisel vertikaalselt üles muundub kineetiline energia potentsiaalseks.

Liites avaldised (2) ja (3), saame keha koguenergia suuruse:

$$W = W_p + W_k;\ W = mgh - \frac{mg^2t^2}{2} + \frac{mg^2t^2}{2} = mgh.$$

Keha maapinnale langemise hetkeks on kehas olev potentsiaalne energia täielikult muundunud kineetiliseks:

$$W_p = 0;\ W_k = \frac{mv^2}{2};\ \text{kuna } v^2 = 2gh,\ \text{siis } W_k = mgh.$$

Keha koguenergia $W = W_p + W_k = 0 + mgh = mgh$.

Seega, *keha langemisel kõrguselt h on kineetilise ja potentsiaalse energia summa kogu langemise ajal võrdne suurusega mgh, s. t. jääb muutumata.*

See järeldus on ühe tähtsama loodusseaduse — energia jäävuse ja muundumise seaduse — erijuhus.

75. Hõõrdejõudude ja keskkonna takistuse ületamise töö. Kehade liikumisenergiat (kineetilist energiat) ja kehade vastastikuse asendiga määratavat energiat (potentsiaalset energiat) nimetatakse tavaliselt mehhaaniliseks energiaks, kuna neid energia liike vaadeldakse mehhaanikas.

Keha vabal langemisel nägime, et potentsiaalne ja kineetiline energia võivad üksteiseks üle minna. Mehhaanilise energia kogu hulk jääb seejuures muutumatuks.

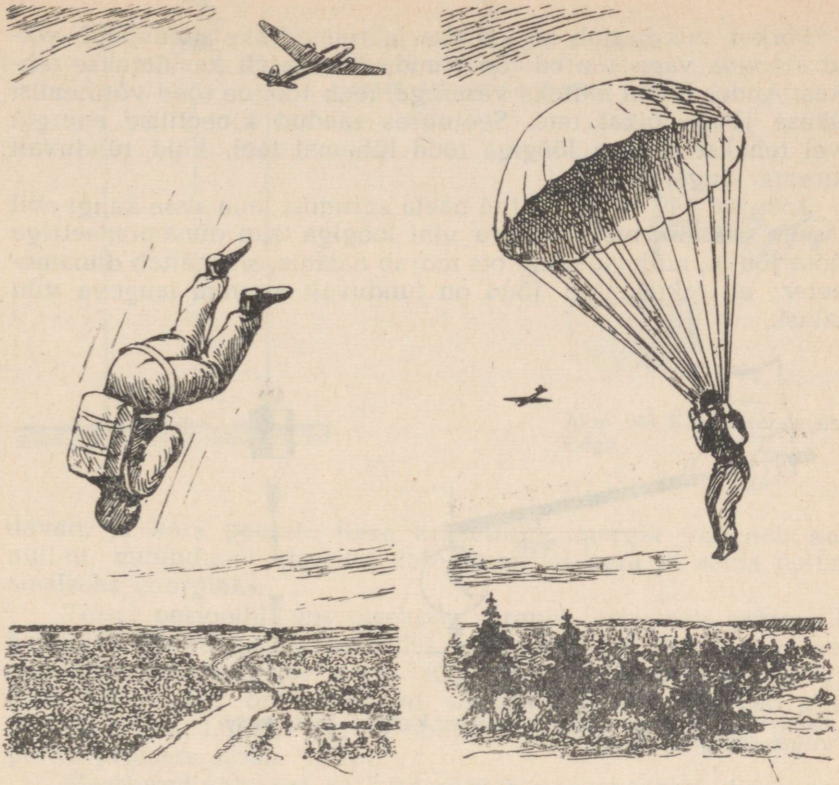
See järeldus on aga õige ainult juhul, kui puuduvad liikumist takistavad jõud.

Näiteks vaatleme langevarjuri liikumist (joon. 139). Kuni langevarju avamiseni liigub langevarjur alla kiirendusega. Ta potentsiaalne energia kahaneb. Selle energia kahanemise arvel kasvab kineetiline energia ja tehakse tööd õhu takistusjõu vastu. Avatud langevarjule mõjuv suurenenud õhutakistus vähendab langemise kiirust. Järelikult väheneb nüüd nii potentsiaalne kui ka kineetiline energia.

Langevarjuri langemise kiirus väheneb kuni määratud suuruseni. Saavutanud selle kiiruse, jätkab langevarjur langemist selle muutumatu kiirusega.

Seejuures on ta kineetiline energia muutumatu, potentsiaalne energia kogu aeg väheneb (kõrgus maapinnast väheneb).

Kui langevarjuri potentsiaalne energia kõige kõrgemas asendis on mgh, ta maandumise momendil kineetiline energia $\frac{mv^2}{2}$, siis õhu takistusjõu ületamise töö langevarjuri langemisel on



Joon. 139. Langevarjuhüpe.

võrdne mehhaanilise energia kahanemisega ja väljendub valemiga

$$A = mgh - \frac{mv^2}{2}.$$

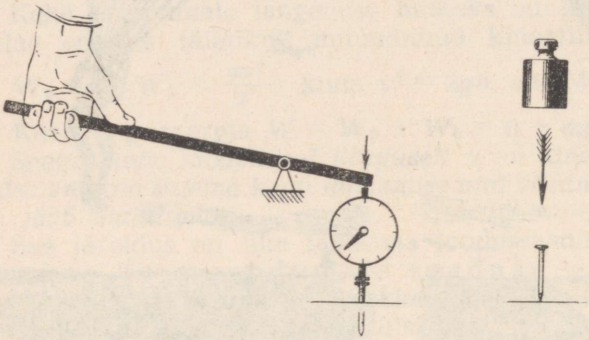
Seega, *kui on olemas keskkonna takistus, siis keha kineetilise ja potentsiaalse energia summa kahaneb.* Selle energia kahanemise arvel tehakse tööd keskkonna takistusjõudude vastu.

Samasugune on ka lugu, kui liikumisel mõjuvad hõõrdejõud tahkete kehade vahel. Näiteks rongi jõudmisel jaama, kui veduri jõumasin ei tööta, tehakse tööd hõõrdejõudude vastu rongi kineetilise energia kahanemise arvel, rongi kiirus seejuures väheneb. Keha libisemisel muutumatu kiirusega mööda kaldpinda alla tehakse tööd hõõrdejõudude vastu keha potentsiaalse energia kahanemise arvel.

76. Kehade põrge. Liikuva keha kohtumisel mingi teise kehaga toimub nende vahel lühiajaline vastastikune mõjumine, mida nimetatakse p õ r k e k s.

Põrkel, mis kestab sajandikke ja tuhandikke sekundeid, võivad areneda väga suured jõud, mida laialdaselt kasutatakse tehnikas. Andes hoobi näiteks vasaraga, teeb tööline tööd võrdlemisi väikese jõuga pikal teel. Seejuures saadud kineetilise energia arvel tehakse vasara löögiga tööd lühemal teel, kuid tunduvalt suurema jõuga.

Joonisel 140 on kujutatud naela surumist laua sisse kangi abil ja selle sisselöömist langeva vihi löögiga. Kui dünamomeetriga mõõta jõudu, millega kangi ots mõjub naelale, siis näitab dünamomeeter, et rakendatud jõud on tunduvalt suurem langeva vihi kaalust.

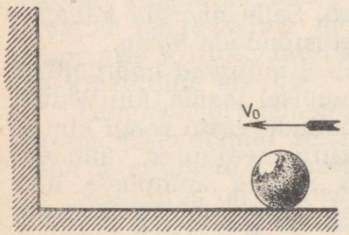


Joon. 140. Naela surumine laua sisse kangiga ja ta sisselöömine langeva vihiga.

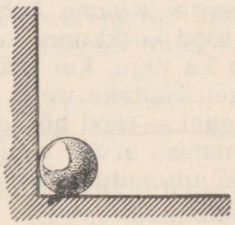
Vaatleme kera vastu liikumatut seina põrkamise erijuhul, millised energia muundumised toimuvad kehade põrkel.

Joonisel 141 *a* on kujutatud vastu liikumatut seina sellega ristsuunas liikuv kera.

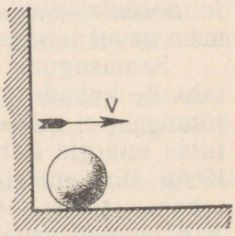
Aja, mille vältel toimub kera põrge vastu seina, võib jagada kaheks perioodiks. Esimese perioodi vältel kera ja sein deformeeruvad (lamestuvad, joon. 141 *b* — joonisel pole lamestumist kujutatud), seinas tekivad elastsusjõud, mis kera liikumist pidur-



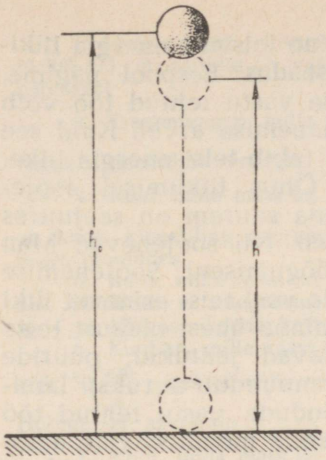
Joon. 141 *a*. Elastne kera liigub liikumatu seina poole.



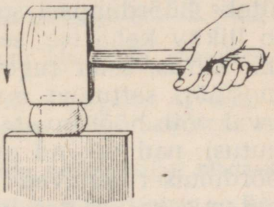
Joon. 141 *b*. Kera löögimoment vastu seina.



Joon. 141 *c*. Pärast lööki liigub kera seinast eemale.



Joon. 142. Mingilt kõrguselt langev elastne kera ei tõuse enam samale kõrgusele.



Joon. 143. Keha deformatsioon löögil.

davad, ja kera peatub. Kera kineetiline energia väheneb kuni nullini, muundudes elastselt deformeeritud kera ja seina potentsiaalseks energiaks.

Teisel perioodil, mis otsekohe järgneb esimesele perioodile, hakkab kera seinast eemalduma. Seejuures nii kera kui ka sein taastavad oma esialgse kuju. Kasvab kera kineetiline energia. Kera kiirus, mis on muutunud vastassuunaliseks, kasvab absoluutsuuruselt. Lõpuks kera eemaldub seinast ja sellega lõpebki põrke protsess (joon. 141 *c*).

Vaatlused näitavad, et kera põrkab seinast tagasi kiirusega v, mis on suuruselt väiksem kera kiirusest v_0 enne põrget.

Kui pillata teraskera mingilt kõrguselt h_0 (joon. 142), siis pärast põrkamist vastu teraspinda ta tõuseb kõrgusele h, mis on väiksem hui h_0.

Järelikult väheneb kera kiirus pärast põrget. Seejuures väheneb ka kera kineetiline energia.

Deformatsioon, mis tekkis keral ja seinal löögi puhul, ei taastu täielikult.

Praktikas rakendatakse põrget kahte liiki töödel. Esimest liiki tööd seisnevad kehade kuju muutumises (deformatsioonis), mida mõjutatakse põrkel, näiteks metallide tagumisel, pinnimisel ja stantsimisel, keha purustamisel jne. (joon. 143). Sel juhul peab liikumatu keha (näiteks alasi) mass olema tunduvalt suurem lööva keha (vasara) massist (vaata joon. 100).

Teist liiki tööd seisnevad kehade nihutamises põrke tagajärjel, näiteks vaia rammimisel maasse, naelte ja kiilude sisselöömisel jne. Sel juhul peab lööva keha mass olema tunduvalt suurem löödava keha massist, nii näiteks peab vasara mass olema tunduvalt suurem naela massist, rammimisnuia mass tunduvalt suurem vaia massist (joon. 133).

77. Mehhaanilise energia muundumine teisteks energia liikideks. Energia jäävuse ja muundumise seadus. Eespool nägime, et keskkonna takistuse ja hõõrdejõudude vastu tehtud töö võib toimuda keha mehhaanilise energia kahanemise arvel. Kuid see töö ei kao jäljetult. Selle töö tulemusena tekib teisi energia liike. Näiteks hõõrdumisel soojenevad kehad. Õhus liikumisel soojeneb liikuv keha ise, samuti ka õhk. Mida suurem on seejuures keha kiirus, seda tugevamini ta soojeneb. Nii soojenevad Maa atmosfääri sattunud meteoriidid kuni hõõgumiseni. Soojenemise kõrval võib hõõrduvate kehadega toimuda veel teisi erinevat liiki muutusi: nad võivad puruneda või üle minna ühest olekust teise (hõõrdumisel sulavad babiitlaagrid, sulavad jäätükid; puuride jahutamiseks kasutatav vesi soojeneb ja muundub auruks). Lühidalt, keskkonna takistuse ja hõõrdejõudude vastu tehtud töö tulemusena muutub keha olek. Muutub keha moodustavate aatomite ja molekulide vastastikune asetus ning kiirus; järelikult muutub (suureneb) nende energia.

Kõikide kehade koostisosakeste, kineetilise ja potentsiaalse energia summat nimetatakse *keha siseenergiaks*.

Seega, hõõrdumisel muundub mehhaaniline energia keha siseenergiaks.

Elektrivoolu generaatorites muundub mehhaaniline energia elektrienergiaks. Elektrimootorites, ümberpöördult, muundub elektrienergia mehhaaniliseks.

Ühte liiki energia kahanemine kujutab endast tegelikult ta muundumist mingiks teiseks liigiks.

Kui arvestada protsessist osavõtvate kehade kõiki energia liike, siis osutub, et nende summa on muutumatu suurus. **Energiat ei kao ega teki juurde. Ta ainult muundub ühest liigist teiseks.**

Selles seisneb üldine loodusseadus — *energia jäävuse ja muundumise seadus*. Selle seaduse sisu avamisele ja ta tähtsusele kaasaegses loodusteaduses pühendatakse palju tähelepanu järgnevates füüsika jagudes.

Lõpuks tuleme veel kord tagasi meie poolt varem vaadeldud töö mõiste juurde.

Nägime, et kõikidel energia muundumistel ühest liigist teise tehakse tööd ja seda niisugune hulk, mis on võrdne mistahes liiki muundunud energia hulgaga. Seega, **energia muundumist mõõdetakse tööga.**

Harjutus 41.

1. *a*) Paigalolevale kehale, massiga 200 g, mõjub jõud 400 dyn, mille tagajärjel keha saavutab mingi aja jooksul kiiruse 20 $\frac{cm}{s}$. Määrata jõu poolt selle aja jooksul tehtud töö.

b) Samasuguse kiiruse saavutab keha 800-düünise jõu mõjul. Kui suur on töö sel juhul?

c) Võrrelda punktide «*a*» ja «*b*» vastuseid. Kas mõlemal juhul on tööd ühesugused? Miks?

2. Mingisuguse kiirusega liikuva vaguni kineetiline energia on 10 000 kG · m. Millise on vaguni kineetiline energia, kui ta kiirus kasvab kolmekordseks?

3. Trammivagun, mille mass on 7500 kg, liigub kiirusega 1 $\frac{m}{s}$. Määrata vaguni kineetiline energia.

4. Kuul, mille mass on 10 g, lendab vintpüssist kiirusega 860 $\frac{m}{s}$. Kui suur on kuuli kineetiline energia? Võrrelda seda vaguni kineetilise energiaga eelmises ülesandes.

5. Keha, mille mass on 5 kg, on maapinnast 12 m kõrgusel. Arvutada ergides, džaulides ja kilogramm-meetrites ta potentsiaalne energia maapinna suhtes ja 4 m kõrguse hoone katuse suhtes.

6. Kuulike, mille mass on 100 g, veereb mööda horisontaalset pinda kiirusega 50 $\frac{cm}{s}$. Kas ta võib veereda üles mööda kallakut, mille kõrgus on 2,5 cm? Hõõret ei arvestata.

7. Kuul, mille mass on 10 g ja kiirus 400 $\frac{m}{s}$, tungib 10 cm jämeduse puu sisse. Läbinud puu, jätkab kuul liikumist kiirusega 200 $\frac{m}{s}$. Määrata takistusjõud, mida kuul kohtas puust läbitungimisel.

8. Rammimisnui, mis kaalub 300 kG, langeb 8 m kõrguselt, lüües vaia. Määrata ta kineetiline energia vastu vaia löömise momendil (joon. 133).

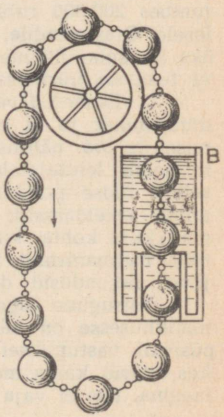
9. Keha, mille mass on 100 g, on visatud vertikaalselt üles kiirusega 40 $\frac{m}{s}$. Määrata keha kineetiline energia liikumise algul ja potentsiaalne energia suurimal kõrgusel. Võrrelda neid. Määrata kineetilise ja potentsiaalse energia summa pärast 3 sekundi möödumist liikumise algusest. Võrrelda seda summat kineetilise energiaga liikumise algul. Teha järeldus.

10. Kui keha mass, millest kõneldakse selle harjutuse ülesandes nr. 9, on 0,5 kg, millega on siis võrdne keha kineetiline energia viskamise algul? Määrata keha kineetiline ja potentsiaalne energia trajektoori kõrgeimas punktis ja nende energia summa. Võrrelda seda keha kineetilise energiaga viskamise algul. Teha järeldus. Arvutustes võtta $g = 10 \frac{m}{s^2}$.

78. Igavese jõumasina võimatus. Ammust ajast on inimesed tulemusteta püüdnud ehitada p e r p e t u u m m o b i l e t, s. t. igavest jõumasinat, mis, olles kord liikuma pandud, liiguks kuitahes kaua, tehes tööd, kulutamata seejuures energiat. Energia jäävuse ja muundumise seaduse avastamisega sai selgeks, et *perpetuum mobilet* pole võimalik ehitada. *Perpetuum mobile on vastuolus energia jäävuse ja muundumise seadusega.*

Harjutus 42.

Joonisel 144 on kujutatud üks *perpetuum mobile* mudeleid. Mõned ujukitest on veega täidetud nõus *B*. Arhimedese seaduse järgi mõjub neile üleslükkejõud, mille tagajärjel vees mitteasuvad ujukid (vasakul pool) tõmbavad tugevamini, ja ratas pöörleb. Näidata, miks selline jõumasin ei või töötada.



Joon. 144. Harjutuse nr. 42 juurde.

Katkend silmapaistva vene teadlase — mehhaaniku V. L. Kirpitšjovi (1845—1913) — samanimelisest raamatust.

Hoo[1] lausega ja energia jäävuse printsiibiga on tihedalt seotud *perpetuum mobile*, s. t. niisuguse masina ehitamise küsimus, mis, olles kord pandud liikuma, liigub iseenesest ja ei jää iialgi seisma. Vähe sellest, soovitakse veel, et masin liikumisel teeks alaliselt mingit kasulikku tööd — peksaks vilja või tõstaks vett jne., vajamata selliste takistuste ületamiseks mingit kõrvalist liikumapanevat jõudu, kulutamata kütust, kasutamata tuule või voolava vee mõju, vaid ammutades energiat iseendast, oma osade vastastikusest mõjutamisest. See on masin, mis peab andma energiat muidu, mingisuguste kulutusteta. *Perpetuum mobile* otsimise ajalugu on mehhaanikas äärmiselt huvitav, kuna see on tihedalt põimunud dünaamika põhiseaduste püstitamise ajalooga. Kuid ta pakub veel erilist huvi, kuna see on õpetlik inimlike otsingute, püüdluste ja eriti eksimiste näide, mida inimkonnal tuleb läbida teel tõele.

Üks varasematest *perpetuum mobile* mainimistest on XIII sajandi teisest poolest, nimelt aastast 1269.

... Harva teostati neid leiutisi, sagedamini lõppes kõik paberil...

... Kuid esines mitu suuremõõdulise *perpetuum mobile* teostamise juhtu ja on säilinud kaasaegsete hinnanguid, kes nägid neid masinaid. Kõige tähelepandavam seda laadi juhus, mis sai laialdaselt tuttavaks, oli Orfireuse poolt 1712. a. leiutatud ratas; selle esitas ta 1717. a. Hessen-Kasseli landkrahvile. Hiiglaratas, mille Orfireus valmistas landkrahvile (diameeter 12 jalga[2], suutis tõsta koormat 70 naela[3] küllaltki kõrgele), oli paigutatud eraldi tuppa, millesse oli sissepääs suletud ja mis oli pitseeritud landkrahvi pitsatiga. Kahe kuu pärast avati see ruum ning selgus, et ratas pöörles endiselt.

Teade sellest faktist levis kiiresti kogu Euroopas ja kutsus esile sensatsiooni nii valitsejate kui ka teadlaste seas. Saksa ajalehtedes ilmunud teade Orfireuse leiutise kohta puutus silma Peeter Suurele, kes sellest oli väga huvitatud. See teade oli esimeseks tõukeks, et alustada läbirääkimisi kuulsa saksa filosoofi Wolfiga teaduste akadeemia asutamise üle. Peeter kutsus Wolfi igasugustel soodsatel tingimustel Peterburi, kui ta ainult nõustuks täiendama Orfireuse leiutist.

... Kogu selle asja, mis äratas nii palju piirituid lootusi, lõpp oli Orfireusele väga kurb. Nähes, et landkrahv ei andnud temale lubatud suurt rahalist autasu (umbes 200 000 rubla) ega pidanud tõotatud saladust, näidates ta leiutist teadlasele Gravesandile, purustas Orfireus oma ratta «aatomiteks», nagu väljendab üks kirjanik. Selline lõpp veenab meid selles, et Orfireus oli petis, kes kartis, et teadlase uurimisega ta pettus silmapilkselt paljastatakse.

... Esimesed *perpetuum mobile* ehitamise katsed kuuluvad aega, kui polnud dünaamikat ja ei tuntud kehade liikumise seadusi. Selle teaduse areng, liikumise ja töö nähtuste selgitamine ei avaldanud vähimatki mõju igaveste jõumasinate leiutajatele; need fanaatikud ignoreerisid teadust täielikult ja jäid sellest üldse puudutamata. Igavese liikumise idee valitses nende mõistust kui mingi vaieldamatu; neil ei tekkinud vähimatki kahtlust selle teostamise võimalikkuse kohta, kunagi ei võetud arutlusele küsimust — kas on võimalik saada tööd mehhanismilt muidu. Kõik, vahest isegi erakordsed mõistuse ja fantaasia jõud, rakendusid detailide väljamõtlemisele.

Niisugune tugev, mittemillelgi põhinev usk muidusaadava energiaallika võimalikkusesse on hämmastav veel selle poolest, et meie, teadusemehed, asume püsivalt vastupidisel veendumusel — *perpetuum mobile* võimatusel. Teadlased, kes aitasid kaasa mehhaanika arenemisele, võtsid tavaliselt seda võimatust postulaadina, mis ei vaja tõestamist.

---

[1] Hoog — kineetiline energia.
[2] 12 jalga = 3,6 m.
[3] 70 naela = 28,7 kG.

... XVII sajandil ilmus massiliselt avaldusi, nagu oleks igavese jõumasina probleem lahendatud. See põhjustas vajaduse selgelt ja lihtsalt tõestada, et masin, mis oleks pidevalt töö allikaks, on vastuolus mehhaanika seadustega. Üheks esimeseks seda laadi tõestuseks on kuulsa matemaatiku La Hire'i (l. lahiir) tõestus, mis esitati Pariisi Teaduste Akadeemiale 1678. a. Vaatamata sellele pöördusid leiutajad alaliselt Akadeemia poole avaldustega selle kohta, et nad on leiutanud *perpetuum mobile*, ja palvetega vaadata läbi niisuguseid leiutisi. 1755. a. otsustas Akadeemia jätta vastamata kõik *perpetuum mobilet* puudutavad avaldused ja ettepanekud. Kuid ka see abinõu ei saavutanud eesmärki ega peatanud fantastiliste esildiste voolu. Isegi praegu on igal mehhaanika professoril alati tegemist selliste lummutiste leiutajatega. Oma isikliku kogemuse järgi pean ütlema, et need on alati väga lugupeetavad isikud, kes on ausalt kiindunud ideesse, mis on neid niivõrd tugevasti kaasa kiskunud, et nad on absoluutselt kurdid mõistuse põhjendustele. Neile ei mõju ei sõnalised loogilised tõestused ega isegi mitte tõhus faktiline tõestus, mida neile esitavad nende oma leiutised — oma kätega valmistatud täiesti inertsed tooted. Ma nägin leidureid, kes pärast kauakestvat tööd olid äsja lõpetanud oma *perpetuum mobile* ehitamise. Selle riista absoluutne liikumatus ei vii leidurit sugugi segadusse, kes tavaliselt seletab seda kõige tühisema asjaoluga: kas pole riista mõõtmed küllaldased, või pole üks hammas täiesti õige selle mehhanismi suures hammasrataste hulgas. Kui leiduril avaneb võimalus, siis ta ehitab oma mehhanismi uuesti ja veel suuremate mõõtmetega või täpsemate hammastega ja on täiesti veendunud tulevases edus. Siin on meil juba tegemist ainega, mis pole huvitav mitte mehhaanikule, vaid psühholoogile.

... Dünaamika vaatekohalt on *perpetuum mobile* küsimus äärmiselt lihtne ja lahendatakse täielikult energia jäävuse seadusega. Seejuures ei ole üldse vaja vaadelda üksikuid esitatud erinevaid konstruktsioone, vaid teha korraga otsus kõigi kohta.

VII PEATÜKK.

KEHADE KÕVERJOONELINE LIIKUMINE. PÖÖRLEV LIIKUMINE.

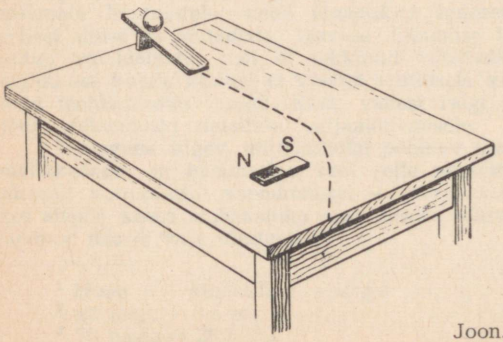
79. Keha liikumine kiiruse suhtes nurga all suunatud jõu toimel. Kui sirgjooneliselt liikuvale kehale hakkab liikumise suunas mõjuma jõud, siis keha liikumine jääb ikkagi sirgjooneliseks. Muutub ainult liikumise kiirus. Kui seejuures jõu suund ühtib kiiruse suunaga, siis liikumine on sirgjooneline ja kiirenev. Sel juhul aga, kui jõu suund on vastupidine, osutub liikumine sirgjooneliseks ja aeglustuvaks. Niisugused on näiteks vertikaalselt alla visatud keha liikumine ja vertikaalselt üles visatud keha liikumine.

Vaatleme nüüd, kuidas hakkab liikuma keha niisuguse jõu toimel, mis mõjub kiiruse suhtes mingi nurga all.

Vaatleme kõigepealt katset. Joonisel 145 on kujutatud teraskuulikese liikumise trajektoor. Magnetist kaugemal liigub kuulike sirgjooneliselt, kuid magnetile lähenedes hakkab tema trajektoor kõverduma ja kuulike liigub juba kõverjooneliselt. Kiiruse suund seejuures muutub. Selle põhjuseks on magneti mõju kuulikesele.

Sirgjooneliselt liikuva keha võime panna liikuma kõverjooneliselt, kui me teda tõukame, tõmbame külgeseotud niidist jne., ühesõnaga, kui me teda mõjutame jõuga, mille suund moodustab keha kiiruse suunaga mingi nurga.

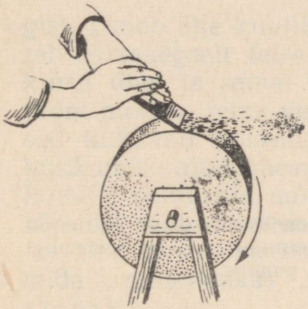
Seega, *keha kõverjooneline liikumine toimub jõu mõjul, mille suund moodustab keha kiiruse suunaga mingi nurga.*



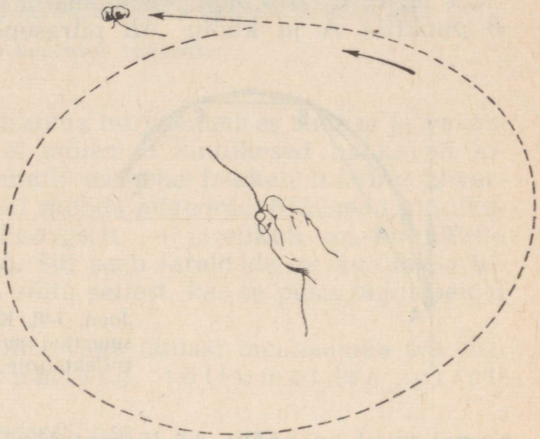
Joon. 145. Magnet kõverdab kuulikese trajektoori.

Sõltuvalt kehale mõjuva jõu suunast ja suurusest võivad kõverjoonelised liikumised olla väga mitmesugused. Kõverjooneliste liikumiste lihtsamateks liikideks on liikumine ringjoont, parabooli ja ellipsit mööda.

Vaatleme nüüd kõverjoonelise liikumise kiirusvektori suuna küsimust. Sirgjoonelise liikumise juures ühtib kiirusvektori suund liikumise suunaga. Kuid kõverjoonelise liikumise juures ei ole jäävat liikumise suunda. Mida siis niisugusel juhul lugeda kõverjoonelise liikumise kiiruse suunaks?



Joon. 146. Käial teritatava eseme sädemed lendavad puutujat mööda.



Joon. 147. Ringjoont mööda liikuv kivi lendab niidi katkemisel puutujat mööda.

Kõige lihtsam on kindlaks teha kiirusvektori suunda keha liikumisel sirgjoont mööda. Paneme kiiresti pöörlema smirgelkäia ja puudutame teda terasetükiga. Me paneme tähele tervet sädemete kimpu, mis lendab välja terase ja käia kokkupuutekohast (joon. 146). Need on väikesed hõõguvad terase- ja käiatükikesed, mis eemale paiskudes liiguvad inertsi tõttu sirgjooneliselt selle kiirusega, mis neil oli lahtipääsemise momendil. Liigutades terasetükki käial, võime näha, et sädemed lendavad alati mööda puutujat, mis on tõmmatud ringjoonele selles punktis, milles toimub käia ja terase puutumine.

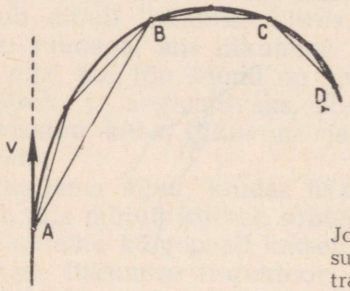
Ringjoone puutujat mööda lendab samuti kivi, kui katkeb järsku niit, mille otsas ta tiirles (joon. 147).

Kirjeldatud katsetest järeldub, et *kiirus ringjoone antud punktis on suunatud puutujat mööda, mis on tõmmatud ringjoonele selles punktis.*

Seda järeldust võime laiendada mistahes kõverjoonelisele liikumisele.

Olgu *ABCD* (joon. 148) liikumise trajektoor. Oletame, et liikumine ei toimu mitte kõverat, vaid murdjoont mööda, s. o. mööda kõõlusid *AB—BC—CD* . . .

Kiirusvektori suund nendes murdjoone lõikudes ühtib kõõludega, muutudes vaid punktides *A, B, C* . . . Tükeldades trajektoori *ABCD* . . . suuremaks osade arvuks, me teeme seega sirgjoonelised teeosakesed ikka lühemaks ja lühemaks. Seejuures hakkab liikumine kõõlusid mööda ikka vähem ja vähem erinema liikumisest kõverjoont *ABCD* . . . mööda. Kõõlude suunad aga seejuures lähenevad ikka rohkem ja rohkem puutujatele punktides *A, B, C, D.* Lõigu *AB* lõpmatul vähenemisel läheneb punkt *B* punktile *A* ja kõõlu *AB* piirasend ühtib puutuja asendiga.



Joon. 148. Kõverjoonelise liikumise kiirus on suunatud mööda puutujat, mis on tõmmatud trajektoorile antud punktis.

Samal viisil on kõõlu *AB* lõpmatul vähenemisel temal oleva kiiruse suuna piirsuunaks punktis *A* tõmmatud puutuja suund. Analoogiline arutelu kehtib kõverjoonelise trajektoori mistahes punkti (*B, C, D* . . .) kohta.

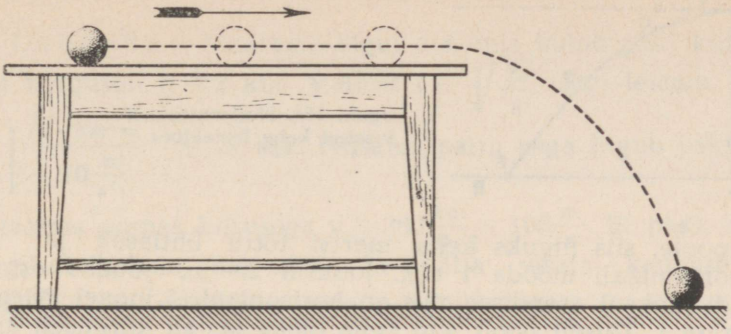
Seega, *kõverjoonelise liikumise kiirus trajektoori antud punktis on suunatud puutujat mööda, mis on tõmmatud kõverale selles punktis.*

80. Liikumiste sõltumatus. Horisontaalselt visatud keha liikumine. Iga kõverjooneline liikumine on liitliikumine, mis koosneb liikumisest inertsi tõttu ja liikumisest, mille saab keha kiiruse suhtes nurga all mõjuva jõu toimel. Seda võib näidata järgmise näitega.

Oletame, et kuulike liigub lauda mööda ühtlaselt ja sirgjooneliselt. Kui kuulike veereb laualt ära, siis laua vastumõju enam ei tasakaalusta tema kaalu ja, säilitades inertsi mõjul ühtlast ja sirgjoonelist liikumist, hakkab samaaegselt langema. Ühtlaselt sirgjoonelise (inertsi tõttu) ja ühtlaselt kiireneva (langemine) liikumise liitmise resultaadina liigub kerake kõverjoont mööda (joon. 149).

Võib näidata, et mõlemad need liikumised toimuvad teineteisest sõltumatult.

Joonisel 150 on kujutatud vedru, mis, paindudes vasara löö-



Joon. 149. Laualt veerenud kuulikese trajektoor.

gist, paneb ühe kuulikese liikuma horisontaalses suunas ja vabastab samaaegselt teise nii, et mõlemad kuulikesed hakkavad liikuma ühel ja samal momendil; esimene hakkab liikuma kõverjoont mööda, teine vertikaali mööda allapoole. Mõlemad kuulikesed kukuvad põrandale üheaegselt — järelikult on kuulikeste kukkumise ajad ühesugused. Siit saab järeldada, et kuulikese liikumine raskusjõu mõjul ei sõltu sellest, kas ta püsis algul paigal või liikus horisontaalselt.

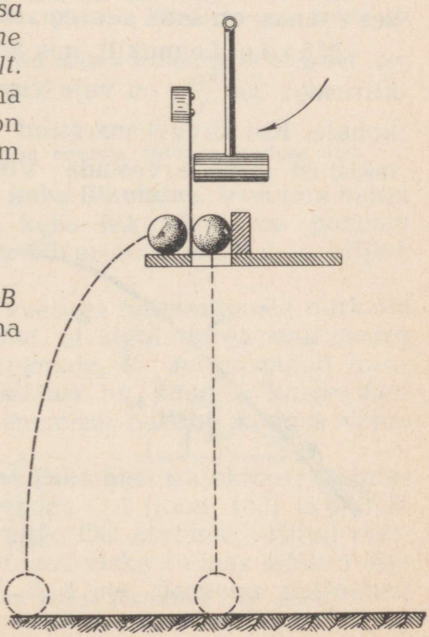
See katse illustreerib ühte väga tähtsat mehhaanika seadust, mida nimetatakse liikumiste sõltumatuse printsiibiks.

Kui keha võtab üheaegselt osa mitmest liikumisest, siis iga liikumine nendest toimub teistest sõltumatult.

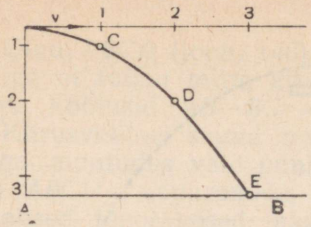
Kasutame seda printsiipi keha trajektoori ehitamisel, kui keha on visatud horisontaalselt, näiteks 45 m kõrgusel, kiirusega $v = 20\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Võtame $g = 10\ \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Joonisel 151 kujutab joon AB Maa pinda. Kui Maa ei tõmbaks keha



Joon. 150. Mõlemad kuulikesed kukuvad põrandale üheaegselt.



Joon. 151. Horisontaalselt visatud keha trajektoor.

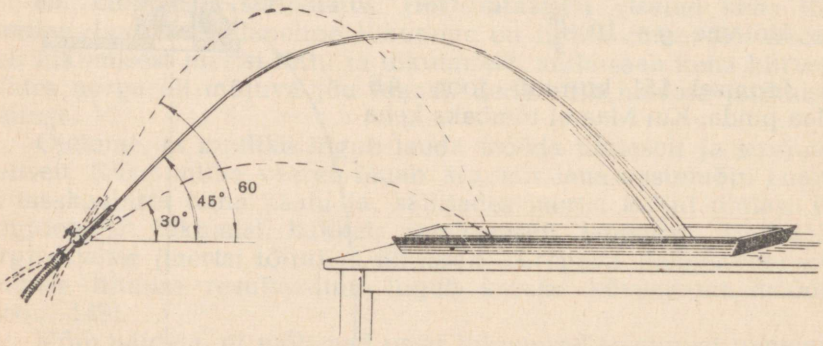
enda poole, siis liiguks keha inertsi tõttu ühtlaselt ja, läbides horisontaali mööda 1 sek. jooksul 20 m, jõuaks esimese sekundi jooksul asendisse, mis on horisontaalsel joonel märgitud numbriga 1. Teiselt poolt, kui keha oleks samalt kõrguselt ainult vabalt langenud, siis ta oleks esimese sekundi jooksul langenud 5 m võrra ja esimese sekundi lõpuks oleks olnud punktis, mis on vertikaalil märgitud numbriga 1.

Kuna keha ühel ja samal ajal liigub ühtlaselt sirgjooneliselt kiirusega $20\frac{m}{s}$ ja langeb, siis esimese sekundi lõpuks pärast liikumise algust on ta punktis *C*.

Kahe sekundiga liigub keha inertsi tõttu 40 m, kuid langedes läbib 20 m ja jõuab punkti *D*. Kolm sekundit pärast liikumise algust on keha punktis *E*. Ühendades nimetatud punktid sujuva kõveraga, saame horisontaalselt visatud keha liikumise trajektoori.

Horisontaalselt visatud keha poolt vertikaalses suunas käidud tee ei sõltu algkiirusest, kuid tee, millel keha langeb horisontaalses suunas, on seda suurem, mida suurem on algkiirus.

N ä i d e. Lennukilt, mis lendab horisontaalselt 2 km kõrgusel kiirusega $360\frac{km}{h}$, on vaja visata pakk nii, et ta kukuks märgitud kohale. Kui kaugel märgitud kohast tuleb pakk alla visata? Õhu takistust mitte arvestada. Võtta $g = 10\frac{m}{s^2}$.



Joon. 152. Horisondi suhtes mitmesuguste nurkade all juhitud veejoa osakeste poolt moodustatud trajektoorid.

L a h e n d u s. Määrame algul aja, mis kulub paki kukkumiseks kõrguselt $h = 2$ km. Valemi $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ järgi leiame, et $t = \sqrt{\frac{2 \cdot 2000\ \text{m}}{10\frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} = 20$ sek. Niisama palju aega liigub pakk horisontaalses suunas kiirusega $v = 360\frac{\text{km}}{\text{h}} = 100\frac{\text{m}}{\text{s}}$. Et pakk kukuks märgitud kohale, on tarvis ta välja visata kaugusel $s = 100\frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 20\ s = 2000$ m enne märgitud kohta.

Harjutus 43.

1. Ehitada keha liikumise trajektoor, kui keha on visatud 80 m kõrgusel horisontaalselt kiirusega $30\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Määrata, missugusel kaugusel viskamise kohast arvates kukub keha maapinnale. Leida keha kiirus maapinnale kukkumise momendil. Õhu takistust mitte arvestada, g võtta võrdseks $10\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

2. Laevalaelt 10 m kõrgusel olevast masti punktist lasti laevalaele kukkuda pall. Laeva kiirus oli $18\frac{\text{km}}{\text{h}}$. Kui palju on laev palli kukkumise ajal edasi liikunud? Kuhu kukub pall? Missugune on palli liikumise trajektoor merepinna suhtes? Missuguse kiirusega kukub pall laevalaele?

3. Kooli katselaua äärel lebab kriiditükike. Kriiditükikesele antakse horisontaalne löök suunas, mis on risti klassi tahvliga. Tahvlile kriidi löögist tekkinud jälg on 20 cm võrra madalamal laua pinnast. Tahvli kaugus lauast on 1 m. Leida kriiditükikese algkiirus.

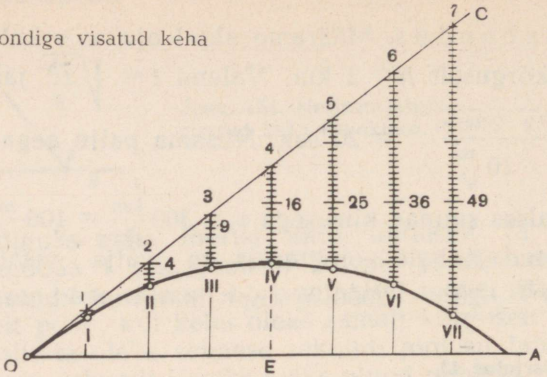
4. Kui suure kiirusega tuleb visata horisontaalses suunas 20 m kõrgusel olev keha, et ta langeks maapinnale kiirusega $25\frac{\text{m}}{\text{s}}$?

N ä p u n ä i d e: Lahendada see ülesanne energia jäävuse seaduse abil.

81. Kaldu horisondiga visatud keha liikumine. Viskame mingi keha kaldu horisondiga. Jälgides keha liikumist, me paneme tähele, et ta algul tõuseb, liikudes kõverjoont mööda, ja hiljem langeb jällegi kõverjoont mööda.

Kui juhtida väikese kiirusega veejuga mitmesuguste nurkade all horisondi suhtes, siis võime näha, et algul nurga suurenedes läheb juga ikka kaugemale ja kaugemale. 45° nurga puhul horisondi suhtes (kui puudub õhutakistus) on kaugus kõige suurem, kuid nurga edaspidisel suurenemisel hakkab kaugus vähenema.

Kaldu horisondiga visatud keha liikumise trajektoori kujutamiseks tõmbame horisontaalse sirgjoone *OA* (joon. 153) ja sellele antud nurga all sirgjoone *OC*. Joonele *OC* asetame valitud mastaabis lõigud, mis on arvuliselt võrdsed viske suunas läbitud teedega (*01, 12, 23, 34*). Punktidest *1, 2, 3* jne. tõmbame ristjooned *OA*-le ja kanname nendele lõigud, mis on arvuliselt võrdsed

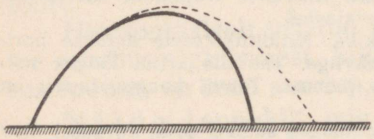


Joon. 153. Kaldu horisondiga visatud keha trajektoori ehitamine.

teede pikkustega, mida keha vabalt langedes läbib 1 sek. (1 l), 2 sek. (2 II) jne. jooksul. Punktid *0*, *I*, *II*, *III*, *IV* jne. ühendame sujuva kõverjoonega.

Kaldu horisondiga visatud keha trajektoor (kui me ei arvesta õhutakistust) on sümmeetriline kõige kõrgema punkti (joon. 153 punkt IV) suhtes.

Õhutakistus vähendab nii lennukaugust kui ka suurimat kõrgust ja muudab trajektoori ebasümmeetriliseks. Sellised on näiteks mürskude ja kuulide trajektoorid.

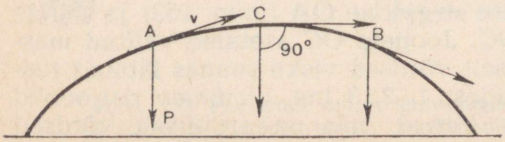


Joon. 154. Keha trajektoor õhus (pidev joon) ja õhuta ruumis (punktiirjoon).

Joonisel 154 näitab pidev joon skemaatiliselt mürsu trajektoori õhus, punktiirjoon aga trajektoori õhuta ruumis. Järgmisest näitest on näha, kui palju õhutakistus muudab lennukaugust. Õhutakistuse puudumisel lendab horisondi suhtes 20° nurga all tulistatud 76 mm kahuri mürsk 24 km kaugusele. Õhus lendab sama mürsk aga umbes 7 km kaugusele.

Vaatleme nüüd, kuidas muutub keha kiirus, kui keha on visatud kaldu horisondiga ning puudub õhutakistus.

Jooniselt 155 on näha, et raskusjõud moodustab keha kiirusega nürinurga kõikides punktides (näiteks punktis *A*), mis on vasakul pool kõige kõrgemat punkti *C*. Vasakpoolses trajektoori osas liigub keha üles ja aeglustuvalt, kuna raskusjõud, mis mõjub kehale, vähendab tema kiiruse suurust ning muudab selle suunda.



Joon. 155. Kaldu visatud keha liikumisel on raskusjõu ja kiiruse vaheline nurk igas punktis isesugune.

Punkti C suhtes võetud parempoolses trajektoori osas, näiteks punktis B, moodustab raskusjõud kiirusega teravnurga. Selles osas liigub keha kiirenevalt, raskusjõud suurendab tema kiiruse suurust ning muudab selle suunda.

Trajektoori kõige kõrgemas punktis C on keha kiirus suunatud horisontaalselt, raskusjõud moodustab sel juhul kiirusega täisnurga.

Harjutus 44.

Ehitada keha trajektoor, kui keha on visatud horisondi suhtes 45° nurga all kiirusega $42\frac{m}{s}$, mastaabis 10 m ühes cm-s, g võtta võrdseks $10\frac{m}{s^2}$-ga.

Määrata graafiku järgi lennu kaugus ja suurim kõrgus.

Leida graafiku järgi trajektoori mingis punktis keha kiiruse horisontaalne ja vertikaalne komponent.

Leitud komponentide järgi arvutada lennu kaugus ja suurim kõrgus. Võrrelda saadud tulemusi joonise andmetega.

Missugune peaks olema keha kiirus keha maapinnale langemise momendil, kui õhutakistust mitte arvestada?

82. Ühtlane ringliikumine. Nurkkiirus, pöörlemise periood. Üheks lihtsamaks ja väga levinud kõverjoonelise liikumise liigiks on ühtlane liikumine ringjoont mööda ehk ühtlane ringliikumine. Ringjoont mööda liiguvad näiteks hooratta osad, Maa ööpäevase pöörlemise tõttu maapinna punktid jne.

Vaatleme suurusi, mis iseloomustavad seda liikumist. Vaatleme joonist 156.

Mingu pöörlemisel keha mingi punkt asendist A aja t jooksul asendisse B. Punkti A-d ringjoone keskpunktiga ühendav raadius pöördus seejuures nurga φ (kreeka täht «fii») võrra. Punkti pöörlemise kiirust võib iseloomustada nurga φ ja aja t suhtega.

Suurust, mida mõõdab liikuvat punkti keskpunktiga ühendava raadiuse pöörlemisel tekkinud nurga suhe ajaga, mille jooksul tekkis see pööre, nimetatakse nurkkiiruseks.

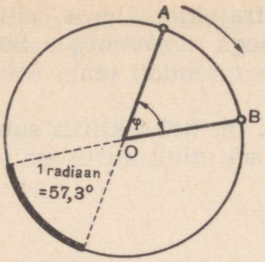
Tähistades nurkkiirust kreeka tähega ω («oomega»), võime kirjutada:

$$\omega = \frac{\varphi}{t}.$$

Kui $t = 1$ sek., siis $\omega = \varphi$, s. o. *nurkkiirus on arvuliselt võrdne ajaühikus kujunenud pöördenurgaga.*

Ühtlase ringliikumise juures on nurkkiirus jääv suurus.

Nurkkiiruse arvutamisel võetakse nurk radiaanides. Radiaan on kesknurk, millele vastav kaar on võrdne raadiusega. *Nurkkiiruse ühikuks võetakse* 1 *radiaan sekundis* $\left(1\,\frac{rad}{s}\right)$, *s. o. niisugune nurkkiirus, mille puhul punkti raadius pöördub* 1 *sekundis nurga võrra, mis on võrdne* 1 *radiaaniga* (joonisel 156 nurk φ). Pöörlemise nurkkiirust mõõdetakse tehnikas pöörete arvuga ühes ajaühikus (sekundis või minutis). Nii on näiteks viljapeksumasina



Joon. 156. Nurkkiiruse mõiste juurde.

ratta nurkkiirus umbes 1070 $\frac{\text{pööret}}{\text{min}}$. Elektrimootori ankru nurkkiirus on umbes 1440 $\frac{\text{pööret}}{\text{min}}$, naftamootori hooratta nurkkiirus umbes 300 $\frac{\text{pööret}}{\text{min}}$ jne.

Teades, et nurk 360° on võrdne 2π radiaaniga[1], pole raske avaldada nurkkiirust, mis on antud $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$-tes pöörete arvu kaudu sekundis ja ümberpöördult. Vaatleme seda näite abil.

Olgu hooratta kiirus 300 $\frac{\text{pööret}}{\text{min}}$. Avaldada nurkkiirus $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$-tes.

Pöörete arv sekundis $= \frac{300}{60} = 5$. Ühe täispöörde jooksul pöördub hooratas 360°, s. o. 2π radiaani võrra, kuid 5 täispöörde jooksul $2\pi \times 5 = 10\pi$ rad. Nurkkiirus on järelikult 31,4 $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$.

Seega selleks, et avaldada $\frac{\text{pööret}}{\text{s}}$-tes antud nurkkiirust $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$-tes, tuleb pöörete arv sekundis n korrutada 2π-ga:

$$\omega = 2\pi n.$$

Kuna radiaan on nurga nimeta mõõt, siis kirjutatakse nurkkiiruse nimetuse $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ asemel $\frac{1}{\text{s}}$.

Aega, mille jooksul punkt teeb ringliikumisel täispöörde, nimetatakse pöörlemise perioodiks. Pöörlemise perioodi tähistatakse tähega T ja mõõdetakse sekundites.

Kui näiteks punkt teeb 1 sekundi jooksul 10 täispööret, siis ühe täispöörde aeg ehk periood on $\frac{1}{10}$ sekundit, n täispöörde puhul pöörlemise periood

$$T = \frac{1}{n}.$$

---

[1] Kesknurk, millele vastav kaar on ringjoone pikkus $2\pi R$, võrdub 360°. Ringjoone pikkusele aga teiselt poolt vastab nurk $\frac{2\pi R}{R} = 2\pi$ radiaani. Järelikult sisaldab 360°-ne nurk 2π radiaani.

83. Joonkiirus. Nurkkiiruse ja joonkiiruse vaheline seos. Pöörleva liikumise iseloomustamiseks on tarvitusele võetud peale nurkkiiruse mõiste veel joonkiiruse mõiste. *Joonkiiruseks nimetatakse kiirust, millega punkt liigub ringjoont mööda.*

Joonkiiruse suuruse arvutamise valemit võib tuletada järgmiste arutluste põhjal.

Ringjoonel raadiusega R asetsev punkt käib ära ühe täispöördega teepikkuse, mis on võrdne ringjoone pikkusega $2\pi R$; selleks vajab ta perioodiga T võrdset aega. Kui võtta teepikkuse $2\pi R$ suhe ajaga T, siis saamegi punkti liikumise kiiruse ringjoont mööda:

$$v = \frac{2\pi R}{T}. \text{ Kuid } \frac{1}{T} = n, \text{ järelikult } v = 2\pi Rn. \qquad (1)$$

Siit on kerge saada nurkkiiruse ja joonkiiruse vahelist seost. Kuna $\omega = 2\pi n$, siis eelmise valemi põhjal

$$v = \omega R, \qquad (2)$$

s. o. *ühtlasel ringliikumisel on punkti joonkiirus võrdne nurkkiiruse ja ringjoone raadiuse korrutisega.*

§ 79 räägiti, et ringjoont mööda liikuva punkti kiirusvektor on suunatud puutujat mööda. *Järelikult on joonkiirus suunatud ringjoone puutujat mööda.*

Valemist (2) on näha, et joonkiirust mõõdetakse $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$-tes, $\frac{\text{m}}{\text{s}}$-tes jne.

N ä i d e 1. Ühtlaselt pöörlev hooratas teeb 300 pööret minutis. Kui suur on hooratta punkti joonkiirus, kui punkt liigub ringjoont mööda, mille raadius on 1 m?

Arvutame valemi $v = 2\pi Rn$ abil:

$$v = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 300 \cdot 1 \text{ m}}{60 \text{ s}} = 31{,}4 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

N ä i d e 2. Määrata maapinna punktide nurk- ja joonkiirused Maa ööpäevasel pöörlemisel ümber telje. Maa raadius võtta 6400 km.

Nurkkiirust määratakse võrdusest $\omega = \frac{2\pi}{T}$, kus $T = 24$ tundi $=$

$= 24 \cdot 3600$ s; $\omega = \frac{2 \cdot 3{,}14 \text{ rad}}{24 \cdot 2600 \text{ s}} \approx 0{,}00007 \frac{1}{\text{s}}$.

Joonkiirus $v = \omega R$;

järelikult: $v = 0{,}00007 \frac{1}{\text{s}} \cdot 6\,400\,000 \text{ m} \approx 450 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

84. Kesktõmbekiirendus. § 79 näidati, et igasugune kõverjooneline liikumine toimub jõu mõjul, mis on suunatud kiiruse suhtes nurga all. Ühtlase ringliikumise puhul on see nurk täisnurk.

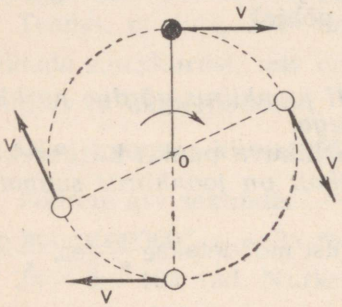
Tõepoolest, kui lasta näiteks pöörelda niidi otsa seotud kuulikest, siis on kuulikese kiiruse suund igal ajamomendil niidiga risti (joon. 157). Niidi pinge aga, mis hoiab kivi ringjoonel, on suunatud niiti mööda pöörlemise tsentri poole.

Jõudu, mis hoiab pöörlevat keha ringjoonel ja mis on suunatud pöörlemise tsentri poole, nimetatakse kesktõmbejõuks.

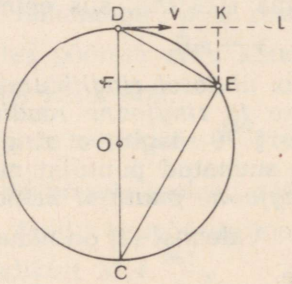
Newtoni teise seaduse järgi tekitab see jõud samasuunalise kiirenduse.

Kiirendust, mis on suunatud raadiust mööda pöörlemise tsentrisse, nimetatakse kesktõmbekiirenduseks.

Kesktõmbejõu loomusest me räägime lähemalt §§ 85 ja 86, kuid praegu tuletame valemi kesktõmbekiirenduse suuruse arvutamiseks.



Joon. 157. Ühtlasel ringliikumisel on kiirusvektorid erinevatel ajamomentidel suuruselt võrdsed, kuid suunalt erinevad.



Joon. 158. Kesktõmbekiirenduse valemi tuletamise juurde.

Kõigepealt märgime, et liikumine ringjoont mööda on liitliikumine. Kesktõmbejõu toimel liigub keha pöörlemise tsentri poole ja samaaegselt eemaldub sellest, liikudes inertsi tõttu ringjoone puutujat mööda.

Vaatleme joonist 158. Liikugu ajavahemiku t jooksul ühtlaselt kiirusega v liikuv keha punktist D punkti E. Oletame, et sel momendil, kui keha on jõudnud punkti D, lakkab temale mõjumast kesktõmbejõud. Siis aja t jooksul oleks keha liikunud punkti K, mis asetseb puutujal DL. Kui aga samal momendil oleks keha osutunud ainult kesktõmbejõu mõju all olevaks (ei oleks liikunud inertsi tõttu), siis ta oleks ajavahemiku t jooksul liikunud sirgel DC asetsevasse punkti F. Nende aja t jooksul toimunud liikumiste liitmise tulemusena saame resultantliikumise kaart DE mööda.

Võtame ajavahemiku t nii väikseks, et kaar DE vähe erineks kõõlust DE. Siis keha tee kõõlu mööda $DE = vt$.

Tähistame a-ga otsitava kesktõmbekiirenduse. Siis tee DF, mida keha läbib aja t jooksul ja ainult kesktõmbejõu toimel, väljendub ühtlaselt kiireneva liikumise tuntud valemi põhjal:

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

Nüüd kasutame tuntud teoreemi[1] geomeetriast, mille põhjal

$$(DE)^2 = DC \cdot DF. \quad (1)$$

Kuna $DE = vt$, $DF = \frac{at^2}{2}$, $DC = 2R$ (vt. joon. 158), siis võrdusest (1) pärast teisendamist saame kesktõmbekiirenduse jaoks valemi:

$$a = \frac{v^2}{R}. \quad (2)$$

Kesktõmbekiirendus on joonkiiruse ruudu ja raadiuse suhe.

Kesktõmbekiirenduse võime avaldada nurkkiiruse ja ringjoone raadiuse kaudu.

Me teame, et $v = \omega R$, kus ω on nurkkiirus. Kui asetada see kiiruse avaldis valemisse (2), siis saame $a = \omega^2 R$.

Punkti kesktõmbekiirenduse suurus on võrdne nurkkiiruse ruudu ja ringjoone raadiuse korrutisega.

85. Kesktõmbejõud. Et saada valemit kesktõmbejõu suuruse arvutamiseks, tuleb kasutada Newtoni teist seadust, mis on rakendatav mistahes kõverjoonelise liikumise jaoks.

Asetades valemisse $F = ma$ kesktõmbekiirenduse $a = \frac{v^2}{R}$, saame valemi kesktõmbejõu jaoks:

$$F = \frac{mv^2}{R}, \quad (1)$$

s. o. kesktõmbejõu suurust mõõdab massi ja kiiruse ruudu korrutis jagatud raadiusega.

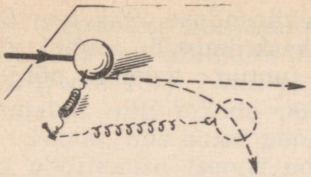
Kui on antud keha nurkkiirus, siis on kesktõmbejõudu parem arvutada valemi $F = m\omega^2 R$ abil, kus $\omega^2 R$ on kesktõmbekiirendus.

Valemist (1) on näha, et ühe ja sama kiiruse juures on kesktõmbejõud seda suurem, mida väiksem on ringjoone raadius. Nii näiteks mõjub teekäänakutel (kurvidel) liikuvale kehale (rong, auto, jalgratas) kõveruse keskpunkti suunas seda suurem jõud, mida järsem on käänak (mida väiksem on kõverusraadius).

Kesktõmbejõud sõltub joonkiirusest: joonkiiruse suurenedes suureneb ka kesktõmbejõud. See on hästi tuntud uisutajatele, suusatajatele ja jalgratturitele. Mida suurema kiirusega liigutakse,

---

[1] Ringjoone mingist punktist diameetrile tõmmatud ristlõik on diameetri osade keskmine võrdeline, kuid samast punktist diameetri otspunkti tõmmatud kõõl on diameetri ja lähislõigu keskmine võrdeline.



Joon. 159. Vedru elastsusjõud mõjub kuulile kesktõmbejõuna.

seda raskem on teha pööret. Autojuhid teavad väga hästi, kui hädaohtlik on teha autoga pööret suure kiiruse juures.

Kinnitame mingi koormuse dünamomeetrile ja, hoides kinni dünamomeetri rõngast, paneme koormuse horisontaalses tasapinnas tiirlema. Dünamomeeter näitab seda jõudu, mis hoiab koormuse ringjoonel, s. o. kesktõmbejõudu. Liikumise kiiruse suurenedes suureneb ka kesktõmbejõud.

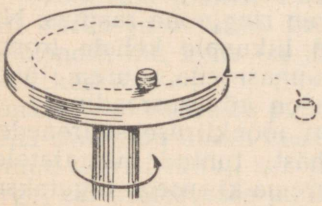
Muutes koormuse massi ja iga kord mõõtes koormusele mõjuvat jõudu, võime leida kesktõmbejõu suuruse võrdelise olenevuse keha massist.

Kesktõmbejõud ei ole mingi eri liiki jõud. Nagu iga jõud, nii ka kesktõmbejõud iseloomustab mingite teiste kehade mõju antud kehale. Kesktõmbejõuks võib olla *iga jõud, mis hoiab keha kõverjoonelisel trajektooril,* nagu näiteks hõõrdejõud, elastsusjõud, raskusjõud.

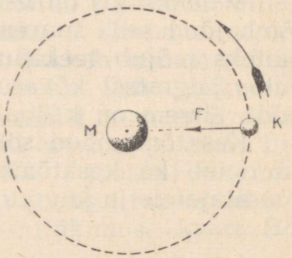
Vaatame mõningaid näiteid. Kinnitame vedru raske kuuli külge, nii nagu näidatud joonisel 159. Paneme kuuli tõukega liikuma noolega näidatud suunas. Kuul liigub algul inertsi tõttu sirgjooneliselt. Kaugus kuuli ja kinnituspunkti O vahel hakkab kasvama, vedru hakkab välja venima. Seejuures tekib kuulile kinnituspunkti suunas mõjuv elastsusjõud. See jõud tekitab kuuli samasuunalise liikumise kiirenduse ja hoiab teda kõverjoonelisel trajektooril. Sel momendil, kui vedru elastsusjõud saab võrdseks kesktõmbejõuga $\frac{mv^2}{R}$, hakkab kuul liikuma ringjoont mööda.

Selles katses on kesktõmbejõuks vedru elastsusjõud.

Asetame kettale mingi keha (joon. 160). Ketta pöörlemisel hakkab koos temaga pöörlema ka keha, mida hoiab ringjoonel



Joon. 160. Ketta pöörlemiskiiruse suurenedes keha ei püsi ringjoonel, vaid lendab kettalt ära.



Joon. 161. Maa poolt Kuule avaldatav jõud *F* on kesktõmbejõud.

hõõrdejõud. Kui suurendada ketta pöörlemiskiirust, siis ketta pinna ja keha vahel olevast hõõrdejõust ei piisa keha hoidmiseks ringjoonel ja ta lendab kettalt ära.

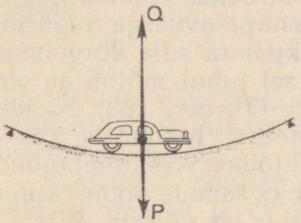
Selles katses on kesktõmbejõuks hõõrdejõud.

Maa poolt Kuule avaldatav külgetõmbejõud F (joon. 161) osutub kesktõmbejõuks; ta põhjustab Kuu tiirlemist ümber Maa.

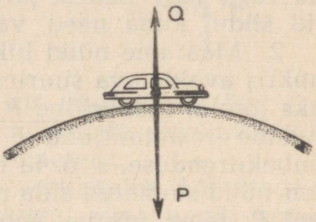
86. Näiteid kesktõmbejõu toimest. Mõningatel juhtudel on kesktõmbejõud ringjoonel liikuvale kehale kahe mõjuva jõu resultantjõuks.

Vaatleme mõnda sellist näidet.

1. Nõgusat silda mööda liigub auto kiirusega v; auto mass on m ja silla kõverusraadius R. Kui suur on suurim rõhumine, mida auto tekitab sillale kõige madalamas punktis?



Joon. 162. Nõgusat silda mööda liikuvale autole mõjuvad jõud P ja Q.



Joon. 163. Kumerat silda mööda liikuvale autole mõjuvad jõud P ja Q.

Teeme kõigepealt kindlaks, missugused jõud mõjuvad autole (joon. 162). Neid jõude on kaks: auto kaal P ja silla vastumõju Q. (Selles ja ka järgmistes näidetes me hõõrdejõudu ei arvesta.)

Kui auto seisab paigal, siis need jõud, olles suunatud ühte vertikaali mööda, tasakaalustavad teineteist.

Kui aga auto sillal liigub, siis temale, nagu igale teisele ringjoont mööda liikuvale kehale, mõjub kesktõmbejõud. Mis on selle jõu allikaks? Selle jõu allikaks saab olla ainult silla mõju autole. Jõud Q, millega sild rõhub liikuvat autot (joon. 162), peab mitte üksnes tasakaalustama auto kaalu P, vaid sundima ka teda liikuma ringjoont mööda, moodustades selleks vajaliku kesktõmbejõu F. Kuna jõud F on liikuva auto ja silla vastastikuse mõju tulemus, siis saab see olla ainult jõudude P ja Q resultantjõuks.

Kuna joonisel 162 kujutatud asendis on jõud P ja Q ühel sirgel ja suunatud vastupidiselt, siis kesktõmbejõud F on võrdne nende vahega, s. o.

$$F = Q - P. \tag{1}$$

Võrdusest (1) saab määrata silla rõhumisjõudu autole, s. o. jõudu Q:

$$Q = P + F. \tag{2}$$

Kuna $F = \frac{mv^2}{R}$, siis võime kirjutada:

$$Q = P + \frac{mv^2}{R}. \qquad (3)$$

Newtoni kolmanda seaduse järgi on jõud, millega sild rõhub autot, ühesuurune jõuga, millega auto rõhub silda, s. o., et leitud jõud Q on samaaegselt otsitavaks jõuks, millega liikuv auto rõhub silda.

Seega on jõud, millega ühtlaselt liikuv auto (või mingi teine keha) rõhub nõgusat silda, suurem auto kaalust kesktõmbejõu võrra.

Valemist (3) on näha, et suurte liikumiskiiruste, silla väikese kõverusraadiuse ja suurte masside puhul võib rõhumine sillale olla väga suur. Sellest järgneb, et pole otstarbekas ehitada nõgusaid sildu, kuna need vajaksid suure vastupidavusega tugesid.

2. Määrame nüüd liikuva auto poolt kumera silla kõrgeimas punktis avaldatava suurima rõhumise. Ka sel juhul mõjub autole kaks jõudu: raskusjõud P ja silla rõhumine Q (joon. 163). Nende jõudude resultantjõud F tekitab ringjoonelisel liikumisel kesktõmbekiirenduse, s. o. ta osutub kesktõmbejõuks. Kesktõmbejõud F on nüüd suunatud silla nõgususe poole, s. o. samale poole, kuhu jõud P; tema suurus, nagu esimeselgi juhul, on võrdne P ja Q vahega:

$F = P - Q$. Siit

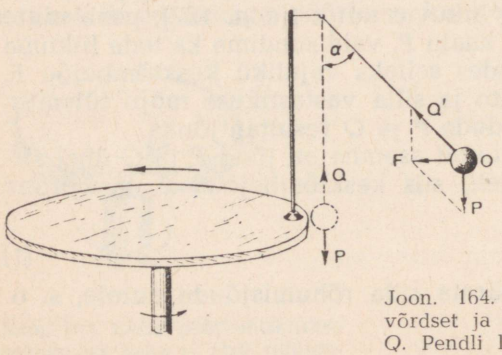
$$Q = P - F \text{ või } Q = P - \frac{mv^2}{R}. \qquad (1)$$

Suuruselt niisama suure jõuga rõhub auto silda. Võrdusest (1) on näha, et see jõud on kesktõmbejõu võrra auto kaalust väiksem.

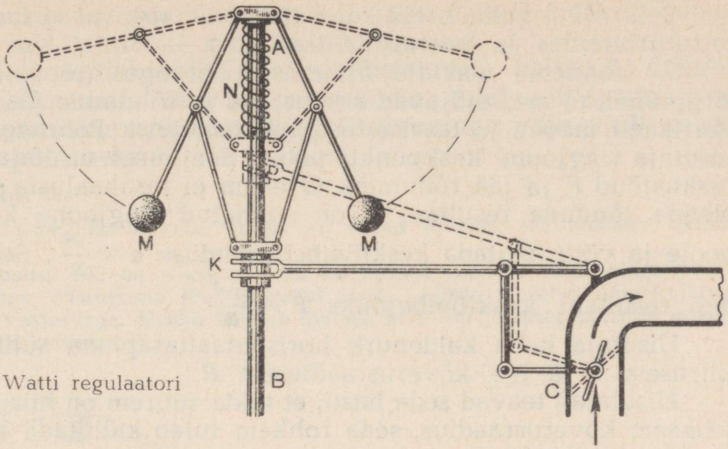
Käsitletud näidetes mõjusid ringjoont mööda liikuvale kehale ühe sirgjoone sihis rakendatud jõud.

Vaatleme nüüd näiteid, kus mõjuvad jõud moodustavad teineteisega mingi nurga.

3. Joonisel 164 on kujutatud lood, mis on asetatud pöörlevale



Joon. 164. Seisvale pendlile mõjuvad kaks võrdset ja vastupidiselt suunatud jõudu P ja Q. Pendli liikumisel mõjuvad temale jõud P ja Q, mille resultant F on kesktõmbejõuks.



Joon. 165. Watti regulaatori mudel.

lauakesele. Kui lauake seisab paigal, siis niidi tõmbejõud Q ja raskusjõud P, mis on rakendatud loe kuulikesele, on sihitud ühte vertikaali mööda ja tasakaalustavad teineteist.

Lauakese pöörlemisel kaldub lood vertikaalist kõrvale. Seejuures jõud P ja Q' enam ei tasakaalustu, kuna nende suunad moodustavad nullist erineva nurga. Nende jõudude resultandi F suurus sõltub loe kaldenurgast α. Antud kaldenurga juures liigub kuulike ringjoont mööda kesktõmbekiirendusega $a = \frac{v^2}{R}$, kus R on kaugus kera keskpunktist kuni pöörlemisteljeni. Kuulikesele mõjuv kesktõmbejõud $F = \frac{mv^2}{R}$ või $F = m\omega^2 R$. Kolmnurgast FOP võime leida kaldenurga, nurkkiiruse ja ringjoone raadiuse vahelise seose:

$\tan \alpha = \frac{F}{P} = \frac{m\omega^2 R}{mg} = \frac{\omega^2 R}{g}$. Siit on näha, et loe kalle suureneb nurkkiiruse ja raadiuse suurenemisega.

4. Vaadeldud nähtust kasutatakse Watti regulaatoris, s. o. riistas, mis hoiab muutumatuna masina pöörete arvu. See seadeldis on kujutatud joonisel 165.

Regulaatori võll AB saab pöörlemise masinalt. Massiivsed kehad M, mis on kinnitatud šarniiridel, kalduvad pöörlemisel kõrvale ja tõstavad muhvi K, surudes samaaegselt kokku vedru N. Muhv K on kangi abil ühendatud klapiga C, mis reguleerib auru andmist masina silindritesse. Kui masina pöörete arv ületab normaalse, tõuseb muhv K ja klapp C vähendab auru juurdevoolu silindritesse. Kui aga masina pöörete arv langeb, siis, ümberpöördult, muhv laskub ja klapp C suurendab auru juurdevoolu silindritesse. Iga masina võlli pöörete arvu muutumine toob endaga kaasa masina silindrisse lastava auruhulga muutumise. Selle tõttu masina võll pöörleb jääva pöörete arvuga.

Selliseid regulaatoreid kasutatakse tänapäeval aurumasinates, auruturbiinides ja veeturbiinides.

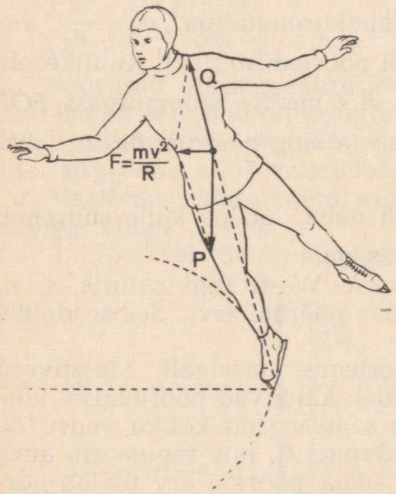
5. Vaatleme uisutaja liikumist pöörangul (joon. 166). Tee sirgjoonelisel osal mõjuvad raskusjõud ja rõhumine jää poolt üht vertikaali mööda ja tasakaalustavad teineteist. Pöörangul kaldub uisutaja ringjoone keskpunkti poole. Seejuures uisutajale mõjuv raskusjõud P ja jää rõhumine Q enam ei tasakaalusta teineteist. Nende jõudude resultant F on suunatud ringjoone keskpunkti poole ja võib tekitada kesktõmbekiirenduse $a = \frac{v^2}{R}$. Seega kujuneb resultant kesktõmbejõuks $F = \frac{mv^2}{R}$.

Uisutaja keha kaldenurk horisontaaltasapinna suhtes sõltub kiirusest v ja tee kõverusraadiusest R.

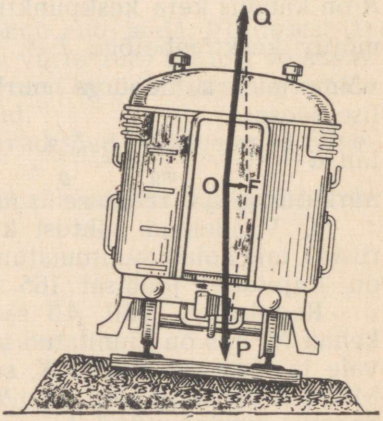
Uisutajad teavad seda hästi, et mida suurem on kiirus ja mida väiksem kõverusraadius, seda rohkem tuleb kallutada keha ringi keskpunkti poole.

Analoogilise nähtusega on tegemist kurvidel jalgratturiga ja jooksjaga. Kõikidel neil juhtudel tekitatakse kalle liikuva inimese enda poolt.

6. Rongi liikumisel kurvil tekitatakse kalle tee vastava ehitusega: välist rööbast tõstetakse sisemise suhtes, s. t. rööpad asetsevad kurvil kaldega ringjoone keskpunkti poole (joon. 167).



Joon. 166. Pöörangutel kaldub uisutaja keskpunkti poole. Raskusjõud P ja jää vastumõju Q annavad resultantjõu, mis põhjustabki kesktõmbekiirenduse tekkimist.



Joon. 167. Raudtee kallakus kurvidel. Vaguni raskusjõud P ja rööbaste poolt vagunile tekitatav rõhumine Q annavad resultantjõu, mis põhjustabki kesktõmbekiirenduse tekkimist.

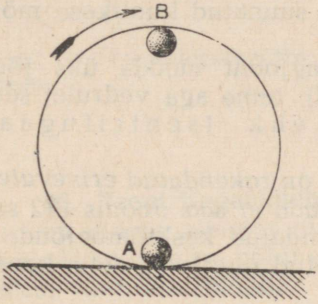
Sellisel juhul mõjuvad vagunile jõud P ja Q, mille resultant on F ja mis tekitabki kesktõmbekiirenduse.

Raudtee kallakus on enesestmõistetavalt ehitatud mingile keskmisele kiirusele. Selle keskmise kiiruse tunduv ületamine toob endaga kaasa suure rööbaste külgrõhumise, mis võib saada rongiõnnetuse põhjuseks.

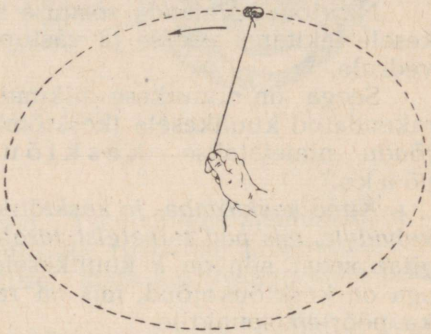
Harjutus 45.

1. Näidake liikuva keha kiirenduse suund joonisel 168 näidatud asenditesA ja *B*.

2. Joonisel 169 on näidatud käsi, mis paneb tiirlema nööri külge seotud kivi. Selgitage, missugused jõud mõjuvad kivile, nöörile ja käele, ning kujutage neid jõude vektoritega. Kuidas hakkab liikuma kivi, kui joonisel näidatud asendis toimub nööri katkemine?

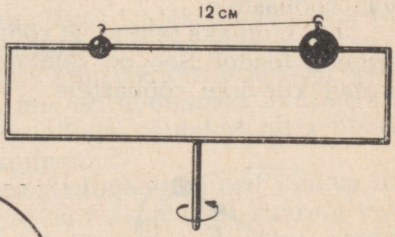


Joon. 168. Ülesande 1 juurde.



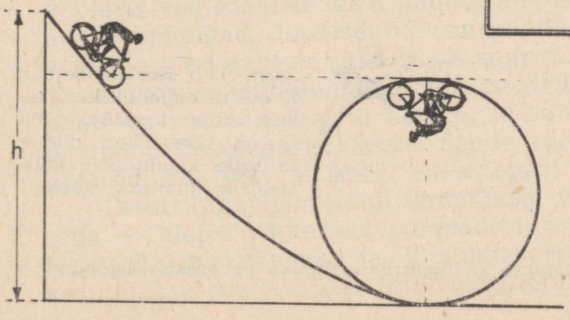
Joon. 169. Ülesande 2 juurde.

3. Joonisel 170 on kujutatud riist, mis koosneb varvast, mida mööda võivad libiseda kaks kuuli. Ühe kuuli mass on kaks korda suurem teise kuuli massist. Kuulid on kokku seotud niidiga nii, et nende raskuspunktid on teineteisest 12 cm kaugusel. Riist tervikuna pannakse pöörlema vertikaalse telje ümber. Selgitage, kuidas peaksid asetsema kuulid pöörlemistelje suhtes, et riista pöörlemisel ümber telje jääksid kuulid paigale ja ei libiseks mööda varba.



Joon. 170. Ülesande 3 juurde.

Joon. 171. Ülesande 4 juurde.



4. Arvutada jalgratturi minimaalne kiirus, millega ta peaks liikuma «surmasõlme» kõrgeimas punktis, et mitte alla kukkuda. Sõlme raadius on 8 m. Kui jalgrattur ei kasuta pedaale, kui suur on siis minimaalne kõrgus, millest ta peaks alustama laskumist?

5. Kui nööri otsa siduda väike ämber veega, siis võib seda ämbrikest tiirutada ringi mööda, ilma et vesi ämbrist välja voolaks. Valmistage ämbrike plekkpurgist ja tehke läbi see katse. Katsuge seda seletada.

87. Newtoni kolmas seadus ühtlase sirgjoonelise liikumise juures. Ringjoonelise liikumise vaatlemise juures me pöörasime tähelepanu ainult sellele jõule, mis mõjub liikuvale kehale. Nii näiteks ühes käsitletud näites (§ 85) mõjus ringjoont mööda liikuvale kuulikesele venitatud (deformeeritud) vedru elastsusjõud (joon. 159).

Newtoni kolmanda seaduse kohaselt peab vedru mõju kuulikesele tekitama võrdse ja vastupidiselt suunatud kuulikese mõju vedrule.

Seega on kuulikese liikumisel ringjoont mööda üks jõud rakendatud kuulikesele (kesktõmbejõud), teine aga vedrule; seda jõudu nimetatakse kesktõuke- ehk tsentrifugaaljõuks.[1]

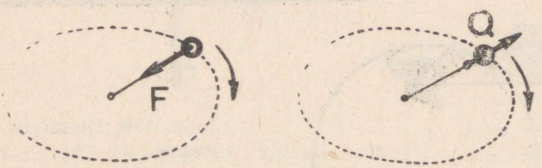
Kuna kesktõmbe- ja kesktõukejõud on rakendatud erinevatele kehadele, siis nad teineteist tasakaalustada ei saa. Joonis 172 selgitab seda: siin on *F* kuulikesele rakendatud kesktõmbejõud, *Q* aga on kesktõukejõud, mis on rakendatud niidile ja selle kaudu ka pöörlemispunktile.

Me teame, et kui keha mõjub mingile teisele kehale mingi jõuga, siis nad mõlemad deformeeruvad. Järelikult ei ole kuulikese liikumisel ringjoont mööda deformeeritud mitte üksi vedru või niit, mis mõjub kuulikesele, vaid ka kuulike ise.

See kehtib kehade ringjooneliste liikumiste kõikide juhtude kohta.

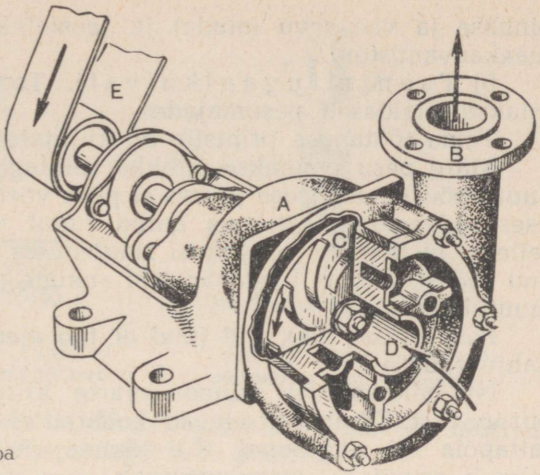
Nii näiteks deformeeruvad trammi liikumisel kurvidel rööpad ja rõhuvad ratastele, kuid rattad, olles samuti deformeeritud, rõhuvad rööbastele.

On kindlaks tehtud, et rööpad kurvidel kuluvad rutem läbi kui sirgetel teedel. See on seletatav külgrõhumisega, mida tekitavad rattad kurvidel rööbastele.



Joon. 172. Kesktõmbejõud *F* on rakendatud kuulikesele, kuid kesktõukejõud *Q* on rakendatud niidile ja selle kaudu pöörlemistsentrile (näiteks käele).

[1] Kesktõmbejõudu nimetatakse ka tsentripetaaljõuks ja kesktõukejõudu — tsentrifugaaljõuks. *Tõlkija.*



Joon. 173. Tsentrifugaalpumba skeem.

88. Tsentrifugaalmehhanismid. Tsentrifugaalmehhanismid — see on üldine nimetus mitmesugustele riistadele ja aparaatidele, millede töötamine põhineb nähtusel, mida käsitlesime keha liikumisel ringjoont mööda.

Selliste mehhanismide hulka kuulub ka juba käsitletud Watti regulaator.

Vaatleme veel mõnda neist.

a) T s e n t r i f u g a a l p u m p. Tsentrifugaalpumba skemaatiline kujutis on antud joonisel 173.

Õõnsas kestas *A* on ribidega ketas *C*, mis pannakse mootoriga kiiresti pöörlema mehhanismi *E* abil. Enne käimapanemist täidetakse pump veega. Ketta pöörlemisel hakkab pöörlema ka pumba kestas olev vesi. Kuna veeosakestevahelisest kohesioonist ei piisa nende hoidmiseks ringjoonelistel trajektooridel, siis lendavad need osakesed puutujaid mööda vertikaalsesse torru *B*. Kestas, ketta ümber, tekib alarõhk. Õhurõhk surub kestast väljavoolava vee asemele toru kaudu, mis on ühenduses avausega *D*, uued veehulgad. Joonisel 173 on nooltega näidatud ratta pöörlemise ja veeosakeste liikumise suunad.

Erinevalt kolbpumpadest on tsentrifugaalpumbad pideva töötamisega pumbad. Nende kasutegur on märgatavalt suurem kolbpumpade kasutegurist, kuna nende töötamisel ei esine energia kadusid, mis tekivad kolvi edasi-tagasi liikumisel silindris.

Tsentrifugaalpumpasid ehitatakse väga mitmesuguse suurusega — alates väikestest pumpadest, mida kasutatakse automootori jahutussüsteemis, ja lõpetades võimsate pumpadega, mida kasutatakse mullatöödel (pinnasepump). Nende abil pumbatakse

pinnase ja vee segu (muda) ja teostatakse niiviisi hiiglaslikke maakaevamistöid.

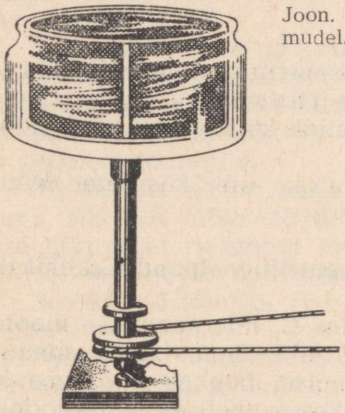
b) Tsentrifugaalkuivati. Tsentrifugaalkuivatit kasutatakse laialdaselt pesumajades.

Tema töötamise printsiip on kujutatud joonisel 174.

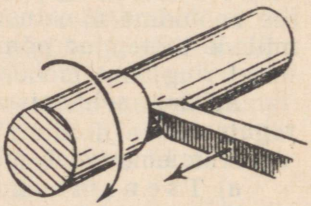
Märg pesu pannakse auklike seintega pöörlevasse trumlisse. Suure pöörlemiskiiruse juures ei piisa veetilgakeste ja riide vahelisest adhesioonjõust, mis antud juhul osutub kesktõmbejõuks, selleks et hoida veetilgakesi ringlemises. Veetilgakesed kisuvad end riidest lahti ja lendavad läbi aukude trumlist välja ning pesu muutub kuivaks.

Pöörlemisel tekkinud jõud ei too alati kasu; nad võivad ka kahju tuua.

Nii näiteks võib esineda suurte kiiruste juures hoorataste purunemist. Tõmbe all olevad kodarad ei suuda igal juhul hoida rattapöia osi ringjoonel. Kui tõmme on ületanud lubatud piiri, toimub avarii — ratas puruneb.



Joon. 174. Tsentrifugaalkuivati mudel.



Joon. 175. Detaili pöörlev ja lõiketera kulgev liikumine treipingil.

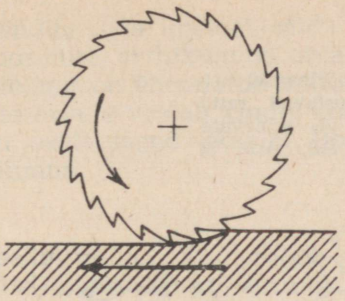
89. Kõva keha pöörlev liikumine. Kõva keha lihtsaimateks liikumisteks on kulgev (translatoorne) ja pöörlev (rotatoorne) liikumine. Kulgeva liikumisega me tutvusime juba VIII klassis.

Pöörlev liikumine on looduses ja tehnikas väga laialt levinud. Selle liikumise näiteks võiks olla Maa liikumine oma telje ümber, hoorataste ja seibide liikumine, treitava keha liikumine treipingil, grammofoniplaadi liikumine ja paljud teised.

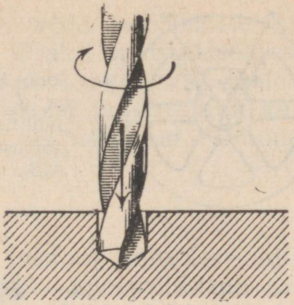
Joonisel 175 on kujutatud detaili pöörlev liikumine treipingil ja lõiketera kulgev liikumine.

Joonisel 176 aga liigub detail kulgevalt, kuid tera (frees) pöörleb.

Tahke keha mistahes liikumist võib kujutleda kui kulgeva ja pöörleva liikumise resultaati. Eriti hästi on võimalik seda näha



Joon. 176. Detail liigub kulgevalt paremalt vasakule, kuid tera pöörleb.



Joon. 177. Puur puurimisel pöörleb ja liigub kulgevalt.

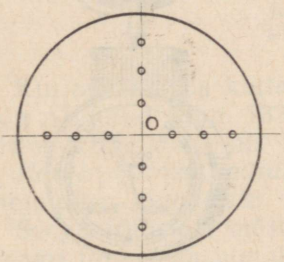
liikumisel kruvijoont mööda. Kruvi keeramisel näiteks mutrisse liigub kruvi kulgevalt ja samaaegselt ka pöörleb.

Puur (joon. 177) töötamisel samuti pöörleb, kuid liigub samaaegselt ka kulgevalt. Veoki ratas, pööreldes ümber oma telje, liigub samaaegselt koos veokiga ka kulgevalt. Selliseid näiteid võib tuua kuitahes palju.

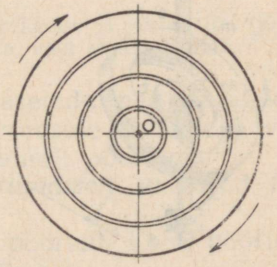
Võtame papist ketta, millele on joonistatud ringikesed mitmesugusel kaugusel tsentrist (joon. 178 *a*), ja paneme ta kiiresti pöörlema — me näeme rida mitmesuguste raadiustega ringjooni (joon. 178 *b*). See katse näitab, et keha pöörlemisel tema kõik punktid liiguvad ringjooni mööda.

Ringjoonte tsentrid asetsevad sirgel, mida nimetatakse p ö ö r l e m i s t e l j e k s.

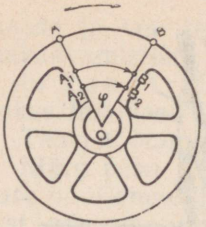
Ringjoontel liikuvate punktide raadiuste pöörded mingi ajavahemiku jooksul on keha kõigi punktide jaoks ühesugused. Seepärast võib ühe mingi ringjoonel liikuva punkti raadiuse pöördenurga abil, mis on tekkinud antud ajavahemiku jooksul, iseloomustada kõikide punktide, s. o. terve keha liikumist.



Joon. 178 *a*. Piki diameetrit on paigutatud väikesed ringikesed.



Joon. 178 *b*. Ketta pöörlemisel näeme ringikeste asemel ringjooni, mida mööda liiguvad ringikesed.



Joon. 179. Ratta pöörlemisel nurga φ võrra moodustavad ratta punktid A, A_1 ja A_2 erinevate pikkustega kaared AB, A_1B_1 ja A_2B_2.

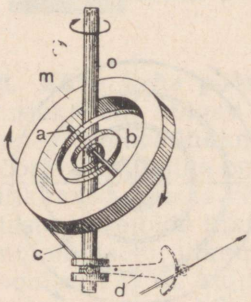
Ühe sekundi jooksul tekkinud pöördenurk on arvuliselt võrdne nurkkiirusega. Järelikult *nurkkiirus on pöörleva keha kõikide punktide jaoks ühesugune.*

Joonisel 179 on näha, et ratta pöörlemisel nurga φ võrra ratta mitmesugused punktid A, A_1 ja A_2 moodustavad pikkuselt erinevad kaared AB, A_1B_1 ja A_2B_2; mida kaugemal on punkt pöörlemisteljest, seda suurem on tema poolt moodustatud kaar ja seda suurem on joonkiirus.

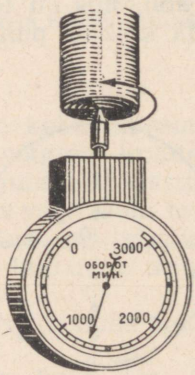
Seega *keha pöörlemisel liiguvad keha kõik punktid ühe ja sama nurkkiirusega, kuid erinevate joonkiirustega.*

Nurk- ja joonkiiruse vahelist seost väljendav valem on märgitud § 83-s.

90. Tahhomeeter. Pöörleva keha (pöörlevate masinaosade, rataste, võllide jt.) nurkkiirust mõõdetakse spetsiaalse riista — *tahhomeetri*[1] abil. On olemas mitmesugust tüüpi tahhomeetreid. Joonisel 180 on kujutatud nõndanimetatud tsentrifugaaltahhomeetri ehituse skeem. Rõngakujuline koormus *m*, mis võib pöörelda ümber telje *a*, hoitakse kaldasendis spiraalvedru *b* abil. Telg *a* on kinnitatud peavõllile *O*. Viimane ühendatakse võlliga, mille pöörete arvu tahetakse mõõta. Võlli *O* pöörlemisel püüab koormus *m* asetuda peavõlli *O* suhtes risti. Seejuures on ta sellele



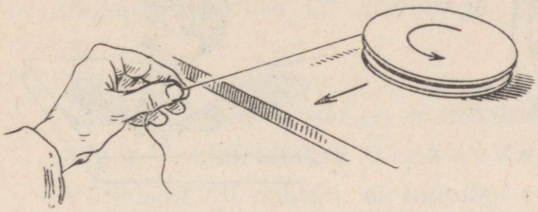
Joon. 180. Tahhomeetri ehituse skeem.



Joon. 181. Tahhomeeter.

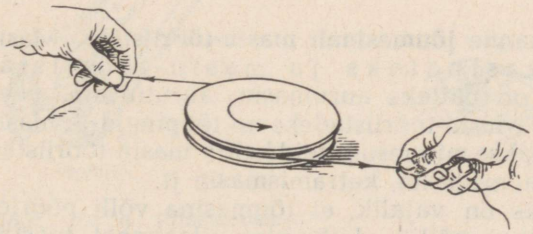
[1] Tahhomeeter — kreeka k. *tachys* — kiire, *metron* — mõõt.

asendile seda ligemal, mida suurem on võlli pöörlemise kiirus. Koormuse *m* liikumine antakse kangi *C* abil spetsiaalsele seadisele, mis on ühendatud sektoriga *d*, mis pöörabki osutit. Igale pöörete arvule vastab kindel koormuse *m* asend ja järelikult ka kindel osuti asend skaalal. Joonisel 181 on näidatud tahhomeetri välimus.



Joon. 182. Tõmmates niidist, me paneme ketta mitte üksi pöörlema, vaid ka edasi nihkuma.

91. Telje ümber pöörlevale tahkele kehale mõjuvad jõud. Teeme järgmise katse. Kerime kettale niidi ja tõmbame sellest (joon. 182). Kehale hakkavad mõjuma kaks jõudu: niidi pinge ja ketta ning laua vaheline hõõre. Nende jõudude toimel hakkab ketas pöörlema ja samaaegselt edasi liikuma.



Joon. 183. Kahe paralleelse ja võrdse jõu (jõupaar) toimel ketas ei nihku, vaid ainult pöörleb.

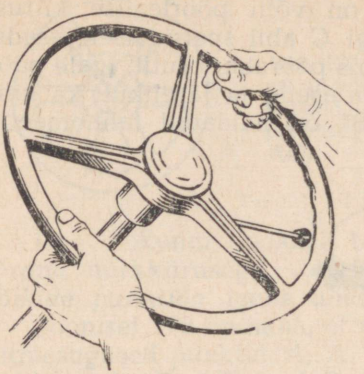
Kui aga kerida kettale kaks niiti, asetada nad paralleelselt (nagu näidatud joon. 183) ja tõmmata võrdsete jõududega vastupidistes suundades, siis hakkab ketas ainult pöörlema.

Kahte võrdset paralleelset ja vastupidiselt suunatud jõudu nimetatakse jõupaariks.

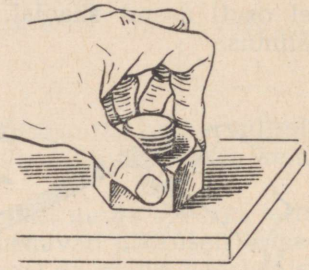
Seega jõupaari mõjul keha ainult pöörleb. Keha pöörlemist jõupaari toimel kasutatakse laialt praktikas.

Autojuhi käe mõjul tekib näiteks roolirattal (joon. 184) jõupaar.

Samuti moodustavad mutrit keeravad näpud jõupaari (joon. 185).



Joon. 184. Autojuhi käte kaudu mõjub roolile jõupaar.



Joon. 185. Mutrit keeravad näpud moodustavad jõupaari.

Harjutus 46.

1. Kella sekundiosuti ots liigub 0,8 cm pikkuse raadiusega ringjoonel, minutiosuti ots 2 cm pikkuse raadiusega ringjoonel ja tunniosuti ots 1,5 cm pikkuse raadiusega ringjoonel. Leida osutite otste joon- ja nurkkiirused.
2. Veduri veoratta läbimõõt on 1,6 m, ratas teeb 120 pööret minutis. Kui suure kiirusega liigub vedur?
3. Leida Maa ööpäevasest pöörlemisest tingitud Moskva laiusel oleva maapinna punkti joon- ja nurkkiirus. Maa raadius võtta 6400 km.

92. Pöörlemise ülekanne jõumasinalt masin-tööriistale. Masinad liigitatakse jõumasinateks ja masin-tööriistadeks. Jõumasinateks on näiteks aurumasin, auruturbiin, veeturbiin, elektrimootor jt. Masin-tööriistadeks on tööpingid ja masinad, millede abil töödeldakse mitmesuguseid kehi; masin-tööriistad on näiteks treipink, kudumismasin, ketramismasin jt.

Tööpingi töötamiseks on vajalik, et jõumasina võlli pöörlemine kantaks üle tööpingi võllile. Liikumise ülekannet teostatakse mitmel viisil. Kõige sagedamini kasutatakse selleks kolme järgmist ülekande viisi: rihmülekanne, friktsioon- ehk hõõrdülekanne ja hammasülekanne.

Vaatleme nende ülekannete kõige lihtsamat juhtu, nimelt seda, kus jõumasina ja tööpingi võllid on paralleelsed.

93. Rihmülekanne. Rihmülekande puhul on kaks ratast (seibi), milledest üks on kinnitatud ühele võllile ja teine teisele võllile, haaratud «lõputa» rihma poolt. Jõumasina võllil olevat ratast *A* nimetatakse veorattaks, tööpingi võllil olevat ratast *B* nimetatakse veetavrattaks (joon. 186).

Kui rataste diameetrid ei ole võrdsed, siis nende pöörete arvud on erinevad, kuna kiirused nii ühe kui teise ratta piiretel on võrdsed.

Olgu veoratta diameeter D_1 ja tehku ta sekundis n_1 pööret. D_2 olgu veetavratta diameeter ja n_2 tema pöörete arv. v olgu kiirus mõlema ratta piirdel.

Siis: $v = \pi D_1 n_1$ ja $v = \pi D_2 n_2$.

Siit: $n_1 = \frac{v}{\pi D_1} \ldots$ (1) ja $n_2 = \frac{v}{\pi D_2} \ldots$ (2).

Jagades võrduse (2) võrdusega (1) saame

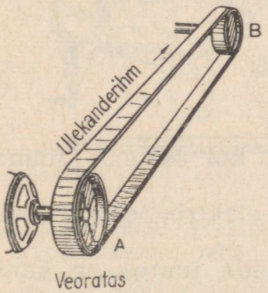
$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{D_1}{D_2} \ldots\ldots \text{(3)}.$$

Rataste pöörete arvud on pöördvõrdelised nende diameetriga.

Suhet $\frac{n_2}{n_1}$ nimetatakse ülekandearvuks.

Võrdusest (3) nähtub, et *tööpingi võlli pöörete arv on seda suurem, mida väiksem on tema ratta diameeter.*

Praktikas harilikult ei kasutata suuremat ülekandearvu kui 5. Asi seisab selles, et veetavratas pannakse liikuma ratta ja rihma vahelise hõõrdejõu tõttu. Selle jõu suurus aga sõltub kaare pikkusest, mida haarab rattal olev rihm. Selles on kerge veenduda järgmise lihtsa katse abil.

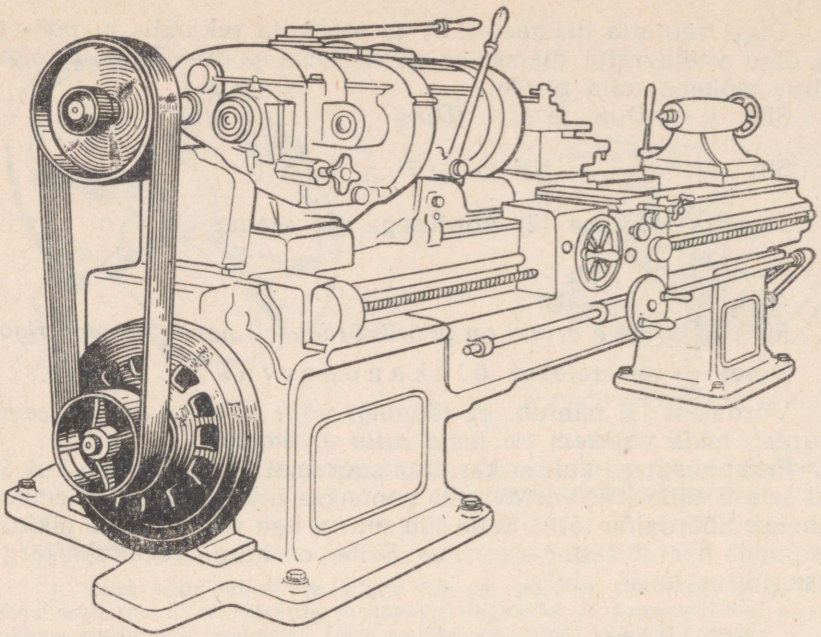


Joon. 186 *a*. Rihmülekanne: *A* — veoratas, *B* — veetavratas. Mõlemad rattad pöörlevad ühes suunas.

Joon. 186 *b*. Rihmülekanne. Rattad pöörlevad vastupidistes suundades.

Viskame nööri üle ümmarguse põikpuu. Ühte otsa riputame koormuse, kuna teise otsa kinnitame dünamomeetri. Koormuse kinnihoidmiseks peame tarvitama jõudu, mis on natukene väiksem koormuse kaalust (väiksem põikpuu ja nööri vahelise hõõrdejõu võrra). Keerame nööri ühe korra ümber põikpuu, sellega me suurendame kaart, mille ulatuses nöör haarab põikpuud. Koormuse hoidmiseks vajalik jõud on sel juhul palju väiksem koormuse kaalust (nööri ja põikpuu vahelise hõõrdejõu võrra).

Joonisel 186 *a* pöörlevad mõlemad rattad kellaosuti liikumise suunas. Rihmülekandega võib panna veetava ratta pöörlema ka



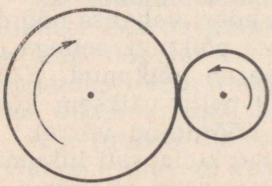
Joon. 187. Rihmülekanne elektrimootorilt treipingi võllile (joonisel on elektrimootor ja treipingi rihmaratas esile tõstetud).

vastupidises suunas. Selleks on küllaldane, kui asetame rihma risti, nii nagu näidatud joonisel 186 *b*.

Joonisel 187 on näidatud rihmülekannet elektrimootorilt treipingi võllile.

94. Friktsioonülekanne. Friktsioonülekande juures on kaks ratast surutud teatud jõuga teineteise vastu (joon. 188 *a*). Ühe ratta pöörlemisel näiteks kellaosuti liikumise suunas hakkab teine hõõrde tõttu ka pöörlema, kuid kellaosuti liikumisele vastupidises suunas. Niisugust ülekannet kasutatakse näiteks õmblusmasina hooratta ja pooliratta juures (joon. 188 *b*) ja tahhomeetri ning mootori võlli juures mootori pöörete arvu mõõtmisel.

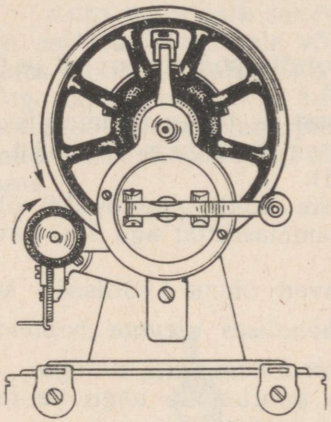
Friktsioonülekannet kasutatakse üldiselt väikeste võimsuste juures. Nagu teada, on ühe ja sama kiiruse juures võimsus võrde-



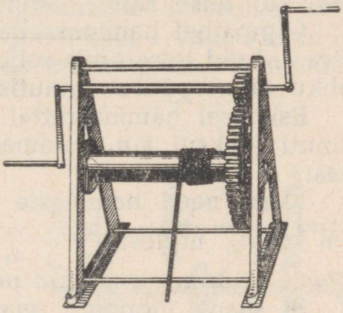
Joon. 188 *a*. Friktsioonülekande skeem.

line mõjuva jõu suurusega. Kuid jõud, mis mõjub veetavale friktsioonrattale, sõltub mõlema ratta vahelisest hõõrdest. Kuid hõõrdejõud sõltub rõhust. Järelikult peame suure võimsuse puhul rattad suruma suure jõuga teineteise vastu. Selle tagajärjel aga võib kõverduda võll, millele on asetatud ratas.

95. Hammasülekanne. Hammasülekanne leiab kõige laialdasemat rakendamist tehnikas. Nii näiteks toimub auto juures mootorist ülekanne ratastele hammasrataste kaudu. Samuti on see traktori ja trammi juures. Hammasrataste abil toimub laeva jõumasina liikumise ülekanne laevakruvile. Hammasrattaid kasutatakse paljude tööpinkide juures liikumise ülekandeks jõumasinalt tööpingile jne.



Joon. 188 *b*. Friktsioonülekanne õmblusmasina ratta ja pooliratta vahel.

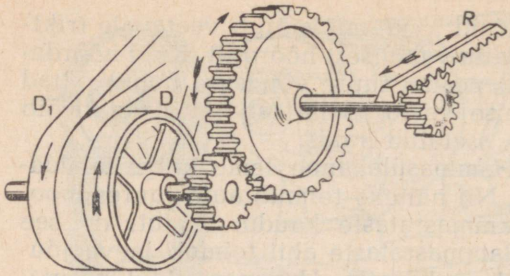


Joon. 189. Vints.

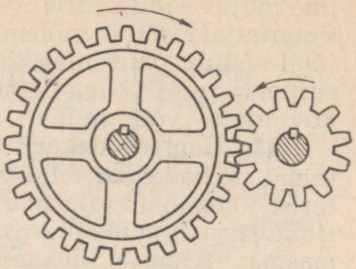
Joonisel 189 on kujutatud hammasrataste rakendamine käsivintsi juures.

Hammasrataste abil võib pöörlevat liikumist muuta ka kulgevaks, nagu seda on näidatud joonisel 190.

Sellel joonisel on kujutatud höövelpingi ühe kõige tarvitatavama mehhanismi lihtsustatud skeem. Rattalt D (mida pannakse pöörlema rihmaga) antakse liikumine edasi võllide ja nendel asetsevate hammasrataste süsteemi abil hammaslatile R. Hammaslatt liigub kulgevalt suunas, mis on joonisel märgitud sabaga noole abil, ja ühes temaga ka höövelpingi laud (ei ole joonisel kujutatud), millega on ühendatud hammaslatt. Kui hammaslatt on jõudnud lõpuni, viiakse ristuv rihm erilise seadeldise abil rattale D_1. Seejuures saab hammaslatt tagasikäigu suunas, mis on märgitud sabata noolega.



Joon. 190. Höövelpingi ülekande lihtsustatud skeem.



Joon. 191. Pöörete arvu ja hammaste arvu suhe.

Veetavratta pöörete arv sõltub veoratta pöörete arvust ja nii ühe kui teise ratta hammaste arvust.

Olgu ühel hammasrattal z_1 hammast ja tehku ta minutis n_1 pööret, kuid teisel, mis sellega ühenduses on, olgu z_2 hammast ja tehku ta n_2 pööret minutis (joon. 191).

Esimesel hammasrattal läbib rataste kokkupuutepunkti ühe minuti jooksul $z_1 n_1$ hammast, teisel hammasrattal aga $z_2 n_2$ hammast.

Kuna need hammaste arvud peavad olema võrdsed, siis $z_1 n_1 = z_2 n_2$, millest $\frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1}$, s. o. *ühenduses olevate hammasrataste pöörete arvud on pöördvõrdelised hammaste arvuga.*

Et saada tööpingil samasuunaline pöörlemine nagu veorattalgi, kasutatakse vahele lülitatavat hammasratast.

Et saada tööpinkidel vajalikke kiirusi, kasutatakse kiirustekasti, autodel ja traktoritel aga käigukasti.

Ülekannet nendes teostatakse hammasrataste abil.

Joonisel 192 on kujutatud käigukasti ehitus ja joonisel 193 on näidatud skemaatiliselt auto kolm ülekannet. Siin *A* on veovõll, *B* — veetavvõll ja *C* — vahevõll. Erilise mehhanismi abil võib lahutada võllid *A* ja *B*. Veovõllile on asetatud hammasratas *1* (joonisel 192 on kujutatud sellest hammasrattast ainult tagumine pool), vahevõllile — *2*, *3*, *4* ja *7* ning veetavvõllile — liuglevad hammasrattad *5* ja *6*.

Koos võlliga *B* pöörlevad hammasrattad *5* ja *6* võivad rõngaste *M* (joon. 193) abil, millesse käivad erilised hargid (käigulülitushargid, joon. 192), liikuda mööda võlli *B*.

Hammasratas *1* on alati hambumises hammasrattaga *2*. Hammasratas *7* ja temaga hambumises olev hammasratas *8* (joon. 192) on tagasikäigu jaoks.

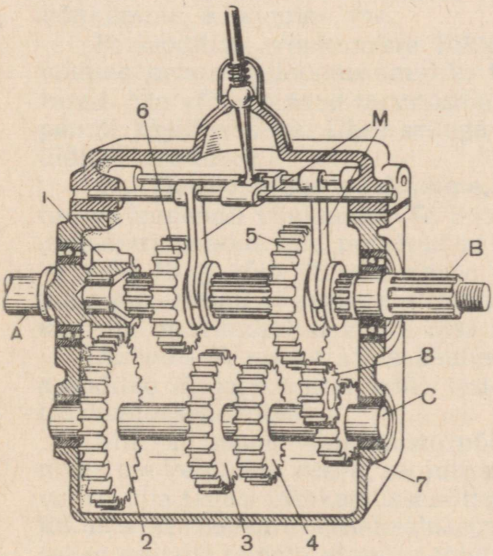
I ülekanne (I käik). Hammasratas 5 on hambumises hammasrattaga *4*. Võllidel *B* ja *A* ei ole otseühendust. Veetavvõll lii-

gub kõige väiksema kiirusega antud mootori pöörete arvu juures. Esimene käik annab kõige suurema veojõu; seda kasutatakse «kohalt võtmiseks».

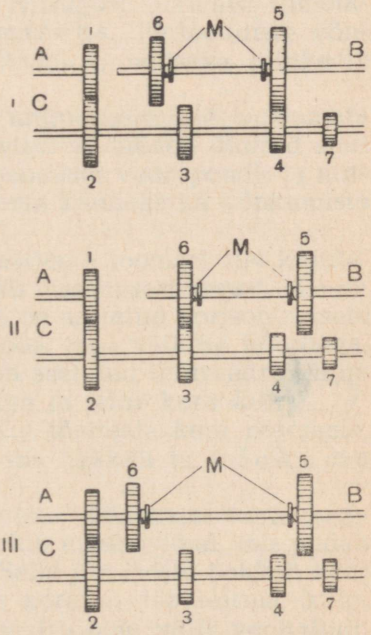
II ülekanne (II käik). Hammasratas *6* on hambumises hammasrattaga *3*. Võllidel *B* ja *A* pole otseühendust. Võlli *B* pöörlemise kiirus kasvab. Teist käiku kasutatakse hoovõtmiseks ja keskmise raskusega takistuste ületamiseks.

III ülekanne (III käik). Võllid *A* ja *B* on otseühenduses. Hammasrattad *5* ja *6* ei ole ühendatud vahevõlli *C* hammasratastega. Veetavvõll teeb niisama palju pöördeid kui veovõllgi. Vahevõll *C* jookseb tühjalt. Selle ülekande juures saab auto liikumise kiirus olla kõige suurem. Kolmandat käiku kasutatakse auto liikumisel kõikidel neil juhtudel, kus ei ole vaja ületada suurendatud takistusi.

Auto tagasikäik saavutatakse erilise hammasratta *8* abil, mis on asetatud lühikesele võllile (näidatud joon. 192). See hammasratas on alati hambumises vahevõllil *C* asetseva hammasrattaga *7*. Tagasikäiku on tarvis autoga manööverdamisel (kitsamas kohas ümberpööramisel, tagurpidi sõitmisel jne.). Käigu vahetamine toimub erilise mehhanismi abil, mis on kujutatud joon. 192 ülemises osas.



Joon. 192. Käigukasti ehituse skeem.



Joon. 193. Auto käigukasti hammasrataste ühendamise skeem.

Sidur võimaldab ajutiselt mootorit jõuülekandeseadeldisest lahutada, mis on vajalik käigu vahetamise ja auto pidurdamise ajal. Peale selle võimaldab sidur seisva auto sujuvat, ilma järsu tõuketa liikumapanemist («kohalt võtmist»).

Harjutus 47.

1. Kaks võlli on ühenduses lõputa rihmaga. Veovõll teeb 150 pööret minutis. Veetavvõllile, mis peab tegema 375 pööret minutis, on asetatud 250 mm-lise diameetriga rihmaratas. Kui suure diameetriga peab olema veovõlli rihmaratas?
2. Veorattal on 20 hammast ja ta teeb 200 pööret minutis. Kui palju on hambaid veetavrattal, kui ülekande arv on $^1/_4$? Leida veetavratta pöörete arv.
3. Aurumasina hooratas teeb minutis 225 pööret. Ratta diameeter on 1200 mm. Jõu suurus hooratta piirdel on 300 kG. Leida aurumasina võimsus.
4. Leida elektrimootori hooratta piirdel oleva jõu suurus, kui ta diameeter on 500 mm, mootori võimsus on 60 hobujõudu ja pöörete arv minutis on 975.

VIII PEATÜKK.

VÕNKUMISED JA LAINED.

96. Perioodiline liikumine. Looduses ja tehnikas ettetulevate mitmekesiste mehhaaniliste liikumiste hulgas on niisuguseid, mis korduvad võrdsete ajavahemike tagant. Selliseid liikumisi nimetatakse perioodilisteks. Ajavahemikku, mille järel toimub liikumise kordumine, nimetatakse perioodiks.

§ 89 me juba vaatlesime perioodilise liikumise ühte liiki — keha ühtlast pöörlemist. Selles liikumises läbib iga punkt iga uue pöörde puhul ühed ja samad asendid. Kõik see toimub samas järjekorras ja samasuguste kiirustega.

Tutvume nüüd niisuguste perioodiliste liikumistega, milles keha liigub oma stabiilsema tasakaaluasendi ümber, kaldudes sellest kord ühele, kord teisele poole. Niisugust liikumist nimetatakse perioodiliseks võnkumiseks. Perioodiliste võnkumiste näideteks on kellapendli liikumine, heliseva pillikeele võnkumine, kiikumine jne.

Perioodiliste võnkumiste liikide mitmekesisusele vaatamata võtame nende iseloomustamiseks tarvitusele mõned üldised suurused. Me võtame need tarvitusele ühenduses vedrupendli ja niitpendli käsitlemisega. Ühes sellega teeme kindlaks ka võnkumiste üldised seadused.

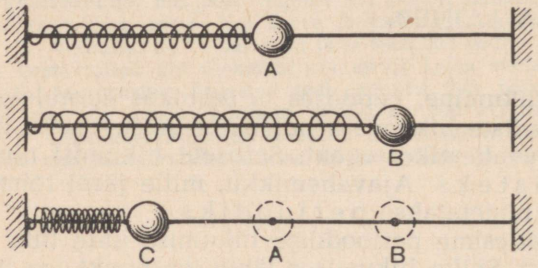
97. Harmooniline võnkumine. Vaatleme joonisel 194 kujutatud vedrupendli võnkumist. Ta koosneb massiivsest kerast, mis on diameetrit mööda läbi puuritud ja mis on asetatud horisontaalsele varvale. Kera võib libiseda varba mööda väga väikese hõõrdega, mida me esialgu ei arvesta. Varvale on asetatud terasvedru, mille üks ots on kinnitatud varva otsa külge ja teine kera külge.

Asendis *A* on kera tasakaalus. Kui tõmmata kera paremale, asendisse *B*, ja seejärel lahti lasta, siis hakkab ta võnkuma tasakaaluasendi ümber.

Mis on nende võnkumiste põhjuseks? Tõmmates kera paremale, me venitame vedru, seejuures tekib elastsusjõud, mis püüab vedru viia tagasi tasakaaluasendisse. Selle jõu mõjul hakkab kera liikuma kiirenevalt. Tasakaaluasendis kera ei jää seisma, kuigi selles asendis temale ei mõju jõudu (vedru pole välja venitatud). Liikudes inertsi mõjul läbib kera tasakaaluasendi ja hakkab vedrut kokku suruma. Seejuures tekkinud elastsusjõud takistab

vedru kokkusurumist, mille tagajärjel vedru, jõudes asendisse *C*, jääb seisma. Kokkusurutud vedru elastsusjõu mõjul hakkab kera seejärel liikuma kiirenevalt paremale. Inertsi tõttu ta läbib uuesti tasakaaluasendi ja jõuab uuesti asendisse *B*, tehes niiviisi ühe täisvõnke. Edaspidi kordub kõik samas järjekorras.

Seega *raske kera vaba võnkumise põhjuseks on vedru elastsusjõud, mis tekib vedru venitamisel ja kokkusurumisel, ning kera inerts.*



Joon. 194. Koormusega vedru võnkumine.

Mõõtmised näitavad, et võnkuva keha hälbe suurenemisega suureneb võrdeliselt hälbega ka vedru elastsusjõud.

Tähendab, kui nihutada kera tasakaaluasendist kaugusele x, siis jõudu *F*, mis toob teda tasakaaluasendisse tagasi, määratakse võrdusest

$$F = kx, \qquad (1)$$

kus *k on võrdetegur, mis on antud vedru suhtes jääv suurus, ja on arvuliselt võrdne jõuga, mis venitab vedrut ühe pikkusühiku võrra.*

Märgime, et jõud *F* on alati suunatud tasakaaluasendi poole, kuna nihkumist (hälvet) *x* loetakse tasakaaluasendist, s. o. jõu suhtes vastupidise suunaga. Et see avalduks valemis, tuleb võrduse (1) parem pool võtta miinusmärgiga:

$$F = -kx. \qquad (2)$$

Hälbega võrdelise ja tasakaaluasendi poole suunatud jõu mõjul toimuvaid perioodilisi võnkumisi nimetatakse harmoonilisteks (ehk lihtsateks) võnkumisteks.

Newtoni teisele seadusele vastavalt $F = ma$, kus *a* on jõu *F* mõjul tekkinud kiirendus. Kui harmoonilist võnkumist määravas valemis (2) asendada *F* korrutisega *ma*, siis saame $ma = -kx$, millest $a = -\frac{k}{m}x$.

See valem võimaldab anda harmoonilise võnkumise jaoks veel ühe definitsiooni.

Harmoonilise võnkumise juures on kiirendus alati võrdeline hälbe suurusega ja temaga vastupidiselt suunatud.

Elastsed võnkumised, millega me tutvusime vedrupendli juures, kujutavad endast laialt levinud ja tähtsat võnkumiste liiki. Selliste võnkumiste hulka kuuluvad näiteks masinaosade, ehitustalade ja sõiduki vedrude võnkumised koormuste all. Siia kuuluvad ka häälevõnkumised.

98. Võnkesagedus ja võnkeamplituud. Võnkeperiood. Võtame nüüd tarvitusele mõningad suurused, mis iseloomustavad harmoonilist võnkumist.

Võnkuva punkti suurimat hälvet tasakaaluasendist nimetatakse võnkeamplituudiks (A). Joonisel 194 on $AB = AC = A$.

Ühes sekundis toimunud võngete arvu nimetatakse harmoonilise võnkumise sageduseks.

Aega, mille jooksul toimub üks täisvõnge, nimetatakse perioodiks.

Sageduse mõõduühikuks füüsikas on herts[1] (saksa füüsiku Hertzi auks, kes avastas elektromagnetilised lained). Herts on niisugune sagedus, mille puhul toimub üks võnge sekundis.

1 kiloherts = 1000 hertsi

1 megaherts = 1 000 000 hertsi = 1000 kilohertsi[2].

Määrame võnkeperioodi ja sageduse vahelise seose. Tehku keha ühes sekundis 10 võnget (võnkesagedus on 10 hertsi). Üks võnge toimub $\frac{1}{10}$ sekundi jooksul. See ongi antud juhul võnkeperioodiks.

Üldse, kui tähistada perioodi kestust T-ga ja võnkesagedust f-ga, siis võime kirjutada, et

$$f = \frac{1}{T} \text{ või } T = \frac{1}{f}.$$

Me näeme, et võnkesageduse ja võnkeperioodi vahel on samasugune seos kui ühtlase ringliikumise juures täispöörete arvu ja pöörlemisperioodi vahelgi (vt. § 82).

Harjutus 48.

Kirjeldage horisontaalsele vedrule asetatud kera võnkumist (joon. 194), täites järgmise tabeli:

Jrk. nr.	Kera liikumine	Kuidas muutub kera liikuma-panev jõud	Kuidas muutub kera liikumise kiirus	Kuidas muutub kera liikumise kiirendus
1.	*A*-st kuni *B*-ni			
2.	*B*-st " *A*-ni			
3.	*A*-st " *C*-ni			
4.	*C*-st " *A*-ni			

[1] Tehnikas nimetatakse seda ühikut ka tsükliks.

[2] *Mega* — miljon, *kilo* — tuhat.

2. Kuidas on suunatud kera kiirendus asendites B ja A?

3. Missugustes asendites on vedrul võnkuva kera kiirus kõige suurem? Missugustes kõige väiksem? Lahendage sama küsimus kiirenduse suhtes.

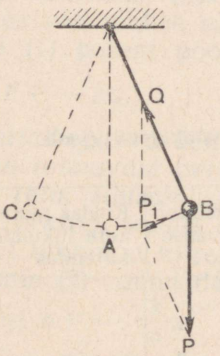
99. Raskusjõu mõjul toimuvad võnkumised. Üheks kõige tuntumaks ja kergesti vaadeldavaks võnkuva liikumise näiteks on lihtsa niitpendli võnkumine. Selliseks pendliks on niidi otsa riputatud metallist kerake (joon. 195).

Viime pendli tasakaaluasendist A välja ja laseme siis lahti, — ta hakkab võnkuma. Vaatleme nende võnkumiste põhjust.

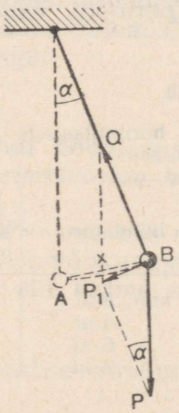
Kui pendel on tasakaaluasendis paigal, siis kerakesele mõjuv raskusjõud on tasakaalustatud niidi pingega. Kui pendel on tasakaaluasendist väljas, siis raskusjõud P ja niidi pinge Q mõjuvad koormusele teineteise suhtes mingi nurga all.

Nende kahe jõu resultandiks on jõud P_1. Jooniselt 195 on kerge näha, et jõud P_1 on alati suunatud tasakaaluasendi poole; mida kaugemal on pendel tasakaaluasendist, seda suurem on P_1 (kontrollige seda, ehitades jõudude parallelogrammid pendli mitme asendi jaoks). Jõud P_1 toob pendli tagasi tasakaaluasendisse ja põhjustab selle võnkumist.

Kui pendel liigub tasakaaluasendist paremale, siis jõud P_1 aeglustab pendli liikumist seda enam, mida suurem on kõrvalekaldumine (hälve). Kui aga pendel hakkab tasakaaluasendi poole tagasi liikuma, siis mängib jõud P_1 kiirendava jõu osa. Pendel ei jää tasakaaluasendisse seisma, vaid hakkab inertsi tõttu kalduma vasakule. Seejuures hakkab temale mõjuma jõud P_1, mis kasvab hälbe suurenemisega ja mis on samuti suunatud tasakaaluasendi poole. Pendli liikumine hakkab aeglustuma; punktis C jääb ta seisma ja pärast seda hakkab uuesti kiirenevalt liikuma paremale. Inertsi tõttu läbib ta jällegi tasakaaluasendi A ja jällegi



Joon. 196. Matemaatilise pendli valemi tuletamise juurde.



Joon. 195. Niitpendli võnkumine.

jõuab tagasi punkti B, tehes sel viisil täisvõnke. Edaspidi see kõik kordub endises järjekorras.

Me nägime, et jõud, mis toob pendli tasakaaluasendisse tagasi, sõltub pendli hälbe suurusest. Teeme selle sõltuvuse matemaatiliselt kindlaks. Oletame, et pendli hälve tasakaaluasendist (joon. 196) on niivõrd väike, et tema poolt liikumisel moodustatud kaart võib praktiliselt lugeda sirglõiguks. Joonestame koormuse asendi jaoks punktis B jõudude parallelogrammi.

Jooniselt 196 on näha, et

$$P_1 = P \sin \alpha, \qquad (1)$$

kus α on pendli tasakaaluasendist kõrvalekaldumise nurk. Tähistame pendli pikkuse l-ga, siis $OB = OA = l$. Kui nurk α on väike, siis kolmnurgast AOB võib kirjutada, et $\frac{x}{l} = \sin \alpha$.

Pannes selle sin α väärtuse võrdusesse (1) saame:

$$P_1 = \frac{P}{l} x.$$

Kuna P ja l ei muutu, jõud P_1 aga on alati suuna ning märgi poolest vastupidine kõrvalekaldumisega tasakaaluasendist, siis võime kirjutada:

$$P_1 = -kx, \text{ kus } k = \frac{P}{l}.$$

Siit on näha, et *pendli võnkumised toimuvad jõu mõjul, mis on võrdeline pendli hälbega ja on suunatud tasakaaluasendi poole.*

Kuid selles seisab harmooniliste võnkumiste tekkimise tingimus. Seega *väikeste amplituudide juures võib niitpendli võnkumist lugeda harmooniliseks ehk lihtvõnkumiseks.*

Harjutus 49.

1. Kirjeldage pendli liikumise iseloomu (joon. 195), täites järgmist tabelit:

Jrk. nr.	Pendli liikumine	Kuidas muutub pendlit liikuma-panev jõud	Kuidas muutub pendli liikumise kiirus	Kuidas muutub pendli liikumise kiirendus
1.	B-st kuni A-ni			
2.	A-st " C-ni			
3.	C-st " A-ni			
4.	A-st " B-ni			

Kuidas on suunatud kiirendus punktides B ja C?

Missugustes asendites on pendli liikumise kiirus suurim? Missugustes väikseim?

Missugustes pendli asendites on pendli liikumise kiirendus suurim?

2. Kui suure jõu mõjul hakkab 100 G-ne pendel 45°-se hälbe puhul tasakaaluasendisse tagasi liikuma?

3. Pneumaatilise haamri meisli võnkumise periood on 0,02 sekundit. Kui suur on võnkesagedus? Meisli võnkumisi lugeda harmooniliseks.

4. Rongi liikumisel teeb veoratas 1200 pööret 5 min. jooksul. Leida veduri silindris liikuva kolvi võnkumise sagedus, lugedes võnkumist harmooniliseks.

100. Matemaatilise pendli võnkumise seadused. Kõige lihtsam on käsitleda matemaatilise pendli võnkumist. Matemaatiliseks pendliks nimetatakse venimatu ja kaaluta niidi otsa riputatud materiaalset punkti. Loomulikult võib tegelikult sellele ideaalsele olukorrale läheneda teatava täpsusega. Kui niitpendli kerakese mõõtmed on palju kordi väiksemad niidi pikkusest, kuid kuulikese mass on suur võrreldes niidi massiga, siis võib ilma suurema veata lugeda kogu pendli massi kontsentreerituks kerakese keskpunkti. Sellist pendlit nimetataksegi matemaatiliseks.

Riputame püstkandurile ühe sellise pendli pikkusega umbes 1 m, viime ta tasakaaluasendist välja väikse nurga võrra ja mõõdame ära, missuguse aja jooksul ta teeb näiteks 50 võnget.

Vähendame hälvet (esialgset amplituudi) ja mõõdame uuesti ära aja, mille jooksul ta teeb 50 võnget.

Selgub, et vähendatud amplituudi juures kulus pendlil 50 võnke jaoks niisama palju aega kui suuremagi amplituudi juures.

Muutes väiksemas vahemikus pendli võnkumise amplituudi, võime kindlaks teha, et *väikeste amplituudide juures ei sõltu pendli võnkeperiood võnkeamplituudist.*

See pendli omadus on avastatud Galilei poolt ja seda nimetatakse isokroonsuseks[1].

See võimaldas, nagu me näeme edaspidi (§ 105), rakendada pendlit kellade (ajanäitajate) juures.

Riputame püstkandurile pikkade niitide otsa kaks ühesuurust[2] ja ühepikkust, kuid erinevast ainest kerakest. Olgu üks näiteks terasest ja teine pliist.

Kallutame mõlemad pendlid tasakaaluasendist ühesuuruse nurga võrra välja. Nad hakkavad võnkuma sünkroonselt, s. o. nende võnkeperioodid on ühesuurused, kuigi nende massid on erinevad. Muutes edaspidi kuidas tahes pendlite masse, võime veenduda selles, et *pendlite juures võnkeperiood ei sõltu pendli massist.*

Teeme veel ühe katse, riputades kandurile mitu ühesugust kerakest erinevate pikkustega niitide otsa. Pannes need pendlid võnkuma, näeme, et nende võnkeperioodid on erinevad; mida väiksem on pendli pikkus, seda väiksem on tema võnkeperiood.

Hollandi õpetlane Huygens[3], uurides pendli võnkumise seadusi, leidis, et **matemaatilise pendli võnkeperiood on võrdeline ruutjuurega pendli pikkusest ja pöördvõrdeline ruutjuurega raskuskiirendusest:**

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},\ \text{kus}$$

T on võnkeperiood, l — pendli pikkus ja g — raskuskiirendus.

---

[1] Isokroonsus — kreekak. sõnast *isos* — võrdne ja *kronos* — aeg.
[2] Ühesuuruste kerade juures on õhutakistus ühesuurune.
[3] loe: hüügens.

Huygens, Christian (1629—1695) — suur hollandi füüsik-matemaatik. Ta lahendas esimesena rea tähtsaid mehhaanika ülesandeid, avastas pendli võnkumise seaduse, andis kesktõmbejõu valemi. Huygensile kuulub pendelkella leiutamine (1657). Ta arendas valgusnähtuste teooriat, mis pole oma tähtsust kaotanud ka tänapäeval.

Pendel on kõige lihtsam, sobivam ja täpsem riist raskuskiirenduse määramiseks.

Mingis maakohas ümbritsevatest kihtidest tiheduselt erineva maapõuevara olemasolu põhjustab raskuskiirenduse suuruse muutuse selles kohas. Raskuskiirendus on ju põhjustatud raskusjõust ja viimane on seda suurem, mida suurem on külgetõmbava maa mass. Sellel põhineb pendli laialdane kasutamine riistades, millega tehakse geoloogilisi uurimistöid. Pendli võnkeperioodi T mõõtmise teel tehakse kindlaks antud kohas g suurus. Kui see osutub näiteks normaalsest suuremaks, siis näitab see seda, et antud kohas on tegemist suurema tihedusega kihtidega ja, ümberpöördult, kohtades, kus on väiksema tihedusega kihid, on g normaalsest väiksem.

Harjutus 50.

1. Leida matemaatilise pendli pikkus, mille võnkeperiood Moskva laiusel on 1 sekund $\left(g = 981{,}56 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} \right)$.

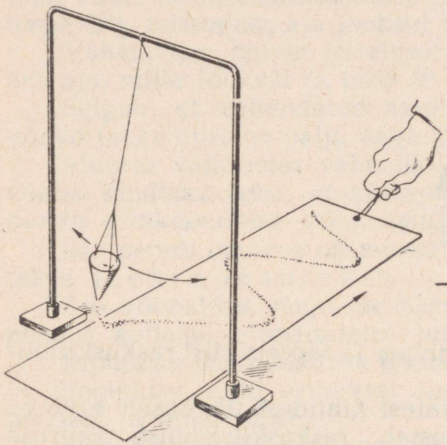
2. Kui suur peaks olema raskuskiirendus, et 1 m pikkusega pendli võnkeperiood oleks 2 sekundit?

3. Määrata sekundipendli pikkus Kuul $\left(g_k = 160 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} \right)$ ja Marsil $\left(g_m = 300 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} \right)$.

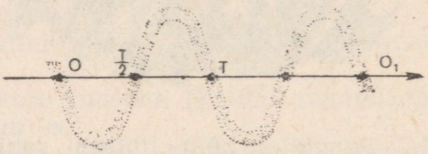
101. Võnkuva liikumise graafiline üleskirjutus. Võnkumiste üleskirjutus leiab laialdast rakendamist kiiresti toimuvate võnkumisprotsesside tundmaõppimisel, kuna sel teel saab uurida võnkuva liikumise iga arenemisstaadiumi.

Üheks lihtsamaks ja näitlikumaks üleskirjutamise vormiks on pendli võnkumiste üleskirjutus liiva abil paberile või vineerile riistaga, mida kujutatakse joonisel 197 *a*.

Liivaga täidetud klaaslehter võngub ainult ühes tasapinnas. Lehtri alla on paigutatud vineer, millele on tõmmatud keskele «nulljoon» (vt. joon. 197 *b*).



Joon. 197 *a*. Pendli võnkumiste üleskirjutamise seadis.



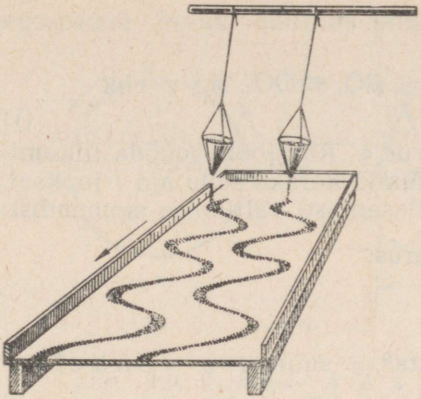
Joon. 197 *b*. Pendli võnkumise graafik.

Kui vineer on liikumatu, siis lehter tasakaaluasendist paremale poole kõrvale kaldudes puistab liiva ühele poole nulljoont, vasakule kaldumise puhul aga — teisele poole nulljoont. Vineeri ühtlase liikumise korral lõikab lehtrist puistatud liiva tee nulljoont poole perioodiga $\left(\frac{T}{2}\right)$ võrdsete ajavahemike järel.

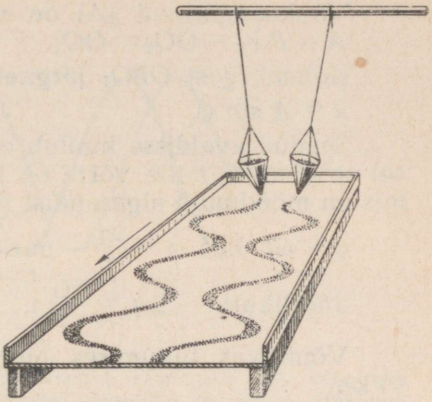
Kui kujutleda, et igal ajamomendil puistab lehter välja teatud liivahulga, siis fikseerivad need liivahulgad vineeril igale ajamomendile vastava pendli asendi. Iga vabalt valitud liivahulga («portsjoni») lühim kaugus «nulljoonest» on võrdne antud momendil pendli kõrvalekaldumise (hälbe) suurusega x. Kõrvalekaldumise maksimaalne suurus määrab ära võnkeamplituudi (A). Liivaportsjonite pidev üksteisele järgnemine moodustab pideva liiva tee, mis graafiliselt kujutab pendli hälbe muutumist sõltuvalt ajast (joon. 197 *b*).

Antud juhul on pendli liikumise liivagraafik sinusoidikujuline.

Kuna harmoonilist võnkumist kujutatakse sinusoidi abil, siis seetõttu nimetataksegi seda s i n u s o i d a a l s e k s v õ n k u m i s e k s.



Joon. 198 *a*. Pendlid võnguvad ühesugustes faasides.



Joon. 198 *b*. Pendlid võnguvad vastupidistes faasides.

102. Võnkefaas. Faasinihe. Kui kaks ühesugust pendlit, liikudes ühele ja samale poole, läbivad mingil ajamomendil üheaegselt tasakaaluasendi, siis öeldakse, et pendlid on sel momendil ühesugustes faasides[1]. Faaside ühtimine toimub pidevalt ka edaspidi tingimusel, et pendlite võnkesagedused ühtiksid. Sellise juhuga on tegemist joonisel 198 *a*. Mõlema pendli liikumist kujutavad sinusoidid ühtivad. On võimalik, et pendlid, saavutades tasakaalu või mingi muu asendi, millesse nad üheaegselt jõuavad, hakkavad liikuma vastupidistes suundades. Niisugusel juhul on pendlid vastupidistes faasides. Võnkumisi kujutavad sinusoidid on sel juhul teineteise suhtes nihkunud ajaliselt poole perioodi $\left(\frac{T}{2}\right.$ võrra (joon. 198 *b*).

Faas on üks suurustest, mis iseloomustavad võnkuvat liikumist. Määrame kindlaks selle suuruse mõõdu. Selleks seome võnkuva liikumise punkti ühtlase ringjoonelise liikumisega. Joonisel 199 on tähtedega O, O_1, O_2 jne. tähistatud ringjoont mööda ühtlaselt liikuva väikese kerakese mitmesugused asendid ja punktidega P_0, P_1, P_2 jne. — kerakese varjud-projektsioonid tasapinnale MN. Kerakese vari-projektsioon võngub keskmise asendi P_0 ümber, kaldudes sellest kord ühele, kord teisele poole.

Tõestame, et see liikumine on harmooniline võnkumine.

Vari-projektsiooni mingi asendi P_1 jaoks on hälbe suurus

$$x = P_0P_1 = BO_1.$$

---

[1] Faas (kreeka sõnast *fasis*) — teatud kindel moment mingi nähtuse arenemise perioodis.

Võnkeamplituud (A) on võrdne suurima hälbe suurusega $A = P_0P_2 = OO_2 = OO_1$.

Kolmnurgast OBO_1 järgneb, et $BO_1 = OO_1 \sin \varphi$ ehk

$$x = A \sin \varphi. \qquad (1)$$

Saadud avaldisse kuulub suurus φ. Ringjoont mööda liikumisel on φ nurk, mille võrra on liikunud kerake selle aja t jooksul, mis on möödunud algasendist (nullasendist) väljumise momendist:

$\varphi = \omega t$, kus $\omega = \frac{2\pi}{T}$ — nurkkiirus.

Järelikult $\varphi = \frac{2\pi}{T} t$.

Võnkuvas liikumises nimetatakse suurust φ võnkefaasiks.

Saadud valemist on näha, et *faas näitab, missugune osa perioodist on möödunud võnkumise algmomendist.*

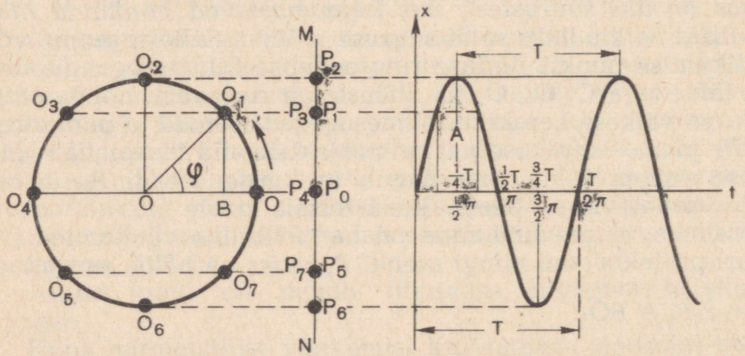
Teades võnkefaasi võime võrrandi (1) järgi määrata võnkuva punkti hälbe suuruse, s. o. määrata võnkuva punkti asendi mistahes ajamomendil.

$$x = A \sin \frac{2\pi}{T} \cdot t.$$

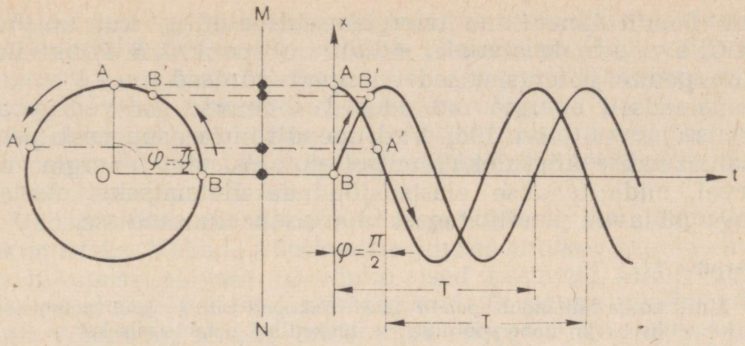
Selle võrrandi graafiliseks kujutiseks on sinusoid. Võrrandist järgneb, et ringjoont mööda ühtlaselt liikuva kuulikese vari-projektsiooni liikumine on harmooniline võnkumine.

Võnkuva vari-projektsiooni asendid, mis on joonisel 199 märgitud tähtedega P_0, P_1, P_2 jne., erinevad üksteisest faasi poolest, mille suurus on $^1/_8$ T või $\frac{\pi}{4}$.

Kandes horisontaalsele teljele võnkumise algusest loetud aja (perioodi osades) või võnkuva punkti faasid ja vertikaalsele teljele hälbed x, saame sinusoidaalse võnkumise graafiku (joonise 199 parempoolne osa).



Joon. 199. Ühtlaselt ringleva kerakese O projektsioon P tasapinnale MN võngub harmooniliselt, graafikuna saame sinusoidi.



Joon. 200. Kuulikeste *A* ja *B* projektsioonid tasapinnale *MN* võnguvad harmooniliselt; neid võnkumisi kujutavad sinusoidid on faasilt nihkunud nurga $\varphi = \frac{\pi}{2}$ võrra.

Joonisel 200 liiguvad kaks kuulikest *A* ja *B* ühtlaselt ringjoont mööda võrdsete kiirustega. Nende projektsioonid tasapinnale *MN* võnguvad. Neid võnkumisi kujutavad graafiliselt sinusoidid, mis on nihkunud teineteise suhtes faasi võrra, mille suurus on veerand perioodi $\left(\frac{T}{4}\right)$ ehk $\frac{\pi}{2}$ $(90°)$.

103. Energia muundumine pendli võnkumisel. Pendlit tasakaaluasendist kõrvale kallutades me teeme tööd pendli tõstmiseks (joon. 195). Pendli lähenemisel äärmisele asendile (punktile *B*) suureneb pendli potentsiaalse energia varu. Kui lugeda pendli potentsiaalset energiat lähtepunktis nulliks, siis äärmises punktis *B* (igasuguste kadude puududes) on potentsiaalne energia võrdne tehtud tööga.

Asendist *B* läheb liikuv pendel järjest madalamale ja seega järelikult väheneb tema potentsiaalne energia ning muutub kõige madalamas punktis, s. o. tasakaaluasendis, nulliks. Üheaegselt pendli potentsiaalse energia vähenemisega suureneb tema liikumise kiirus ja järelikult ka tema kineetiline energia. Maksimaalne kineetiline energia on pendlil punktis, kus tal on suurim kiirus, s. o. punktis *A*. Kuna me vaatleme niisugust juhtu, kus puuduvad igasugused energia kaod, siis energia jäävuse seaduse kohaselt on pendli kineetiline energia tasakaaluasendi läbimise momendil võrdne pendli potentsiaalse energiaga äärmises punktis. Iga vahepealse asendi jaoks teepikkusel *BA* on potentsiaalse ja kineetilise energia summa jääv suurus ning võrdne pendli potentsiaalse energiaga asendis *B*.

Liikumisel asendist *A* asendi *C* suunas läheb pendel ikka kõrgematele ja kõrgematele nivoodele, seejuures tema potentsiaalne energia kasvab. Ühes sellega kahaneb pendli kiirus ja kineetiline

energia. Pendli kineetiline energia saab nulliks, kui ta jõuab punkti *C*, s. o. samale nivoole, millel ta oli punktis *B*. Punktides *B* ja *C* on pendli potentsiaalsed energiad võrdsed.

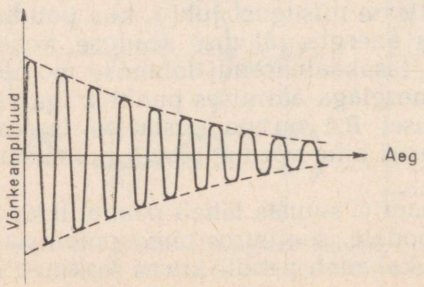
Samalaadsed energia muundused toimuvad ka vedrupendli võnkumise juures (joon. 194). Vedrupendli juures suureneb pendli tasakaaluasendist kõrvalekaldumisel potentsiaalne energia selle töö arvel, mida tehakse elastsusjõudude ületamiseks; elastsusjõud aga püüavad pendlit tagasi viia tasakaaluasendisse.

Harjutus 51.

1. Mitu korda muundub pendli ühe võnkeperioodi jooksul potentsiaalne energia kineetiliseks ja ümberpöördult, — kineetiline potentsiaalseks?
2. Missugustel momentidel on võnkuva pendli kineetiline energia võrdne tema potentsiaalse energiaga?
3. Määrata niidi otsa riputatud metallkera tõusu suurus, kui ta läbib tasakaaluasendi kiirusega $140 \frac{cm}{s}$.
4. 1 m pikkune pendel võngub nii, et suurima hälbe nurk on 30°. Tasakaaluasendi läbimise momendil jääb niit keskelt naela taha kinni. Määrata lühendatud pendli suurim hälbenurk.

104. Summutatud võnkumised. Et pendel hakkaks võnkuma, on tarvis anda talle teatud energiavaru, näiteks tõugata või tõmmata kõrvale ja lahti lasta. Seejuures toimub võnkumine ainult esialgse energiavaru olemasolu tõttu. Selliseid võnkumisi nimetatakse *vabadeks võnkumisteks*. Pendli vabad võnkumised ei saa kesta kuitahes kaua. Katse näitab, et pendli võnkeamplituud aja jooksul järk-järgult väheneb, s. o. pärast iga võnget väheneb pendli tõusu kõrgus ja mõne aja pärast võnkumine lakkab. See nähtus annab tunnistust sellest, et pendli energia kulub järk-järgult õhutakistuse ületamiseks, hõõrde ületamiseks niidis jne.

Seega võnkuva keha energiavaru vähenemine, mis on ühenduses energia äraandmisega ümbritsevasse keskkonda, toob endaga kaasa võnkeamplituudi vähenemise. Sellist nähtust nimetatakse *võnkumise sumbumiseks*. Väheneva amplituudiga võnkumist nimetatakse sumbuvaks või *summutatud võnkumiseks*. Niisuguste võnkumiste graafik on kujutatud joonisel 201.

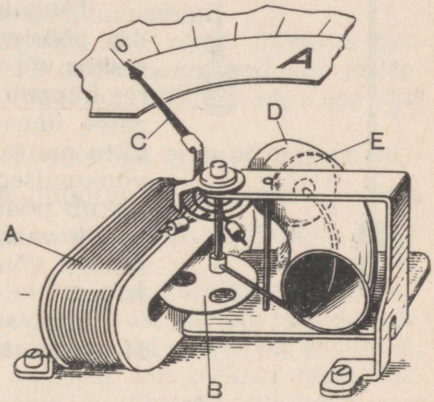


Joon. 201. Sumbuv võnkumine.

Mida suurem on keskkonna takistus, seda kiiremini kahaneb amplituud ja seda kiiremini lakkab võnkumine. Õhus võib pendel võnkuda kaunis kaua. Sama pendel sama energiavaruga ei suudaks vees teha rohkem kui üks-kaks võnget.

Võnkuv keha ei kuluta oma energiat mitte ainult ümbritseva keskkonna takistuse ületamiseks, vaid ka selle keskkonna, näiteks õhu, võnkumapanemiseks.

Vabad võnkumised osutuvad praktiliselt alati summutatud võnkumisteks. Vabade võnkumiste juures antakse kehale energiat vaid liikumise alguses ja võnkumised kestavad ainult niikaua, kuni see energiavaru on ammendatud. Et panna pendel sumbumatult võnkuma, selleks tuleb tema energiat niisama palju suurendada, kui teda kaob takistuste ületamiseks.



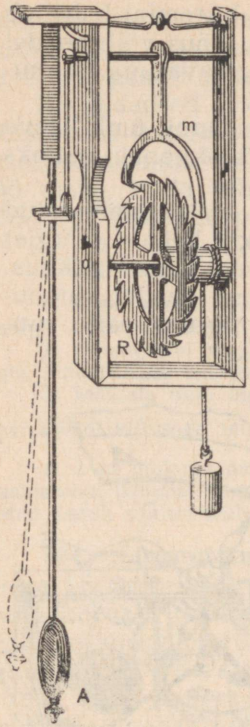
Joon. 202. Elektromagnetilist süsteemi ampermeeter (õhksummutiga).

Kiire sumbumise nähtusel põhineb erilise seadise — «dämpferi»[1] (summuti) ehitus. Summutit kasutatakse paljudes mõõteriistades, et osuti ei võnguks, vaid jääks seisma skaala vastavale jaotuskriipsule. Joonisel 202 on kujutatud elektromagnetilise ampermeetri skeem. Väike terasest ketas on kinnitatud teljele pooli *A* läheduses. Poolist voolu läbi lastes tõmbub ketas pooli, pöörab seejuures osutit *C* ja samaaegselt liigutab silindris *D* olevat kolbi *E*.

Seejuures kujuneb ühel ja teisel pool kolbi *E* olevate õhurõhkude vahe, mis takistabki osuti võnkumist.

105. Pendli kasutamine kellades. Summutamata võnkumiste näiteks on pendli võnkumine kella juures. Seal täiendatakse perioodi vältel pendli energiat ülestõstetud pommi või üleskeeratud vedru energia arvel kahel korral.

[1] *Dämpfer* (saksak. sõna) — seadis mehhaaniliste võnkumiste summutamiseks.



Joon. 203. Seinakella mehhanismi mudel.

Kellad kujutavad endast hammasrataste süsteemi, mis on ühenduses osutitega ja mida pannakse liikuma ülestõstetud pommiga või üleskeeratud vedruga. Kella õige käigu saavutamiseks tuleb pommi või üleskeeratud vedru energia ära kasutada väikeste perioodiliste annuste kaupa. Kuidas seda tehakse, on näidatud joonisel 203.

Pendel on kindlalt ühendatud kaarega *m*, mille otstes on hambad. Need hambad hoiduvad hästi lähedale põrkratta[1] *R* hammastele.

Tõugates pendlit saame põrkratta hüppelise pöörlemise, mille kutsub esile pommi raskus või vedru jõud. Iga pendli võnke juures hüppab põrkratas ühe hamba võrra, tõugates ühes sellega ka pendlit ennast, mille tõttu me saamegi kella ühtlase käigu. Pendli võnkumised on niikaua summutamata, kuni jätkub pommide või vedru jõust. Liigutades pendli varba mööda koormust *A* reguleerime sellega võnkesagedust ja järelikult ka kella käiku.

Esimesena rakendas pendlit kella juures Huygens 1657. aastal.

Harjutus 52.

1. Kuidas muutub pendli võnkeperiood temperatuuri tõusmisel? Kuidas sel juhul muutub kella käik?
2. Selgitada energia ülekannet ja muundumist kellamehhanismi juures.

105 a. Harmooniliste võnkumiste liitmine. Nagu me nägime, toimub harmooniline võnkumine jõu toimel, mis on hälbega võrdeline ja suunatud tasakaaluasendi poole. Selliseks jõuks on näiteks elastsusjõud.

Vaatleme nüüd, kuidas hakkab võnkuma keha, kui temale ei mõju mitte üks, vaid mitu sama liiki jõudu. Iga kehale mõjuv jõud tekitab võnkuva liikumise ja iga liikumine toimub vastavalt liikumiste sõltumatuse printsiibile, sõltumatult teistest liikumistest.

[1] Põrkratas — hammasratas, mis saab vabalt liikuda ühes suunas, kuid mille liikumist teises suunas takistavad pendliga ühenduses oleva kaare hambad.

Ülesanne kujuneb harmooniliste võnkuvate liikumiste resultantliikumise leidmiseks, s. o. harmooniliste liikumiste liitmiseks.

Lihtsaimaks juhuks on see, kus tuleb liita kaks harmoonilist võnkuvat liikumist, mis toimuvad ühte ja sama sirget mööda ja ühesuguste perioodidega (järelikult ka ühesuuruste sagedustega) ja ühesuguste faasidega. Võnkumiste amplituudid võivad olla erinevad. Antud ja mõnedel teistel võnkumise liitmise juhtudel laheneb ülesanne lihtsalt graafilise meetodi abil.

Olgu OA_1B_1C ühe harmoonilise võnkumise sinusoid ja OA_2B_2C — teise oma (joon. 203 *a*).

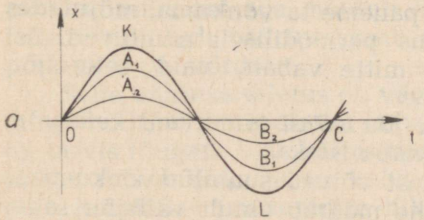
Liidame algebraliselt mingile vabalt võetud ajamomendile vastavad ordinaadid, mis väljendavad võnkuva keha hälbeid nendes kahes liikumises. Ühendades ordinaatide summade otspunktid, saame kõvera *OKLC*, mis osutub jällegi sinusoidiks ja millel on sama periood, mis liidetavatel liikumistelgi.

Järelikult, *kahe võrdse sagedusega ühel sirgel toimuva harmoonilise võnkuva liikumise liitmise tulemusena saadakse jällegi harmooniline võnkuv liikumine, millel on niisama suur sagedus kui liidetavatel liikumistelgi.*

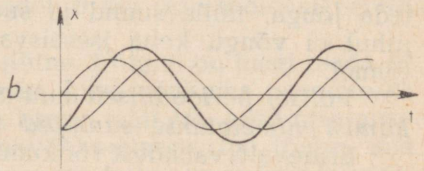
Joonisel 203 *b* on kujutatud täisjoonega graafik, mis on saadud kahe võrdsete perioodidega ja amplituudidega, kuid $\frac{\pi}{2}$ võrra (aja $^1/_4\ T$ järgi) erinevate faasidega harmoonilise võnkumise graafikute liitmise tulemusena.

Vaatleme veel juhust, kus liidetakse kaks ühesuguste perioodidega, kuid π võrra erinevate faasidega (vastupidiste faaside juhtum, ajaline erinevus $^1/_2\ T$) kaks harmoonilist võnkuvat liikumist. Niisugused liikumised nagu osaliselt kustutaksid teineteist. Kui liidetavate liikumiste amplituudid on võrdsed, siis keha, mis võtab osa nendest kahest liikumisest, jääb paigale. Joonisel 203 *c* on näidatud nimelt niisugust juhtumit.

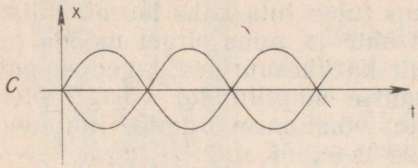
Kasutades graafilist meetodit võib näidata, et *mistahes faaside vahe puhul on kahe ühel ja samal sirgel toimuva ja võrdsete perioodidega harmoonilise võnkuva liikumise resultantliikumine ikkagi sama perioodiga harmooniline võnkuv liikumine.*



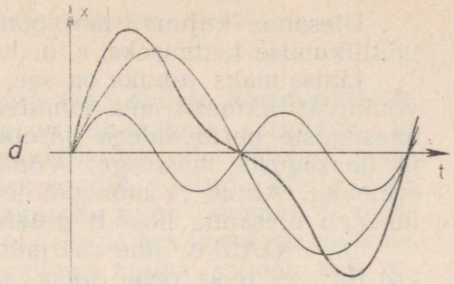
Joon. 203 *a*. Kahe ühesuguse perioodiga ja faasiga võnkuva liikumise liitmine.



Joon. 203 *b*. Kahe faaside poolest erineva harmoonilise võnkumise liitmine.



Joon. 203 *c*. Kahe vastupidise faasiga harmoonilise võnkumise liitmine.



Joon. 203 *d*. Kahe perioodide poolest erineva harmoonilise võnkumise liitmine.

Kasutades graafilist meetodit võib liita kaks harmoonilist võnkuvat liikumist, millede sagedused ei ole võrdsed, kuid on teineteise kordsed.

Joonisel 203 *d* on näidatud kahe ühel ajal algava ja erinevate perioodidega harmooniliste liikumiste (sageduste suhe 1 : 2) liitmise graafikut.

Liitmise tulemusena ei saada sinusoidi, vaid keerukam, perioodiliselt korduv kõverjoon. See on kujutatud joonisel 203 *d* jämedama joonega.

Vaadeldud näidetest on näha, et perioodilise liitliikumise graafik sõltub liidetavate harmooniliste võnkuvate liikumiste sagedustest, amplituudidest ja faasidest.

106. Sunnitud võnkumised. Käsitletud vedru- ja niitpendli võnkumised algasid välistõukest. Pärast tõuget võnkus keha vabalt, s. o. temale ei mõjunud enam välisjõud. Need võnkumised, nagu me nägime, olid summutatud võnkumised.

Vabu võnkumisi nimetatakse o m a v õ n k u m i s t e k s ja nende sagedust omavõnkumise sageduseks.

Looduses ja tehnikas on laialt levinud teine võnkumise liik, kus võnkuvale kehale mõjuvad perioodiliselt muutuvad välisjõud. Vaatleme üht näidet seda liiki võnkumistest.

Riputame üles mingi keha ja paneme ta võnkuma, mõjutades teda jõuga, mille suund ja suurus perioodiliselt muutuvad. Sel juhul ei võngu keha iseseisvalt, mitte vabalt, vaid selle jõu toimel.

Välise, perioodiliselt muutuva jõu mõjul toimuvaid keha võnkumisi nimetatakse sunnitud võnkumisteks.

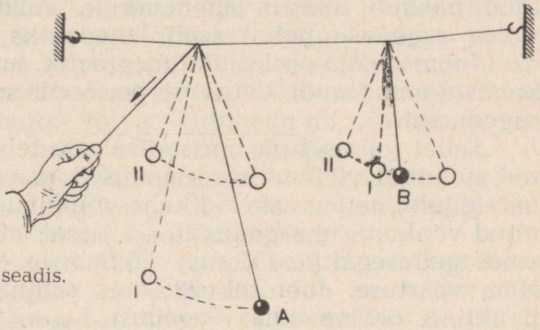
Erinevalt vabadest võnkumistest võivad sunnitud võnkumised toimuda mistahes sagedusega, mille määrab ainult välisjõu sagedus.

Keha sunnitud võnkumise sagedus on võrdne kehale mõjuva jõu muutumise sagedusega.

Sunnitud võnkumiste juures igasuguste takistuste ületamiseks kulutatavat energiat täiendatakse temale perioodiliselt mõjuva jõu töö arvel. Seega, erinevalt vabadest võnkumistest, *sunnitud võnkumised on summutamata võnkumisteks.*

107. Resonants. Pendli võnkumise käsitlusest selgus, et on võimalikud kahte liiki võnkumised: 1) omavõnkumised, mille võnkesagedus on võnkuva keha enda omadustest tingitud, ja 2) sunnitud võnkumised, mille sagedus on võrdne välise, perioodiliselt kehale mõjuva jõu sagedusega.

Juhtum, kus võnkuva keha omavõnke sagedus ühtib sunnitud võnkumiste sagedusega, on erakordse tähtsusega. Vaatleme seda katseliselt.



Joon. 204. Pendlite resonantsi seadis.

Joonisel 204 on kujutatud seadeldis, mille abil saab vaadelda sunnitud võnkumisi. Horisontaalsele nöörile on riputatud pendlid *A* ja *B*. Pendli *A* pikkust saab muuta, tõmmates käega pendli niidi vabast otsast.

Kui pendel *A* on asendis, mis on joonisel märgitud numbriga I, paneme ta võnkuma. Me paneme tähele, et ka pendel *B* hakkab võnkuma. Muudame nüüd pendli *A* pikkust ja jälgime seejuures pendlit *B*. Märkides ära igale pendli *A* pikkusele vastava pendli *B* amplituudi, me võime kindlaks teha, et pendli *A* pikkuse muutumisega muutub ka pendli *B* võnkeamplituud. Suurima amplituudi väärtuse saab pendel *B* siis, kui mõlema pendli pikkused on võrdsed.

Selle nähtuse seletus on väga lihtne. Kõigile on hästi teada, et mingi nööri otsa riputatud keha (näit. kiik) võnkuma panemiseks on tarvis tõugata teda väljastpoolt, olgugi väikese, kuid niisuguse jõuga, mis mõjuks taktis keha omavõnkumisega. Iga tõuge, mis pole kooskõlas (vastupidise liikumisega) keha omavõnkumisega, kutsub välja amplituudi vähenemise. Täpselt samuti on lugu meie katses pendliga: muutes pendli *A* pikkust, meie sellega just muudamegi pendli *B* peale mõjuva jõu sagedust. Pendli *B* sunnitud

võnkumiste põhjuseks on horisontaalse nööri võnkumine pendli *A* sagedusega. Mida ligemal on sundiva jõu sagedus pendli *B* omavõnke sagedusele, seda suurem arv jõu impulsse soodustab pendli *B* amplituudi suurenemist. Pendli *B* sunnitud võnkumine on suurima amplituudiga siis, kui ta omavõnke sagedus saab võrdseks sundiva jõu sagedusega, s. o. pendli *A* võnkesagedusega (joonisel asend II).

Sel juhul räägitakse *resonantsist.*

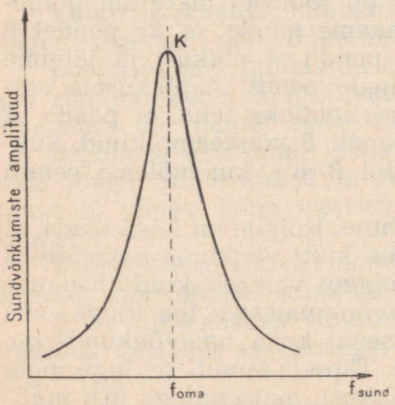
Resonantsiks nimetatakse nähtust, mis seisab keha sunnitud võnkumiste amplituudi järsus kasvamises, kui sundiva jõu muutumiste sagedus läheneb keha omavõnkumiste sagedusele.

Kui sundivate võnkumiste sagedus, s. o. pendli *A* võnkumiste sagedus kasvab edasi, siis pendli *B* sunnitud võnkumiste amplituud hakkab uuesti vähenema ja sundivate võnkumiste väga suure sageduse puhul saab lähedaseks nullile.

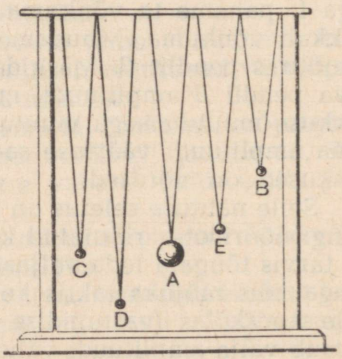
Joonisel 205 on kujutatud graafik, mis selgitab sunnitud võnkumiste amplituudi sõltuvust perioodilise sundiva jõu muutumise sagedusest.

Sellel joonisel on horisontaalsele teljele (abstsissteljele) kantud sunnitud võnkumiste sagedused ja vertikaalsele teljele (ordinaatteljele) neile vastavad keha võnkumiste amplituudid. Kui sunnitud võnkumiste sagedus ($f_{sunnit.}$) saab võrdseks keha võnkumiste omasagedusega (f_{oma}), siis võnkumiste amplituud saavutab suurima väärtuse. Joonisel 205 on selline amplituud kujutatud punkti *K* ordinaadina. Sagedust $f_{sunnit.} = f_{oma}$ nimetatakse resonantssageduseks. Perioodiliselt muutuva sundiva jõu sageduse kõrvalekaldumisel resonantssagedusest vasakule või paremale väheneb võnkumiste amplituud.

Kui summutamine on vähene, siis resonantskõver on terav, suurema summutamise puhul ta muutub lamedamaks.



Joon. 205. Resonantskõver.



Joon. 206. Pendlite resonantsi katseriist.

Resonantsinähtust võib näitlikult demonstreerida järgmise lihtsa katsega. Riputame kandurile massiivse pendli *A* (joon. 206) ja kõrvuti temaga mitu erineva pikkusega pendlit.

Viime pendli *A* tasakaaluasendist välja. Selle pendli võnkumised antakse edasi kandurile ja viimane hakkab mõjuma pendli *A* sagedusega teistele pendlitele. Me näeme, et tugevasti kaasa võnkuma hakkab ainult pendel *C*, mille pikkus on võrdne pendli *A* pikkusega. See pendel on resonantsis pendliga *A*. Kuid pendlid *D* ja *E* hakkavad võnkuma väga väikese amplituudiga ja kõige väiksem pendel *B*, mille sagedus on suuresti erinev pendli *A* sagedusest, ei hakka peaaegu üldse võnkuma.

108. Resonantsi tähtsus tehnikas. Resonantsnähtust tuleb arvestada tehnikas. Vaatleme mõnda näidet.

Käigu ebaühtluse tõttu toimuvad iga masina juures väikesed võnkumised, mille sagedus on võrdne masina võlli pöörete arvuga sekundis. Kui see sagedus ühtib masina osade või alustoe elastsusvõnkumiste omasagedusega, siis tekib resonants. Sunnitud võnkumiste amplituudid võivad kujuneda nii suureks, et tekib katastroof — puruneb masin või tema alustugi.

On juhtunud, et resonantsi tagajärjel on lagunenud osadeks lennuk õhus ja varisenud kokku raudteesild rongi rataste perioodiliste tõugete tõttu rööbaste ühenduskohtadele.

Hämmastav lugu juhtus 1907. aastal Peterburis, kui Tauria palees Riigiduuma istungite saalis varises alla lae krohv. Selle õnnetuse süüdlaseks osutus lae alla ventilatsiooniks paigutatud väike mootor.

Võib tuua palju näiteid masina väntvõllide, laevakruvide ja lennukite propellerite purunemisest resonantsi tagajärjel. Kõikidel nendel juhtudel on tarvis võidelda resonantsinähtuste vastu. Ometi ei mängi resonants tehnikas mitte ainult kahjulikku osa. Resonantsinähtust, nagu me näeme eespool, kasutatakse paljude riistade ehitamisel.

109. Laineline liikumine. Ristlainete tekkimine. Pendlite resonantsi katses (§ 107) toimub võnkumiste edasiandmine ühelt pendlilt teisele nendevahelise seose tõttu. Võnkumised antakse ühelt pendlilt põikpuule, millele on riputatud pendlid, ja põikpuult teistele pendlitele.

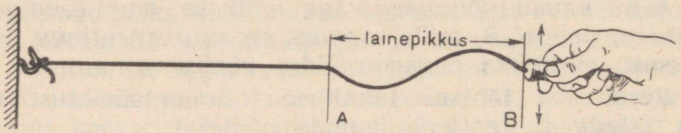
Kuna igas kehas on keha moodustavad osakesed omavahel seotud, siis antakse mingi ühe osakese võnkumine järk-järgult teistele osakestele üle. *Võnkumiste levimine keskkonnas kujutab endast lainelist liikumist.*

Vaatleme võnkumiste levimise lihtsaimat juhtu. Asetame lauale pika nööri või kummitoru. Kui nööri üks ots tõsta kiiresti üles ja viia tagasi alla, siis tekkinud looge «jookseb» teatud kiirusega mööda nööri.

Kui liigutada nööri otsa katkestamatult, sundides seda harmooniliselt võnkuma, siis mööda nööri «jookseb» laine (joon. 207).

Vaatleme kõigepealt võnkuva liikumise ühelt nööri osalt teisele edasiandmise põhjusi, teiste sõnadega, vaatleme lainelise liikumise dünaamikat.

Nööri otsa ülestõstmine tekitab selles kohas nööri deformatsiooni. Nööri tõmbega tekitatud elastsusjõud tõmbavad kohalt liikunud nööri otsaga kaasa järgneva lähima osa. Selle teise osa liikumine tekitab järgmise nööri osa deformatsiooni jne.



Joon. 207. Laine tekkimine.

Kuid nööri osad, milleks me selle mõttes jaotasime, on inertsed ja sellepärast ei hakka need elastsusjõudude sunnil võnkuvalt liikuma mitte momentaanselt, vaid teatud hilinemisega.

Kui nööri ots on jõudnud kõige kõrgemale ja hakkab liikuma alla, siis tema lähisosa jätkab liikumist üles ja ainult teatud aja pärast jõuab kõige kõrgemasse punkti, millele järgnevalt hakkab liikuma alla. Mida kaugemal on nööri osa nööri algusest, seda hiljem hakkab ta võnkuvalt liikuma.

On tähtis endale selgeks teha, et lainelises liikumises *nööri iga osa liigub samal viisil harmooniliselt võnkuvalt, nagu käe sunnil nööri otski.* Kuid osakese võnkumine hilineb seda rohkem (jääb maha faasi suhtes), mida kaugemal on osake nööri otsast.

Seda küllaltki keerukat nähtust aitab selgitada joon. 207 *a*. Sellel joonisel on sirget mööda kujutatud omavahel elastsusjõududega seotud nummerdatud osad, mis võnguvad harmooniliselt endi tasakaaluasendite ümber. Võnkumiste sagedus ja amplituud on kõikidel osadel ühesugune.

Iga järgmise osa võnkumine jääb eelmisest maha $^1/_{12}\ T$ võrra (s. o. toimub 30°-lise mahajäämisega faasi suhtes).

Osa 4 jääb esimesest maha $^1/_4\ T$ võrra (faasi suhtes jääb maha $\frac{\pi}{2} = 90°$), osa 7 — $^1/_2\ T$ võrra (faasi suhtes — $\pi = 180°$), osa 10 — $^3/_4\ T$ võrra (või $^3/_2\ \pi = 270°$), kuna 13. osa jääb esimesest maha terve perioodi võrra (faasi suhtes $2\pi = 360°$). Seega võngub 13. osa niisamuti nagu 1. osa, 14. osa niisamuti nagu 2. osa, 15. osa nagu 3. osa jne.

Joonisel 207 *a* näitavad punktide juures olevad noolekesed võnkuva osakese kiiruse suunda tasakaaluasendi suhtes.

Ühe perioodiga liigub laine edasi kaugusele, mis on võrdne punktide 1 ja 13 vahelise kaugusega. Need punktid võnguvad

360°-se faaside vahega, s. o. nad võnguvad ühteviisi (360°-ne faaside vahe on samaväärne 0°-se vahega).

Kõige lähemate, ühesugustes faasides võnkuvate sinusoidaalse laine punktide kaugust teineteisest nimetatakse lainepikkuseks.

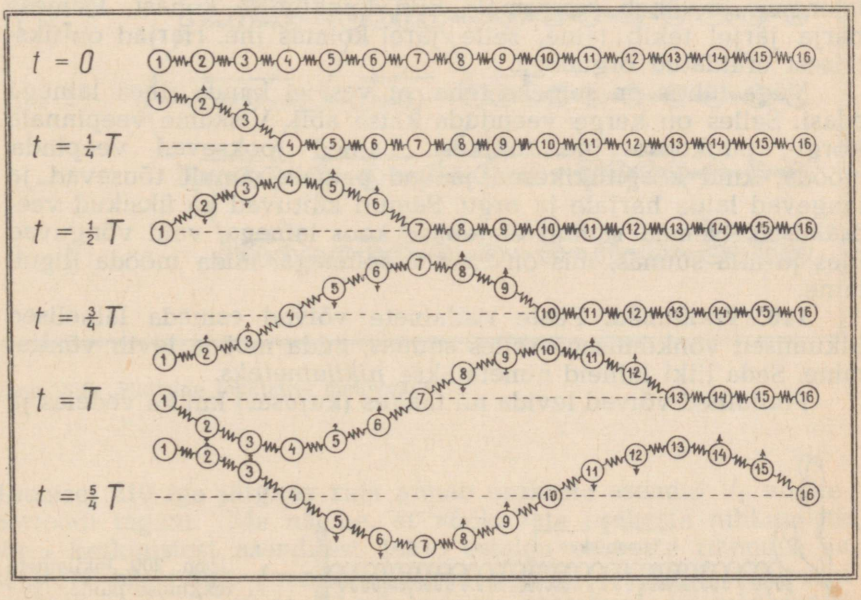
Lainepikkust tähistatakse tähega λ (kreeka täht «lambda»).

Joonisel 207 *a* on lainepikkuseks punktide 1—13, 2—14 või 4—16 kaugus teineteisest.

Ühe lainepikkuse ulatuses me leiame igasuguseis võimalikes faasides võnkuvaid osakesi. Iga lainepikkuse algusest võnkumise faasid hakkavad korduma. Ühesugustes faasides on niisugused punktid, mis on teineteisest 1, 2, 3 . . . , üldse täisarv lainepikkuse kaugusel. Kui aga punktid on teineteisest $1 \cdot \frac{\lambda}{2}$, $3 \cdot \frac{\lambda}{2}$, $5 \cdot \frac{\lambda}{2}$ . . . , s. o. paaritu arv poollaine pikkuse kaugusel (vaata näiteks punkte 1 ja 7 joonisel 270 *a*), siis on faasid vastupidised, s. o. erinevad $\pi = 180°$ võrra.

Lainelisele liikumisele on iseloomulik perioodilisus ajas ja ruumis. Tõepoolest võngub iga keskkonna osake perioodiliselt ajas ja samal ajal on igal ajamomendil kõik osakesed paigutunud joonele, mille kuju ruumis perioodiliselt kordub.

Meie poolt vaadeldud lained nööril on *ristlained;* osakesed



Joon. 207 *a*. Ristlaine tekkimise mehhanism.

Joon. 208. Lained veepinnal.

nendes lainetes võnguvad suunas, mis on risti laine levimissuunaga.

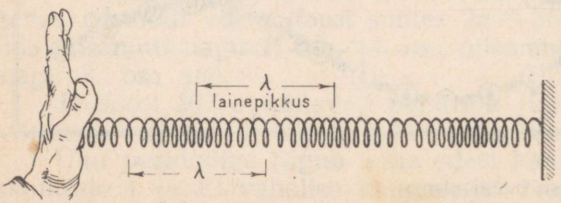
Kui visata tiiki kivi, siis näeme, kuidas kivi kukkumise kohalt hakkavad vee peal levima ringikujuliselt ristlained (joon. 208).

Kivi kukkudes surub kivi vee välja ja kukkumise kohale tekib vajumik (org). Orust välja tõrjutud vesi moodustab oru ümber rõngakujulise harja (mäe). See hari hakkab kohe igas suunas laienema ja läheb kaugemale kivi kukkumise kohast. Esimese harja järjel tekib teine, selle järel kolmas jne. Harjad on üksteisest eraldatud orgudega.

Väga tähtis on selgeks teha, et vesi ei kandu ühes lainega edasi. Selles on kerge veenduda katse abil. Viskame veepinnale korgi-, puukoore- jne. tükikesi. Lained jooksevad veepinda mööda, kuid korgitükikesed jäävad paigale, ainult tõusevad ja langevad laine harjale ja orgu. Samuti käituvad ka üksikud veeosakesed. Nemad samuti ei jookse koos lainega, vaid võnguvad üles ja alla suunas, mis on risti veepinnaga, mida mööda liigub laine.

110. Pikilained. Peale ristlainete võivad esineda lainelised liikumised võnkumisega selles suunas, mida mööda levib võnkumine. Seda liiki laineid nimetatakse *pikilaineteks.*

Pikilained võivad levida nii tahkes (kujusas) kui ka vedelas ja



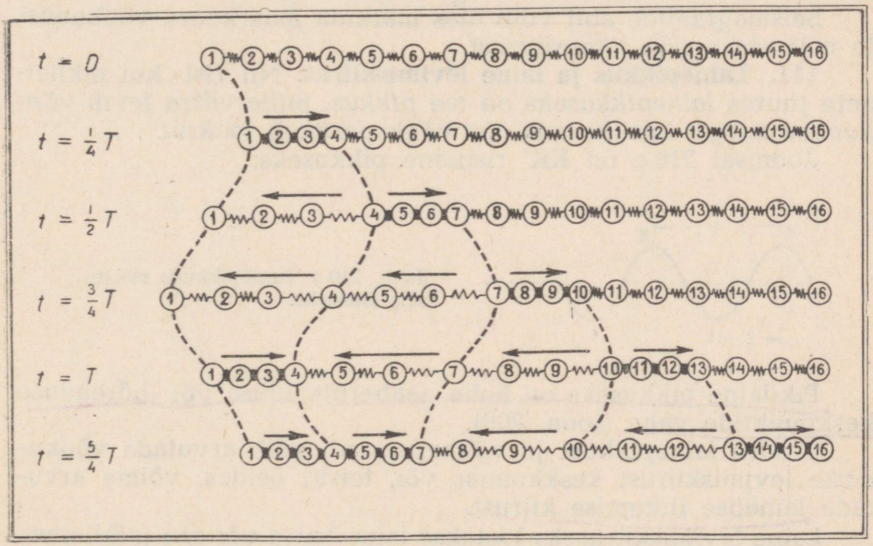
Joon. 209. Pikilainete tekkimise näide.

gaasilises kehas, kuna kõikides nendes kehades tekivad ruumala muutumisel elastusjõud. Neid saab hästi vaadelda pikal spiraalvedrul (joon. 209).

Löögiga ühte otsa tekitatakse vedrukeerdude tihenemine, mis hakkab «jooksma» mööda vedrut.

Pikilainete levimise protsessi võime selgitada joonise 210 abil.

Olgu meil rida elastselt seotud osakesi: 1, 2, 3 . . . 16, mis asetsevad üksteisest võrdsetel kaugustel (joon. 210). Anname joone 1—16 suunas osakesele 1 tõuke. Osake hakkab tõukest võnkuma. Seejuures ta läheneb naaberosakesele ja paneb ka selle võnkuma; see omakorda annab võnkuva liikumise naaberosakesele jne. Lõpptulemusena hakkavad kõik osakesed järk-järgult võnkuma, kuid mitte üheaegselt, vaid nii, et iga järgmine osake algab võnkumist eelmisest natuke hiljem. Seepärast hakkavad nad võnkuma ühe ja sama perioodiga, kuid erinevate faasidega.



Joon. 210. Pikilaine tekkimise mehhanism.

Joonisel 210 iga järgnev rida annab osakeste asendid $^1/_4$ võnkeperioodi tagant. Me näeme, et võnkuvate osakeste nihkumiste tõttu keskmistest asenditest tekib esialgu osakeste tihendus ja seejärel hõrendus. Joonisel 210 on punktiirjoontega kujutatud osakeste 1, 4, 7, 10 ja 13 võnkumiste graafikud. Pikivõnkumisi kujutatakse graafiliselt samuti nagu ristlaineidki sinusoidi abil,

mille juures sinusoidi hari vastab pikilaine tihendusele ja org — hõrendusele.

Tahketes kehades tekivad elastsusjõud nii kuju kui ruumala muutumisel. Seepärast võivad tahketes kehades levida nii pikikui ristlained. Gaasides ja vedelikes kuju muutumisel ei teki elastsusjõude, sellepärast ei saa neis levida elastsed ristlained.

Tahke keha lainete näiteks suures mastaabis on võnkumiste levimine maavärisemise ajal maakera sees ja maakoort mööda. Maavärisemise koldest kaugel asetsev vaatlusjaam võtab kõigepealt vastu pikilained. Uurimistega on kindlaks tehtud, et pärast esimese pikilaine ilmumist ilmuvad ristlained, mille levimiskiirus on pikilainete levimiskiirusest väiksem.

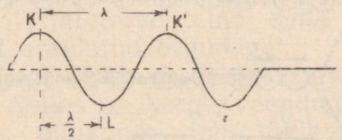
Kui on teada mõlema laineliigi levimiskiirus ja ajavahemik nende ilmumise vahel, siis võib teooria alusel, mida õpitakse kõrgemates eriõppeasutustes, määrata maavärisemise keskpunkti kauguse vaatlusjaamast.

Riistu, mis püüavad kinni maavärisemise kohast tulnud võnkumisi, nimetatakse seismograafideks.

Seismograafide abil võib üles märkida maa koore võnkumisi ja määrata nende intensiivsust.

111. Lainepikkus ja laine levimiskiirus. Nii rist- kui pikilainete juures *lainepikkuseks on tee pikkus, mille võrra levib võnkumine mingis keskkonnas ühe võnkeperioodi jooksul.*

Joonisel 210 *a* on KK' ristlaine pikkuseks.



Joon. 210 *a*. Lainepikkuse mõiste selgitamiseks.

Pikilaine pikkuseks on kahe naabertihenduse või -hõrenduse keskpunktide vahe (joon. 209).

Teades lainepikkust ja võnkeperioodi võib arvutada võnkumiste levimiskiirust keskkonnas või, teisiti öeldes, võime arvutada lainelise liikumise kiirust.

Laine levimiskiiruseks loetakse laine harja või oru (pikilaines tihenduse või hõrenduse) liikumise kiirust.

Perioodiga T võrdse ajavahemiku jooksul liigub hari või org (tihendus või hõrendus) kaugusele λ, mis on lainepikkuseks. Järelikult mõõdab laine liikumiskiirust v lainepikkuse λ ja võnkeperioodi T suhe; s. o. $v = \frac{\lambda}{T}$. Kuna $\frac{1}{T} = f$, siis võime kirjutada, et

$$v = \lambda f,$$

s. o. **võnkumise levimiskiirus mingis keskkonnas on võrdne lainepikkuse ja võnkesageduse korrutisega.**

Laine kannab (annab edasi) energiat ühelt võnkuvalt osakeselt teisele.

Võnkuma pandud lähteosakese (seda osakest nimetatakse *vibraatoriks*[1]) energia, levides ja hajudes ruumis, hakkab pidevalt vähenema ja võnkumisprotsess sumbudes lõppude lõpuks lakkab.

Et saada katkestamatut võnkumisprotsessi, tuleb vibraatori energiat pidevalt täiendada.

Harjutus 53.

1. Liita kaks harmoonilist võnkuvat liikumist, milledel on ühesugused perioodid ja amplituudid, kuid mis erinevad faasilt 30° võrra.
2. Teha graafik võnkuvale liikumisele, mis koosneb kahest harmooniliselt võnkuvast liikumisest, millede perioodid suhtuvad omavahel nagu 1:3. Komponentvõnkumiste amplituudid võtta ühesuurused.

---

[1] Ladinak. sõnast *vibrare* — värisema.

IX PEATÜKK.

HÄÄL.

112. Hääle tekkimine. Looduses ja tehnikas esinevate mitmesuguste võnkuvate ja laineliste liikumiste hulgas on eriti tähtis osa inimese elus häälevõnkumisel ja -lainetel või lihtsalt häälel. Piisab, kui ütleme, et meie kõne, mis võimaldab inimestevahelist suhtlemist, koosneb reast üksteisele järgnevatest häältest. Meie eraldame kergesti ühe inimese hääle teise inimese häälest, ühe sõna teisest sõnast.

Kõrv, mille abil me tajume häälenähtusi, püüab kinni kõige väiksemad inimese hääle varjundid: rõõmu, mure, viha jne.

Füüsika osa, milles õpitakse häälenähtusi, nimetatakse akustikaks[1].

Lihtsad vaatlused näitavad, et heliseva keha osad on võnkuvas liikumises.

Vaatleme lähemalt helisevat keelt: ta on keskelt muutunud nagu paksemaks ja äärjoontelt vähem teravaks. Keele välimus muutub seetõttu, et ta võngub kahe äärmise seisu (1 ja 2, joon. 211) vahel.

Keele võnkumised on niivõrd kiired, et meie ei suuda tema liikumist jälgida. Kui helisevale keelele lähendada paberiribakese ots, siis ribakene hakkab keele tõugetest hüplema. Me kuuleme helisemist seni, kuni keel võngub. Paneme keele seisma, kaob ka helisemine.

Häälenähtuste uurimisel kasutatakse väga sageli häälealli-kana heliharki (kammertooni) (joon. 212). Kui heliharki lüüa pehme haamrikesega või tõmmata viiulipoognaga, siis hakkab helihark helisema.

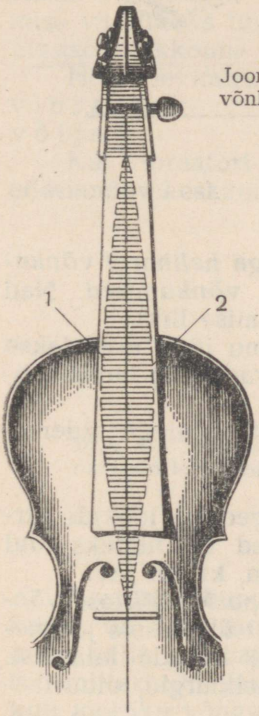
Lähendame helisevale helihargile niidi otsa riputatud kerge kuulikese (klaashelmes), siis hakkab kuulike helihargilt eemale hüplema.

Heliseva helihargi värisemist võime tunda ka vahetult, kui puudutame õrnalt näpuga helihargi harusid. Kui aga kõvemini suruda helihargi harusid, siis ta ei saa enam võnkuda ja heli kaob.

---

[1] Kreekak. sõnast *akustikos* — kuulmis-.

Hääleallikateks muutuvad kergesti need kehad, mille elastsus on suur. Selliseks kehaks on näiteks pingúletõmmatud teraskeel, helihark, ühe otsaga pihtide vahele kinnitatud terasplaat, kuljus, puust lauake jne. Hääleallikateks võivad olla mitte üksi tahked kehad, vaid ka vedelikud ja isegi gaasid. Nii näiteks «laulab» sagedasti vesi veevärgi torudes ja «undab» õhk korstnas; võnkuv õhusammas on hääleallikaks oreliviledes ja mitmesugustes puhkpillides.

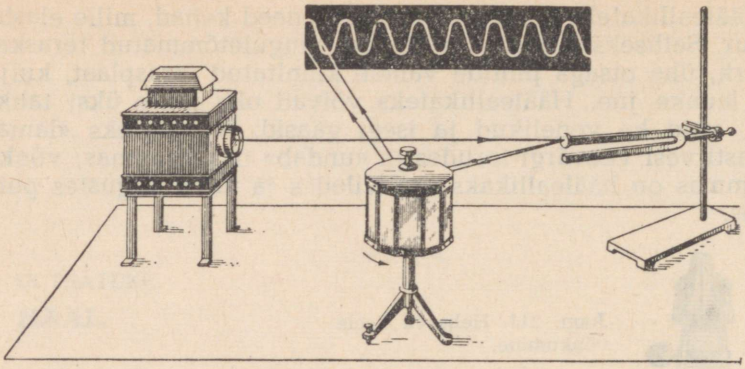


Joon. 211. Heliseva keele võnkumine.

Joon. 212. Heliseva helihargi võnkumiste kindlakstegemine.

113. Häälevõnkumiste lihtsam liik. Uurime natuke lähemalt helihargi võnkuvat liikumist. Selleks kinnitame helihargi ühe haru külge kerge peeglikese ja laseme peeglile kitsa riba valgust. Valgus, peegeldudes peeglilt, langeb teisele vertikaalse telje ümber pöörlevale mitmetahulisele peeglile ja sealt peegeldudes langeb ekraanile (joon. 213). Ekraanile tekib väike hele täpp. Kui nüüd panna helihark kummist haamri löögiga helisema, siis tekib ekraanile valgustäpi asemele vertikaalne kriips.

Kui paneme helihargi seisma ja pöörame kiiresti mitmetahulist peeglit, siis näeme ekraanil pidevat horisontaalset joont. Kui nüüd mitmetahulise peegli liikumise ajal panna helihark helisema,



Joon. 213. Helihargi võnkumiste üleskirjutus.

siis saame ekraanile sinusoidi (joon. 213). Seega *helihargi võnkumised on soinusoidaalsed ehk harmoonilised võnkumised.* Nad kujutavad endast kõige lihtsamat häälevõnkumise liiki.

114. Häälte liigitus. Laine kuju ja iseloomu järgi eristatakse tavaliselt kolme häälte liiki: 1) löögid, 2) mürad ja 3) muusikalised helid ehk toonid.

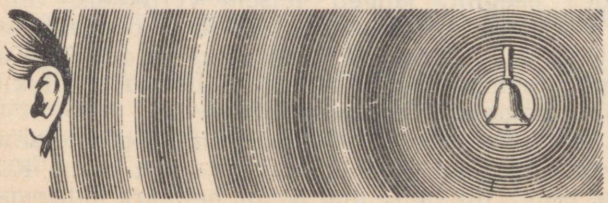
Löögid tekivad paukudest, plahvatustest, elektrisädemetest, raskete kehade löökidest jne.

Löögi laine kujutab endast üksiklainet.

Mürad kujutavad endast nõrkade ja sagedaste löökide järjendit ilma igasuguse perioodilisuseta. Sellised on näiteks tuul puulehtedes, ragin puu murdumisel, raua kõlin, krigin jne.

Muusikalised helid tekivad hääleallikate perioodilistest võnkumistest. Nad koosnevad pikast reast pidevalt üksteisele järgnevatest ühesuguse pikkuse ja kujuga elastsete kehade lainetest. Sellised on näiteks hääled, mida tekitavad helihargid, muusikariistad, lauljad jne.

115. Hääle levimine. Meie tajume häält oma kuulmisorgani — kõrva abil. Kõrv on meie hääle vastuvõtjaks. Kõrva ja heliseva (võnkuva) keha, vibraatori vahel on edasiandev keskkond. Kõige sagedamini on selleks õhk.

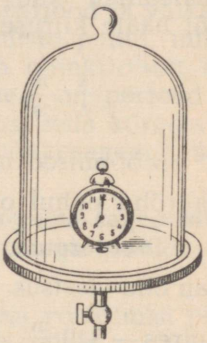


Joon. 214. Helisevalt kellalt levivad õhulained kõrvani.

Kui mingi keha heliseb, siis ta võngub, tema võnkumised antakse edasi lähedalolevatele õhu osakestele, mis ka hakkavad võnkuma ja omakorda annavad võnkumise naaberosakestele, need annavad võnkumise omakorda edasi jne. Selle tulemusena moodustuvad ja levivad õhus häälelained (joon. 214). Need lained tekitatakse keskkonnas (õhu) osakeste võnkuva liikumise poolt, kusjuures osakeste võnkumine toimub piki laine liikumise suunda. Hääle vibraatorilt vastuvõtjale (erijuhul meie kõrvale) edasiandmise vajalikuks tingimuseks on vibraatori ja vastuvõtja vahelise elastse keskkonna olemasolu.

Hääle levimise protsessi võib skemaatiliselt kujutada nii: vibraator → edasiandev keskkond → vastuvõtja.

Kui vibraatori ja vastuvõtja vahelt kõrvaldada elastne, häält edasiandev keskkond, siis häälelained ei jõua vastuvõtjani.



Joon. 215. Katse, millega tõestatakse, et õhuta ruumis ei levi häälelained.

Asetame õhupumba kupli alla äratuskella (joon. 215). Seni kui kuplis on õhk, me kuuleme kella helisemist selgesti. Kupli alt õhku välja pumbates nõrgeneb hääl järk-järgult ja lõpuks muutub mittekuuldavaks. Haamrike jätkab kausikese löömist, järelikult kausike võngub, kuid kaugemale need võnkumised ei suuda levida (pole edasiandvat keskkonda) ning seetõttu ei saa jõuda meie kõrvani. Laseme kuplisse õhku, siis kuuleme uuesti helisemist.

Paneme pika laua otsale taskukella ja läheme ise laua teise otsa. Pannes kõrva laua vastu, me kuuleme selgesti kella tiksumist.

Seome metall-lusika külge nööri. Nööri otsad paneme kõrva juurde. Lüües lusikat me kuuleme tugevat häält. Veel tugevamat häält kuuleme siis, kui nööri asendame traadiga, ja sugugi ei kuule häält, kui nööri asendame kummipaelaga.

Kehade võimet edasi anda häälevõnkumisi nimetatakse hääle-juhtivuseks.

Pehmed ja poorsed kehad on halvad häälejuhid. Selleks et muuta mingit ruumi kõlakindlaks, tuleb ruumis seinad, põrand

ja lagi katta häältneelavatest materjalidest (vilt, vaibad, pressitud kork, poorsed kivid, plii) kihtidega.

Häälelained sumbuvad kiiresti niisugustes vahekihtides.

Vedelikud juhivad hästi häält. Et kalad kuulevad häält ja samme kaldalt, — see on hästi teada kogenud kaluritele.

Seega *häälelained levivad tahketes, vedelates ja gaasilistes kehades, kuid ei saa levida õhuta ruumis.*

116. Hääle levimiskiirus. Lihtsad vaatlused näitavad, et hääl levib igas keskkonnas kindla, sellele keskkonnale omase kiirusega.

Kui vaatleme eemalt püssilaskmist, siis näeme esialgu suitsu ja tuld ning alles mõne aja möödudes kuuleme pauku. Suits tekib samal ajal kui esimene häälevõnkuminegi. Mõõtes ajavahemiku (t sekundit) hääle tekkimise momendi (suitsu tekkimise moment) ja selle momendi vahel, millal hääl jõudis kõrvani, ning teades hääleallika kaugust (s meetrit) meist, võime leida häälelainete või hääle kiiruse:

$$v = \frac{s}{t}\ \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Mõõtmised näitavad, et hääle kiirus õhus 0° C ja normaalse õhurõhu puhul on 332 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

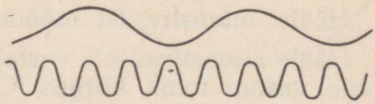
Temperatuuri tõustes kasvab hääle kiirus, kuna seejuures kasvab õhu elastsus. Nii näiteks on kiirus 15° C juures 342 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$, 30° C juures — 349 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ja 100° C juures — 386 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$. Teistes gaasides on hääle kiirus õhu omast erinev. Mida kergem on gaas, seda liikuvamad on tema molekulid, seda suurem on temas hääle levimiskiirus. Vesinikus on ta 0° C juures 1280 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$. Süsihappegaasis on hääle kiirus väiksem, 0° C juures on ta 260 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$. Vees on hääle kiirus $4^1/_2$ korda suurem kui õhus. Metallides on hääle kiirus veel suurem.

Hääle kiirus mitmesugustes keskkondades (0° C juures)

Õhk	332 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Vesi	1450 „
Vask	3800 „
Raud	4900 „
Klaas	5600 „
Kuusepuu	4800 „
Kork	430—530 „
Kautšuk	50 „

117. Muusikalised helid. Tooni kõrgus. Muusikalisi helisid või, nagu harilikult räägitakse, muusikalisi toone iseloomustab nende sagedus, intensiivsus (tugevus) ja tämber.

Võtame kaks heliharki, mis annavad erinevate kõrgustega helisid, ja teeme nende võnkumisest graafikud nõetatud plaadile. Me saame joonisel 216 kujutatud kõverad. Ülemine kõver on saadud helihargist, mis annab madalama heli, alumine helihargist,



Joon. 216. Ülemine kõver vastab madalale, alumine kõrgemale toonile.

mis annab kõrgema heli. Esimesel juhul saadi pikema lainega kõver, teisel juhul lühema lainega kõver. Siit järgneb, et esimesel helihargil (madalama heliga) on suurem võnkeperiood ja väiksem sagedus kui teisel. Harmooniliste häälevõnkumiste puhul, millisteks näiteks on helihargi võnkumised, vastab objektiivselt heli kõrguse aisting võnkesagedusele. Mida väiksem on periood ja, sellele vastavalt, mida suurem on võnkesagedus, seda kõrgem on toon ning ümberpöördult: mida väiksem on võnkesagedus, seda madalam on toon.

Seega **füüsikalistele nähtustele — mitmesuguste sagedustega võnkumistele vastavad mitmesuguste kõrgustega toonide aistingud.**

Meie kõrv on võimeline helina vastu võtma võnkumisi piirides 20 kuni 20 000 hertsi (Hz). Inimese hääle piirid on 64 Hz (madalam, bassi noot) ja 1300 Hz (ülemine, soprani noot). Madalaim klaveri noot («*la*») on sagedusega 27,5 Hz, tema kõrgeim «*do*» — 4096 Hz.

Looduses esineb võnkumisi, mille sagedus pole meie kõrvaga vastuvõetav. Sellise «mittekuuldava» hääle lained jõuavad muidugi ka meie kõrvani ja mõjustavad kõrva trummikilet (kuulmenahk), kuid meie kuulmisaparaat ei reageeri nendele mõjutustele. Häälevõnkumisi, millede sagedus on väljaspool kuuldavuspiirkonda, s. o. suurem 20 kilohertsist, nimetatakse ultrahelideks. Tänapäeva tehnika käsutuses on vahendid ultrahelide saamiseks suures sageduste diapasoonis (vahemikus) — 20 kilohertsist kuni 500 megahertsini.

Ultrahelisid rakendatakse tänapäeval tehnikas üsna laialt. Nende abil näiteks mõõdetakse mere sügavust (kajalood). Ultrahelisid kasutatakse metallesemete ja valatiste defektide kindlakstegemiseks (akustiline defektoskoopia). Ultrahelide abil saadakse mitmesuguseid emulsioone.

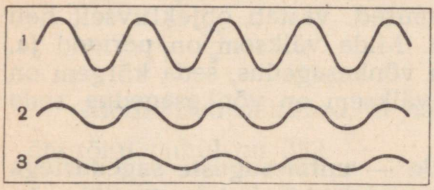
Ultrahelid avaldavad bioloogilist ja füsioloogilist toimet. Nii näiteks tõstab ultrahelidega kiiritamine seemnete idanevust ja

piima kiiritamine hoiab teda kauemat aega hapuks minemise eest. Punased verelibled hävivad ultrahelide toimel ja selle tagajärjel loomad hukkuvad. Väikseid kalu ja konni surmatakse ultrahelide abil juba 1—2 minuti jooksul.

118. Hääle intensiivsus ja valjus. *Hääle intensiivsuseks (tugevuseks) nimetatakse suurust, mida mõõdetakse energiahulgaga, mis läbib ühe sekundi jooksul häälelainete levimissuunaga risti asetatud* 1 cm^2 *suuruse pinna.*

Hääle intensiivsust mõõdetakse $\frac{erg}{cm^2 s}$-ga.

Hääle intensiivsusele vastab valjuse taju, nii nagu võnkesagedusele vastab tooni kõrgus. On arusaadav, et hääle intensiivsuse ja valjuse mõisted pole ühesuguse tähendusega. Hääle intensiivsus iseloomustab füüsikalist protsessi, sõltumata sellest, kas teda kuulajate poolt tajutakse või mitte; hääle valjus aga on subjektiivne omadus.



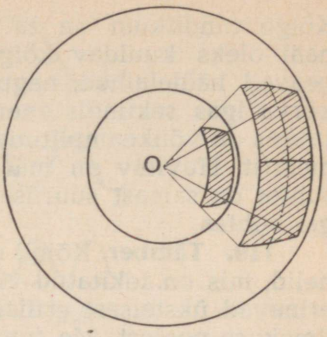
Joon. 217. Kolme ühesuguse sagedusega ja erineva valjusega tooni graafik; suurema amplituudiga kõverale vastab valjem toon.

Vaatleme nüüd, millest sõltub hääle intensiivsus ja järelikult ka tema valjus. Võtame üles mitu korda teatud aja tagant helihargi võnkumised (joon. 217). Helihargi heli järk-järgult nõrgeneb ja see avaldub ka kohe võnkumiste graafikus. Nagu näha graafikutest 1, 2 ja 3, ei ole muutunud helihargi võnkeperiood: harjad ja orud on kõigi kolme graafiku juures ühesuguse sagedusega. Kuid heli nõrgenemisega on vähenenud võnkeamplituud. Kõige intensiivsemal (tugevamal) helil on suurim amplituud (1. graafik). Kui heli oli vaevalt kuuldav, siis amplituud oli päris väike (3. graafik). Kui helihark lakkab helisemast, siis graafik kujuneb sirgjooneks.

Seega näeme, et heli intensiivsus on seotud võnkeamplituudiga: *mida suurem on võnkeamplituud, seda tugevam on heli; mida väiksem on amplituud, seda nõrgem on heli.*

Kui mingi keha heliseb, siis ta paneb võnkuma lähedalolevad keskkonna (näit. õhu) osakesed ja annab seejuures ära osa oma energiast. Heliseva keha energiavaru väheneb, väheneb tema võnkeamplituud ja nõrgeneb heli.

Keskkonnas levides nõrgeneb heli kauguse suurenemisega heliallikast. Kogu energia, mis esialgu oli koondunud heliallika ümber, jaotub heli kaugenedes ikka suuremale ja suuremale kesk-



Joon. 218. Igale pinnaühikule tulnud hääle energia on pöördvõrdeline punktilise hääleallika kauguse ruuduga.

konna osakeste arvule. Igale osakesele jääb ikka vähem ja vähem energiat. Häälelainete levimisel isotroopses[1] keskkonnas on leviva laine pind sfääriline tsentriga O, mis praktiliselt ühtib hääleallikaga. Sfääri pind kasvab võrdeliselt hääleallika kauguse ruuduga; seda selgitab joonis 218.

Igale sfääri pinna ühikule tulev energia muutub pöördvõrdeliselt hääleallika kauguse ruuduga. Siit järeldus: *hääle intensiivsus (tugevus) muutub pöördvõrdeliselt hääleallika kauguse ruuduga.* Muutub seejuures ka intensiivsusega seotud valjuse taju, mis igaühele on kogemustest teada.

Kui saata heli ühtlast toru mööda, siis heli ei kaota sel juhul peaaegu sugugi oma intensiivsusest. Heli vähest nõrgenemist kaugusega võime tähele panna ka pikkades kitsastes koridorides.

Kaugemale kõnelemiseks kasutatakse sagedasti koonusekujulist toru — ruuporit. Ruupor ei lase häälel hajuda igasse suunda, vaid sunnib teda minema ühes suunas. Ruuporit võib kasutada ka selleks, et koguda hajunud häält. Asetades ruupori peenema otsaga kõrva juurde, me tugevdame sellega häält, sest kõrvale mõjub nüüd kogu see energia, mis on tulnud ruupori välisele, laiemale otsale. Niimitu korda kui on ruupori laiem ots pindalalt suurem kõrva avast, niimitu korda on tugevnenud ka hääl.

Meie kõrv on varustatud oma ruuporiga — kõrvalestaga. Mõnikord selleks, et kuulda nõrka häält, me suurendame ruuporit sel teel, et paneme käe kõrva juurde.

Inimese kõrval on erakordselt suur tundlikkus: ta püüab kinni hääle, mis on miljon korda nõrgem hariliku valjusega inimese häälest. Teiselt poolt harjub inimene kannatama ka niisuguseid tugevaid hääli nagu suurtükilaskmine.

Ometi pole meie kõrv ühtviisi tundlik kõikidele sagedustele.

---

[1] Isotroopsus (kreekak. sõnadest *isos* — ühesugune ja *tropos* — iseloom) — kehade füüsikaline omadus, mis seisab selles, et omadused nagu soojusjuhtivus, elastsus, elektrijuhtivus jne. on igas suunas ühesugused.

Kõige tundlikum on ta toonidele 1000—3000 hertsi piirides. Et hääl oleks kuuldav kõige tundlikumas sageduses (2000 hertsi), peavad häälelained, nagu näitavad tänapäeva mõõtmised, tooma kõrva igas sekundis energiat vähemalt 5 triljondikku ergi. Seejuures on võnkeamplituud väiksem kui üks kümnemiljardik millimeetrit. Huvitav on märkida, et silma tundlikkus valgusenergia suhtes on samast suurusejärgust kui kõrva tundlikkus hääleenergia suhtes.

119. Tämber. Kõigil on hästi teada, et ühe ja sama kõrgusega helid, mis on tekitatud viiulil, klarnetil, klaveril või laulja poolt, erinevad üksteisest eriliselt omaduselt — pehmuse, teravuse või ilmekuse poolest. Me tunneme tuttavaid hääle järgi. Isegi ühel ja samal inimesel erinevad vokaalid teineteisest.

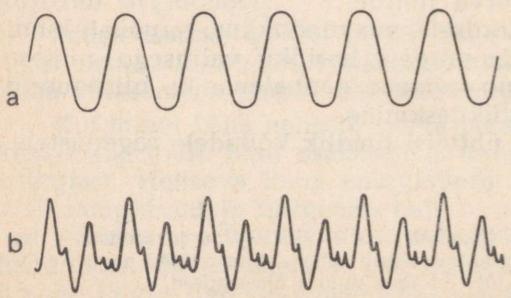
Seda hääle omadust, tema omapärast «värvi» nimetatakse helivärviks ehk tämbriks (ka kõlaks).

Antud kõrgusega tooni tämbrit määratakse selle perioodilise kõverjoone kujuga (vormiga), mis kujutab tooniallika poolt tekitatud võnkumisi. Ristvõnkumise korral see kõverjoon kujutab vahetult ka laine enda kuju. Pikivõnkumiste puhul aga see kõverjoon kujutab vaid tingimisi laine «kuju». Iga kõverjoone tõus vastab keskkonna tihenemisele ja langus hõrenemisele.

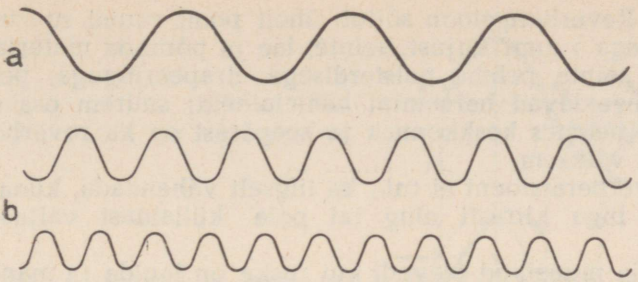
Pendlitaolised võnkumised annavad laine, millel on joonisel 219 *a* näidatud kuju ja mida nimetatakse «sinusoidaalseks laineks». Selline annab lihtsa, puhta tooni aistingu.

Viiulis aga, kus keelte võnkumised tekitatakse poognaga, saadakse keerukama kujuga lained, millele vastavad ka komplitseeritumad helid.

Spetsiaalsete hääleanalüsaatorite abil võib kindlaks teha, et hääl koosneb reast lihttoonidest, mille võnkesagedused suhtuvad nagu 1 : 2 : 3 : 4 .... Kõige madalamat tooni, mis vastab 1-le, nimetatakse põhitooniks. Temal on sama periood, mis häälelgi. Teisi lihttoone, milledel on kaks, kolm, neli jne. korda suuremad sagedused, nimetatakse harmoonilisteks ülemtoonideks (oobertoonideks).



Joon. 219. *a* — puhta, lihtsa tooni graafik; *b* — keelvilest saadud hääle graafik.



Joon. 220. *a* — viiuli hääle põhitooni graafik; *b* — viiuli hääle kahe intensiivsema ülemtooni graafikud.

Joonisel 220 on kujutatud kolm sinusoidaalset lainet, milledest üks vastab viiuli põhitoonile, teised aga kahele intensiivsemale viiuli laine ülemtoonile.

Valides heliharkide abil sobiva kombinatsiooni puhtaid toone, võime saada tämbri poolest viiuli või mingi teise muusikariista häälega ühtiva hääle.

Muusikas tarvitatakse ülemtoonide poolest rikkaid hääli. Sellest, kui palju kaasneb põhitoonile ülemtoone ja kui tugevad on need ülemtoonid, sõltub hääle tämber, s. o. hääle ilmekus.

Eriti rikas ülemtoonide poolest on viiuli hääl ja lauljate hääled.

«Toone, mida annavad helihargid,» kirjutas A. G. Stoletov, «ei kasutata muusikas; nad on niisama magedad ja maitsetud nagu keemiliselt puhas vesi — nad on iseloomutud.»

120. Häälelainete peegeldumine. Kui häälelained kohtuvad mingi takistusega (mäed, mets, sein jne.), siis nad peegelduvad. Kui peegeldunud häälelaine jõuab meie kõrvani, siis me kuuleme peegeldunud häält, mida nimetatakse *kajaks*.

Peegeldunud häält me kuuleme selle ajavahemiku tagant, mille jooksul hääl läbib kahekordse hääleallika ja takistuse vahemaa.

Kõuemürin on seletatav mitmekordse peegeldumisega pilvedelt ja maalt. Kui hääl peegeldub lähedaselt takistuselt, siis kaja sulab esialgse häälega ühte ja tugevdab seda. Seepärast tunduvad hääled kinnistes ruumides valjematena kui vabas õhus.

Siledate seinte, põranda ja laega ruumidel on omadus väga hästi peegeldada häälelaineid. Selle tagajärjel kuuldakse niisuguses ruumis häält hästi valjuna. Eelmiste häälelainete järgnevatega liitumise tõttu saadakse häälte segu, tekib kõmin: hääl ei kao kohe pärast hääleallika tegevuse seismajäämist.

Ruumi akustikat iseloomustatakse niinimetatud *reverberatsiooni ajaga*, s. o. hääle kustumisajaga kuni mittekuul-

mise piirini. Reverberatsioon sõltub ühelt poolt ruumi suurusest, teiselt poolt aga ruumi kujust, seinte, lae ja põranda materjalist.

Ruumid seinte pehme polsterdisega, drapeeringuga, pehme mööbliga peegeldavad halvemini häälelaineid; suurem osa nendest neeldub pehmes keskkonnas ja seepärast on ka reverberatsioon hoopis väiksem.

Kuid reverberatsiooni ei tule ka liigselt vähendada, kuna siis hääl kustub liiga kiiresti ning tal pole küllaldast valjust ja eredust.

Lauljad ja muusikud teavad, kui raske on laulda ja mängida väikestes, pehme mööbliga, drapeeringutega ja vaipadega täiskiilutud tubades.

Ühes akustilises mõttes paremas saalis — Nõukogude Maja sammassaalis Moskvas — on reverberatsiooni aeg umbes 1,75 sekundit siis, kui saal on täidetud inimestega, ja 4 sekundit siis, kui saal on tühi.

121. Seisvad lained. Lööme järsult käega rippuva nööri vaba otsa. Nööri mööda jookseb laine. Laine läheb kinnitatud otsani, peegeldub sealt ja tuleb tagasi (joon. 221). Kui võngutame käega pidevalt nööri otsa, siis saame rea pidevalt üksteise järele jooksvaid laineid. Nendele vastupidises suunas jookseb kinnitatud otsast samasugune rida peegeldunud laineid. Need mõlemad süsteemid paigutuvad teineteisele peale, moodustades niinimetatud s e i s v a l a i n e. Vaatleme seisva laine moodustumise käiku.

Olgu jooksvate ja peegeldunud lainete perioodid ja amplituudid ühesuurused. Teatud ajamomendil need mõlemad lained paigutuvad teineteisele nii, nagu näidatud joonisel 222 *a*. Siis need lained lähevad laiali: üks nihkub teatud kaugusele paremale ja teine samale kaugusele vasakule (joon. 222 *b*).

Lainete ühtimisel on punktid a_1, a_2, a_3 jne. tasakaaluasendis. See säilib ka siis, kui lained lähevad laiali. Tõepoolest, lainete laialiminemisel nihutab üks laine punktid üles, teine niisama palju alla. Niisuguseid liikumatuid punkte nimetatakse s õ l m e d e k s.

Kogu nööri (joon. 221) jaotavad sõlmed mitmeks ühesuguseks võnkuvaks osaks. Sel ajal kui üks nendest osadest läheb üles (hari), läheb naaberosa alla (org).

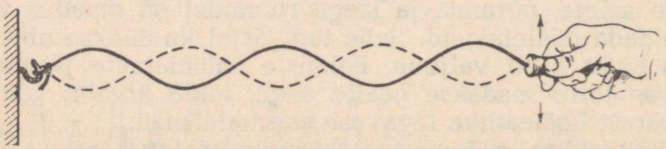
Punktid b_1, b_2, b_3 jne. lainete ühtimisel (joon. 222 *a*) omavad suurimaid, kahekordse amplituudiga võrdseid nihkumisi (joon. 222 *c*).

Lainete laiali minnes nende punktide nihkumine väheneb nullini (joon. 222 *d, e*) ja siis muudab oma suunda (joon. 222 *f, g*), saavutab suurima väärtuse (joon. 222 *h*) ning jälle kahaneb nullini jne.

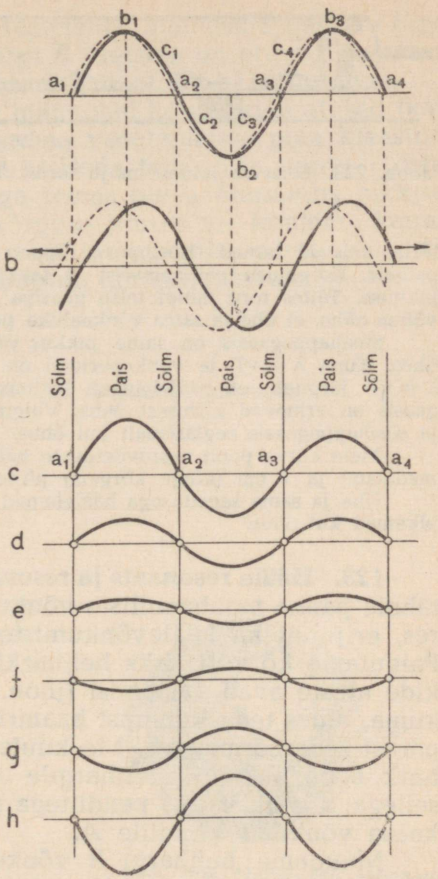
Seesama toimub punktidega c_1, c_2, c_3 jne. Mida lähemal on niisugune punkt b_1-le, b_2-le või b_3-le jne., seda suurema amplituudiga ta hakkab võnkuma.

Punktid b_1, b_2, b_3 jne., millel on suurim võnkeamplituud, moodustavad seisva laine p a i s u d.

Kahe naaberpaisu või naabersõlme kaugus teineteisest on võrdne poollaine pikkusega, kuna sõlme kaugus lähemast paisust on võrdne veerandlaine pikkusega.



Joon. 221. Seisvate lainete saamine nööriga.



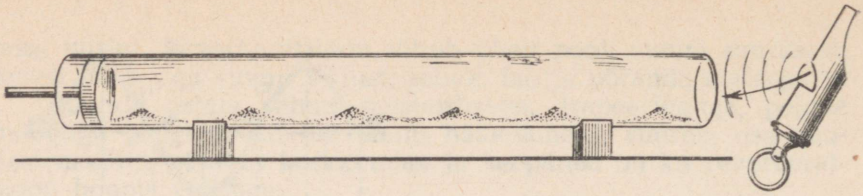
Joon. 222. Seisvate lainete mehhanismi seletuse juurde.

Jooniselt 222 on näha, et kõikidel punktidel, mis asetsevad kahe naabersõlme vahel, s. o. punktidel, mis kuuluvad ühele ja samale poollainele, on üks ja sama liikumise suund (kas liiguvad kõik üles või, ümberpöördult, alla) ning nad võnguvad ühesugustes faasides. Kahe naaberpoollaine punktid aga liiguvad vastupidistes suundades (üks — üles, teine — alla); nende faasid on vastupidised, s. o. nad erinevad teineteisest π ehk 180° võrra.

Seisva laine energia on jaotunud nii, et sõlmedele lähedalolevatesse piirkondadese keskendub peamiselt potentsiaalne energia, kuid paisudele lähedalolevatesse piirkondadesse — kineetiline energia. Sel momendil, kui laine kineetiline energia on maksimaalne, on potentsiaalne energia saanud minimaalseks. Veerand perioodi pärast saavutab potentsiaalne energia maksimumi, kuna kineetiline energia on vähenenud nullini. Seega *seisvas laines toimub pidev energia muundumine ja ümberjaotumine, kuid ei toimu energia edasikandmist.* Siit ka termin — «seisev laine».

122. Seisvate häälelainete vaatlus. Seisvaid pikilaineid võime õhus kindlaks teha järgmise katse abil.

Võtame ühest otsast kinnise klaastoru (joon. 223); paneme sinna õhukese kihi kuiva korgipuru. Tekitame nüüd toru lahtise otsa ees tugeva kõrge heli. Sellest toru otsast hakkab õhus levima pikilaine, mis, jõudes toru teise otsa, peegeldub. Sinnajooksvate ja tagasipeegeldunud lainete koosmõjust kujunevad



Joon. 223. Seisvate lainete mõju torus olevale pulbrile.

torus seisvad lained. Korgipuru rappub paisude kohal, kuid sõlmedes jääb paigale. Korgipuru paiknemisest ja tekkinud kujundeist võib saada seisva laine pikkuse. Täites toru mingi teise gaasiga (näit. süsihappegaas või valgustusgaas), võime näha, et ühe ja sama võnkeallika poolt tekitatud laine pikkus muutub.

Süsihappegaasis on laine pikkus väiksem, kuid valgustusgaasis suurem kui õhus. Kuna $\lambda = vT$ ja võnkeperiood on meie katses jääv suurus, siis valemist $\lambda = vT$ järgneb, et häälelainete levimiskiirused süsihappegaasis ja valgustusgaasis on erinevad kiirusest õhus. Valgustusgaasis levivad häälelained kiiremini ja süsihappegaasis aeglasemalt kui õhus.

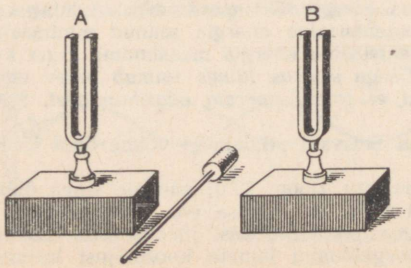
Meie kõrva poolt vastuvõetavate häälelainete pikkused õhus on 20 m (kõige madalam) ja 1 cm (kõige kõrgem) piirides.

Ühe ja sama sagedusega häälelained on vees $4^1/_2$ korda ja rauas $10^1/_2$ korda pikemad kui õhus.

123. Hääle resonants ja resonaatorid. Resonantsinähtust võime tähele panna mehhaaniliste võnkumiste igasuguste sageduste juures, erijuhul ka häälevõnkumiste juures. Teeme järgmise katse. Paigutame kõrvuti kaks heliharki *A* ja *B* ning asetame heliharkide aluste avad vastamisi (joon. 224). Paneme helihargi *A* võnkuma, lüües teda kummist haamrikesega, ja summutame ta varsti pärast seda sõrmedega. Me kuuleme helihargi *B* helisemist. Helihark *B* on hakanud helihargile *A* kaasa helisema analoogiliselt sellega, mis oli katses pendlitega (joon. 206), kus pendel *C* hakkas kaasa võnkuma pendlile *A*.

Muudame helihargi *B* võnkeperioodi, kinnitades tema hargile väikese muhvikese. Korrates seda katset me näeme, et helihark *B* nüüd enam ei helise kaasa helihargile *A*, nagu seda nägime katses pendlitega, kus pendel *B* ei võnkunud kaasa pendlile *A*.

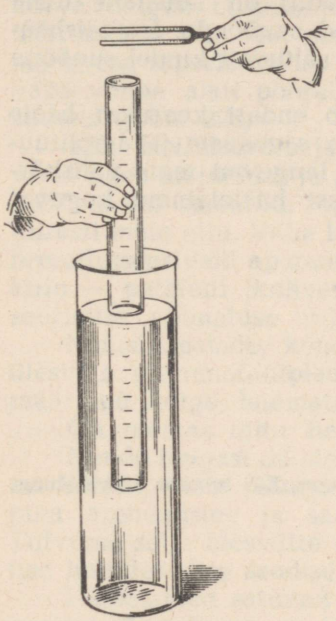
Helihargi *A* poolt tekitatud häälelained, jõudes helihargini *B*, tekitavad temas sunnitud võnkumise sagedusega, mis on võrdne helihargi *A* sagedusega. Kui helihargi *B* sagedus on niisama suur



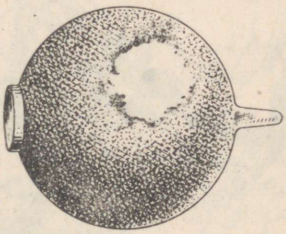
Joon. 224. Helihargid kastidega resonantsi saamiseks.

kui helihargi *A* oma, siis tekib resonants: helihark *B* hakkab tugevasti võnkuma. Kui aga helihargi *B* sagedus on erinev, siis tema sunnitud võnkumised on niivõrd nõrgad, et me häält ei kuule.

Vaatleme nüüd, millist osa mängivad heliharkide alused (kastid). Teeme veel ühe katse. Laseme veeanumasse pika klaastoru (joon. 225) ja laseme helihargil heliseda tema otsa juures. Tõstes toru vees me suurendame seega temas oleva õhusamba pikkust. Torusoleva õhusamba teatud kõrguse juures me kuuleme kaunis tugevat häält. Kui jätkata toru väljatõmbamist veest, siis hääl hakkab nõrgenema ja lõpuks muutub mittekuuldavaks.



Joon. 225. Õhusamba resonants.



Joon. 226. Helmholzi resonaator.

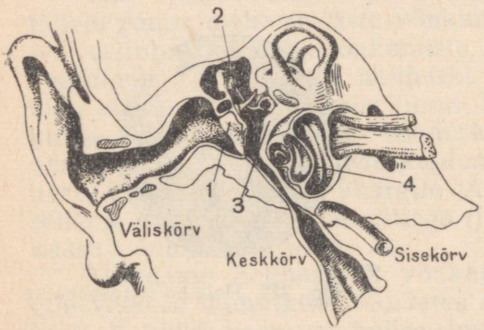
Mõõtmised näitavad, et väikseim resoneeriva õhusamba kõrgus on $^1/_4$ antud laine pikkusest. Sellepärast asetatakse helihark resoneerivale kastile, mis on ehitatud nii, et ta pikkus on $^1/_4$ selle laine pikkusest, mida annab temale asetatav helihark. Neil tingimustel võngub kastis olev õhusammas resonantsis helihargi võnkumistega, mis põhjustabki tugevama helilaine tekkimist ümbritsevas õhus, kui helihark üksi suudaks anda.

Muusikariistades leiab resonants hääle kõvenemise otstarbel õige laialdast kasutamist. Saksa teadlane Helmholz (1821—1894), ehitas erilised resonaatorid, milledest igaüks resoneerib ainult ühele kindlale toonile (joon. 226). Resonaatori kitsas ava asetatakse kõrva juurde. Laiema ava kaudu satuvad resonaatorisse häälelained. Seest on resonaator õõnes. Resonaatori omatooni kuuleme kergesti, kui puhume laiema ava juurest õhku.

Liithääles resoneerib niisugune resonaator ainult sellele toonile, mis ühtib tema omatooniga. Omades niisuguste resonaatorite kollektsiooni, võime analüüsida muusikariistade, nagu keelpillide, puhkpillide ja löökpillide helisid. Samal viisil võime analüüsida lauljate hääli. Sel viisil õnnestub ka eraldada üksikuid toone mitmesugustest müradest.

Resonaatoreid leidub ka meie hääleaparaadis. Hääleallikateks osutuvad hääleaparaadis häälepaelad. Need hakkavad võnkuma kopsudest tulevast õhust ja tekitavad häält, mille põhitoon sõltub nende pingest. See hääl on rikas ülemtoonidest. Kõri suurendab neid ülemtoone, millede võnkesagedus on lähedane tema omasagedusele. Edasi satuvad häälelained suuõõnde. Iga täishääliku jaoks on kindel suu hoiak ja sellest sõltuvalt kindel suuõõne kui resonaatori kuju.

124. Kõrva füüsika. Kõrv kujutab endast keerukat hääle vastuvõtuaparaati, mis töötab väga laias sageduste ja amplituudide diapasoonis (ulatuses). Häälelained langevad meie väliskõrvale — kõrvalestale, mis kujutab endast häälelaineid koguvat ruuporit.

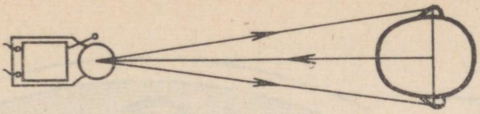


Joon. 227. Inimese kõrva ehitus.

Väliskuulmekäigu kaudu jõuavad häälelained trummikileni (1) (joon. 227), mis eraldab väliskõrva keskkõrvast. Lainete mõjul hakkab trummikile võnkuma, tehes sunnitud võnkumisi tajutava hääle sagedusega. Trummikile võnkumised antakse edasi luukeste süsteemile (2), milles on vasar, alasi ja jalus, sealt niinimetatud ovaalsele aknale (3), mis suleb pääsu labürindi siseõõnde. Kõrva labürint on selles osas, kus on mehhaanilisele ärritusele tundlikud kuuldenärvi otsad, täidetud erilise vedelikuga — lümfiga. Sees on membraan (4), s. o. niinimetatud põhimembraan (Corti[1] elund), mis koosneb mitmest tuhandest (umbes 4500) erineva pikkusega kiust, milledest igaüks on häälestatud teatud kindlale toonile.

Sisekõrva tulnud häälelained põhjustavad põhimembraani

[1] loe: korti.



Joon. 228. Kuulates kahe kõrvaga me võime alati pöörata pead nii, et vaatame hääleallika suunas.

nende kiudude võnkumist, millede sagedused vastavad kõrva tulnud laine sagedusele.

Sellest kuulmise taju kirjeldusest saab arusaadavaks see asjaolu, miks meie kõrv on võimeline eraldama lihttoone liithäälest, näiteks muusikalisest akordist.

Suur tähtsus on sellel, et meil pole üks, vaid kaks ühesugust kõrva. Selgub, et kahe kõrva abil me saame määrata suuna, kust hääl meieni tuli. Kui meil üks kõrvadest on suletud vatiga, siis me ei saa täpselt öelda, kustpoolt hääl tuleb. Kuulates kahe kõrvaga võime alati pöörata pea nii, et võime vaadata hääleallika suunas (joon. 228).

125. Heliülesvõte ja reprodutseerimine. Võimalus häält üles võtta (üles kirjutada) ja pärast seda reprodutseerida avastati juba 1877. aastal ameerika leiduri Edisoni poolt. Heliülesvõte tungis kiiresti meie ellu. Vähe leidub praegu inimesi, kes ei tunneks heli reprodutseerivaid aparaate — grammofoni[1] või nende portatiivset kuju — patefoni (kohvergrammofoni). Heliülesvõtte ja reprodutseerimise võimaluse tõttu on ilmunud helikino.

Muusikapalade, kõnede, juttude ja isegi tervete näidendite ülesvõte grammofoniplaatidele on kujunenud massiliseks ja on määratud kõige laiematele tarbijate hulkadele.

On olemas mitu heliülesvõtte süsteemi.

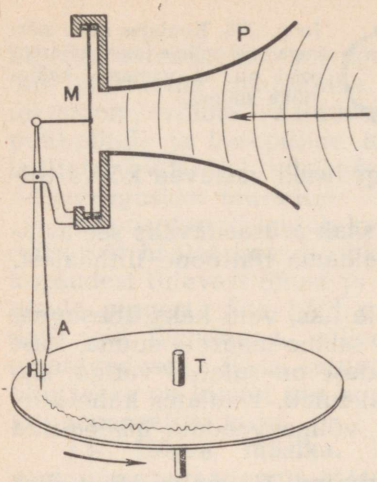
Nende hulgast on mehhaaniline süsteem, mille printsiibi avastas Edison, siiani jäänud põhiliseks süsteemiks. Ta on käinud ära pika arenemistee ja saavutanud tänapäeval suure täiuslikkuse. Tutvume selle ülesvõtte viisiga. Joonisel 229 on antud mehhaanilise heliülesvõtte seadise põhimõtteline skeem.

Häälelained satuvad hääleallikast (laulja, orkester jne.) ruuporisse *P*, millesse on kinnitatud õhuke elastne plaat *M*, mida nimetatakse membraaniks. Lainete mõjul hakkab membraan võnkuma. Membraani võnkumised antakse edasi temaga ühenduses olevale lõiketerale *A*, mis lõikab pöörlevale kettale *T* häälevao. Häälevagu pöörleb spiraali mööda ketta äärest tsentri poole.

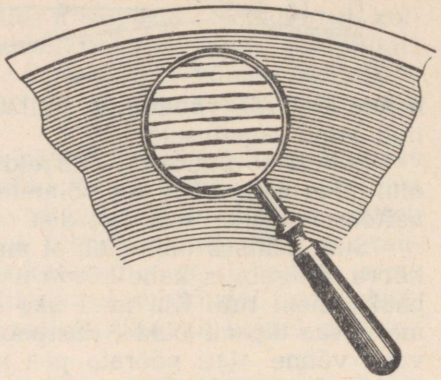
Joonisel 230 on näidatud plaadil olevat häälevagu (luubi abil on vaod päris selgesti nähtavad).

Ketas, kuhu tehakse heliülesvõte, valmistatakse spetsiaalselt pehmest materjalist, mis koosneb reast mineraalsetest, taimsetest ja loomsetest vahadest ning samuti teistest orgaanilistest ainetest. Vahakettalt tehakse galvanoplastilisel teel vaskkoopia (klišee), mille abil tehakse äratõmbed erilisest materjalist valmistatud plaatidele. Nii saadakse grammofoniplaadid.

[1] Grammofon — kreekak. sõnast *gramma* — üleskirjutis, *phōnē* — hääl.



Joon. 229. Hääle mehhaanilise ülesvõtte skeem.



Joon 230.

Heli reprodutseerimisel pannakse grammofoniplaadile nõel, mis on ühendatud grammofoni membraaniga, ja pannakse plaat pöörlema. Nõel, sattudes plaadi lainelisse vakku, hakkab võnkuma, temaga koos võngub ka membraan, mille võnkumised kaunis täpselt reprodutseerivad ülesvõetud heli.

Tänapäeval on laialt levinud magnetiline heliülesvõte, mida tehakse spetsiaalsete aparaatide (näiteks m a g n e t o f o n i d e) abil. Magnetiline heliülesvõte tõstis niivõrd heli reprodutseerimise kvaliteeti, et ta ületab praegu kõiki teisi viise.

Harjutus 54.

1. Järsust kaljust 200 m kaugusel seisev vaatleja teeb katkevalt häält. Missuguse aja tagant ta kuuleb kaja? Hääle levimiskiiruseks võtta $340 \frac{m}{s}$.

2. Kaks teineteisele järgnevat häält tajutakse erinevatena ainult sel juhul, kui nad on eraldatud ajavahemikuga mitte alla $\frac{1}{10}$ sekundi. Leida minimaalne kaugus kaja tekitavast tõkkest, mille puhul veel võib kuulda kaja. Hääle levimiskiiruseks võtta $340 \frac{m}{s}$.

3. Jahimees kuulis tema poolt lastud paugu kaja $4^1/_2$ sekundi pärast. Kui kaugel on peegeldav pind?

4. Määrata klaveri kõrgeima ja madalaima heli laine pikkused õhus 0° C juures.

5. Hääle levimiskiirus malmis määrati esmakordselt Pariisis järgmiselt. Veevärgi malmtorust lasti vesi välja. Toru ühes otsas löödi kella. Toru teises otsas kuulis vaatleja häält kaks korda: algul seda, mis tuli malmi mööda, ja $2^1/_2$ sekundi pärast teist, mis tuli õhku mööda. Toru pikkus oli 931 m. Leida nende andmete põhjal hääle kiirus malmis, kui kiirus õhus võtta $340 \frac{m}{s}$.

X PEATÜKK.

VEDELIKU JA GAASI LIIKUMINE.

126. Rõhk. Rõhumine. Kehade pinnale, näiteks anuma seintele vedelike ja gaaside poolt avaldatava mehhaanilise mõju iseloomustamiseks võetakse tarvitusele r õ h u mõiste. Vedelike ja gaaside mehhaanikas on rõhu mõiste üks põhilisemaid.

Rõhuks nimetatakse suurust, mida mõõdetakse pinnale mõjuva jõu ja selle pinnaosa suuruse suhtega.

Rõhumine, nagu iga teinegi jõud, on kehade vastastikuse mõju tulemus. Mis tahes juhul, nagu näiteks keha rõhumisel alusele (toele), vedeliku rõhumisel anuma seintele, õhu rõhumisel maapinnale, on meil tegemist kehade vastastikuse mõjuga.

Rõhumise jõud võib olla jaotunud pinnale ühtlaselt või ka mitteühtlaselt.

Ühtlase jaotumise puhul on pinna kõikides osades rõhk ühesugune. Sellisel juhul võib rõhku arvutada valemi $p = \frac{F}{S}$ abil, kus p — rõhk, F — rõhumisjõud (ehk lihtsalt rõhumine) ja S — pindala.

Kui näiteks hüdraulilise pressi kolvile, mille pindala on 50 cm^2, mõjub jõud 200 kG, siis igale ruutsentimeetrile mõjub 4 kG-line jõud ja rõhk $p = 4\ \frac{kG}{cm^2}$.

Rõhuühikuks võetakse niisugune rõhk, mille puhul ühele pindalaühikule mõjub üks jõuühik.

Võttes jõuühikuks 1 düün (dyn) ja pindalaühikuks 1 cm^2, saame rõhuühiku *CGS*-süsteemis: $1\ \frac{dyn}{cm^2}$ (1 baar). *SI*-süsteemis on rõhuühikuks njuuton ruutmeetri kohta $\left(\frac{N}{m^2}\right)$. Rõhuühikuks võetakse sagedasti n o r m a a l a t m o s f ä ä r (füüsikaline atmosfäär, mis on võrdne 760 mm elavhõbedasamba rõhuga 0° C juures). See on rõhumine, mida tekitab 760 mm kõrgune elavhõbedasammas 0° C juures 1 cm^2-le pinnale. See rõhk on arvuliselt võrdne 1 cm^2 ristlõikega elavhõbedasamba kaaluga.

Teades elavhõbeda erikaalu, mis on $13{,}6\frac{G}{cm^3}$, võime avaldada normaalatmosfääri järgmiselt:

$$76\ cm \cdot 13{,}6\frac{G}{cm^3} \approx 1033\frac{G}{cm^2} = 1{,}033\frac{kG}{cm^2} \approx 1 \cdot 10^5\frac{N}{m^2}.$$

Tehnikas võetakse harilikult rõhuühikuks täpselt $1 \frac{kG}{cm^2}$. Seda ühikut nimetatakse tehniliseks atmosfääriks.

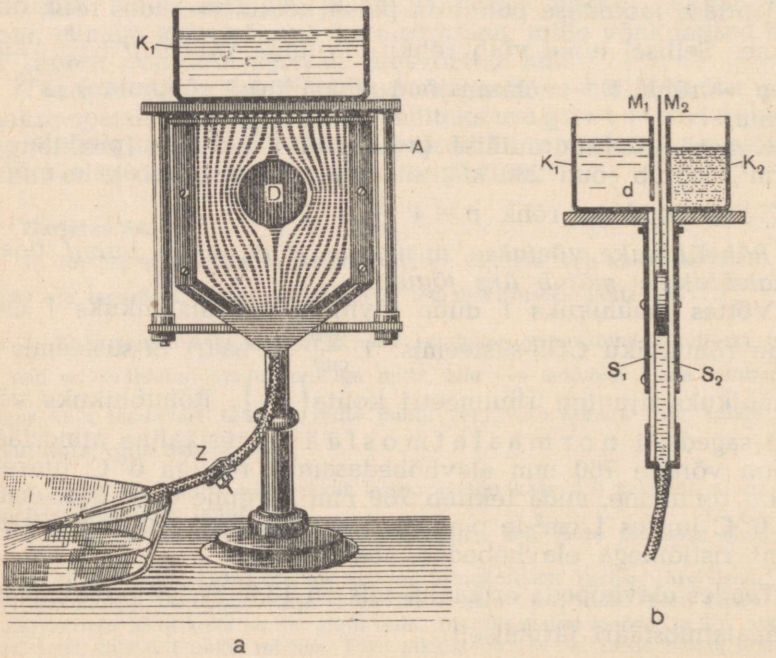
Teades rõhu suurust ja pinna suurust võime valemi $p = \frac{F}{S}$ abil leida kergesti rõhumise suuruse: $F = p \cdot S$.

127. Vedeliku liikumine. Mitmesuguste jõudude mõjul võivad vedelikud ja gaasid olla kas tasakaalus või liikuda. Vedeliku tasakaalu seadused on õpitud füüsika algkursuses, nüüd aga käsitleme mõnda nähtust, mis on seotud vedeliku liikumisega.

Vaatamata vedelike ja gaaside erinevusele on mõningad nende liikumise seadused ühised. See asjaolu on väga tähtis sellepärast, et vedelike liikumist on kergem teha nähtavaks ja seega on ta kergemini uuritav kui gaaside liikumine.

Vedelike liikumise uurimiseks kasutatakse spetsiaalseid riistu. Joonisel 231 *a* on kujutatud selle riista välimus eest, kuid joonisel 231 *b* küljelt.

Riist koosneb lamedast klaasnõust *A* (joon. 231 *a*), mis on tehtud kahest klaasplaadist S_1 ja S_2 (joon. 231 *b*), millede kaugus teineteisest on umbes 1 mm. Nendele plaatidele ülaltpoolt on tihedalt pandud plaadid M_1 ja M_2, millede juurde on tehtud kamb-



Joon. 231. Vedeliku liikumise demonstreerimise riist:
a — eestvaade, *b* — külgvaade.

rid K_1 ja K_2. Iga kamber on ühenduses plaatidevahelise ruumiga plaatidesse M_1 ja M_2 puuritud aukude rea abil. (Üks selline auk d on näidatud plaadil M_1.) Plaatide augud on üksteise suhtes nihutatud.

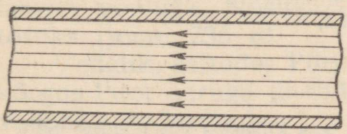
Kambrisse K_1 valatakse puhas vesi, kuid kambrisse K_2 tindiga värvitud vesi.

Katse algul on veepind kambris K_1 veidi kõrgemal kui kambris K_2. Kui avada surukraan (näpits) Z, mis suleb vee väljalaske kummitoru (joon. 231 *a*), siis klaasplaatide S_1 ja S_2 vahele voolab esialgu puhas vesi kambrist K_1. Niipea aga, kui veenivood saavad kambrites võrdseteks, hakkab riistasse tungima peenikeste jugadena (niredena) värvitud vesi. Need nired moodustavad jooned, mida nimetatakse v o o l u j o o n t e k s.

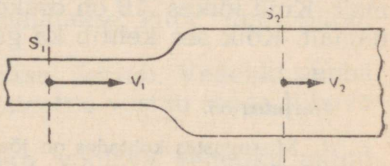
Kui asetatada plaatide S_1 ja S_2 vahele ümmargune ketas D, mis kujutab kera või silindri lõiget (profiili), siis võime vaadelda voolujoonte pilti selle keha ümber.

Selline pilt on kujutatud joonisel 231 *a*.

Voolujoonte abil võib graafiliselt kujutada vedeliku voolamise kiirust. Nendes kohtades, kus kiirus on suurem, tõmmatakse voolujooni tihedamalt ja ümberpöördult, seal, kus kiirus on väiksem, tõmmatakse voolujooni hõredamalt.



Joon. 232. Ühtlases torus on voolujooned paralleelsed ja ühtlase tihedusega.



Joon. 233. Vedeliku osade kiirused on statsionaarse voolamise juures pöördvõrdelised toru ristlõikega.

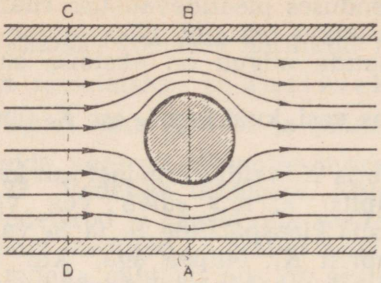
128. Vedeliku statsionaarne voolamine. Kui mööda toru voolab vedelik katkestamatu joana, siis toru mistahes ristlõike läbib igal ajamomendil ühesuurune hulk vedelikku. Niisugust vedeliku voolamist nimetatakse s t a t s i o n a a r s e k s[1].

Statsionaarne voolamine võib ette tulla jõgedes, veevärgi torudes või vee voolamisel suurest reservuaarist.

Ühesuguse läbilõikega torus on vedeliku osakeste kiirused kogu toru ulatuses ühesuurused (hõõrde puudumisel); seepärast on voolujooned üksteisega paralleelsed ja on jaotatud igal pool ühesuguse tihedusega (joon. 232). Vedeliku voolamisel mööda mitteühtlast toru (läbilõiked pole võrdsed) on kiirused erinevad.

Tähistame toru lõikes S_1 vedeliku voolamise kiiruse v_1-ga ja lõikes S_2 — v_2-ga (joon. 233).

[1] S t a t s i o n a a r n e — lad. k. *stationarius* — püsiv, muutumatu.



Joon. 234. Voolujooned silindri juures.

Statsionaarse voolamise korral on veehulk, mis on ühes sekundis läbinud lõike S_1 võrdne veehulgaga, mis sama aja jooksul on läbinud sama toru lõike S_2. Seepärast võime kirjutada:

$S_1v_1 = S_2v_2$, millest järgneb, et $\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}$, s. o.

statsionaarse liikumise juures on vedeliku osakeste kiirused pöördvõrdelised toru ristlõike pindaladega.

Joonisel 234 on näidatud, kuidas voolab vedelik silindri ümber. Kohtumisel silindriga voolujooned painduvad. Lõikes *CD* on vedeliku osade kiirus väiksem ja voolujooni on siin hõredamalt. Kuid lõikes *AB* on osakeste kiirused suuremad ja jooni tihedamalt. Kõik see kehtib ka gaaside kohta.

Harjutus 55.

1. Missugustes kohtades on jõe vool kiirem, kas kitsastes või laiades? Seletage, mispärast.
2. Missuguste tunnuste järgi võib lugeda veevoolu jões statsionaarseks? Kas see on alati nii?
3. Mispärast ei saa pärast etendust teatrist või kinost väljuvat inimeste voolu lugeda statsionaarseks?

129. Rõhk liikuvas vedelikus. Voolavas vedelikus eraldatakse staatilist ja dünaamilist rõhku. Staatilise rõhu põhjuseks voolavas vedelikus on samuti nagu seisvas vedelikuski tema kokkusurutus. Staatiline rõhk avaldub vedeliku surves toru seintele, milles vedelik voolab.

Dünaamiline rõhk on tingitud vedeliku voolamise kiirusest. Et veenduda selles, on tarvis vedelikku pidurdada. Sel korral avaldub dünaamiline rõhk nagu staatilinegi survena.

Staatilise ja dünaamilise rõhu summat nimetatakse kogurõhuks.

Seisvas vedelikus on dünaamiline rõhk null, järelikult on staatiline rõhk võrdne kogurõhuga. Seda võib antud olukorras mõõta manomeetri abil.

Staatilise rõhu mõõtmine liikuvas vedelikus on seotud rea raskustega. Asi seisab nimelt selles, et manomeeter, mis asetatakse

liikuvasse vedelikku staatilise rõhu mõõtmiseks, muudab vedeliku liikumise kiirust selles kohas, kuhu ta asetatakse. Sellega koos muutub muidugi ka mõõdetava staatilise rõhu suurus. Selleks et vedelikku paigutatud manomeeter ei muudaks vedeliku kiirust, peab ta liikuma koos vedelikuga, samas suunas ja sama kiirusega. Kuid selliselt staatilist rõhku mõõta on äärmiselt ebamugav ning tülikas. Nendest raskustest saame üle, kui anname mõõduriistale niisuguse kuju, mille juures vedeliku liikumise kiirus peaaegu ei muutu.

Joonisel 235 on kujutatud niisugune mõõteriist. See kujutab endast kitsast, ümardatud otsaga toru, mille külgedesse on tehtud avaused. Rõhu mõõtmiseks asetatakse toru vedelikku nii, et ta oleks paralleelselt voolujoontega. Niisugust mõõduriista nimetatakse s o n d i k s. Vedeliku osakesed, liikudes niisuguse riista läheduses, ei muuda oma liikumise kiirust. Sond ühendatakse manomeetriga.

Praktikas kasutatakse liikuva vedeliku staatilise rõhu mõõtmiseks peenikesetorulisi manomeetreid. Sel korral asetatakse toru lahtine ots paralleelselt vooluga. Kui vedelik on mingi rõhu all, siis tõuseb ta manomeetri torus kõrgusele, mis määrab rõhu suuruse.

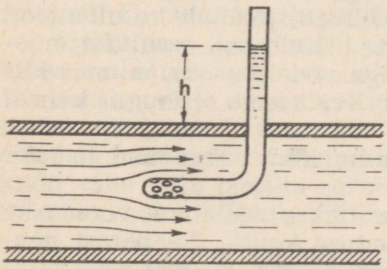
Kogurõhku mõõdetakse toru abil, mille ava on perpendikulaarne vooluga. Niisugust riista nimetatakse Pitot' (loe: pitoo) toruks (joon. 235 *a*).

Vedelik, sattudes Pitot' toru avausse, peatub. Vedelikusamba kõrgus Pitot' toruga ühendatud manomeetris vastab seega liikuva vedeliku kogurõhule.

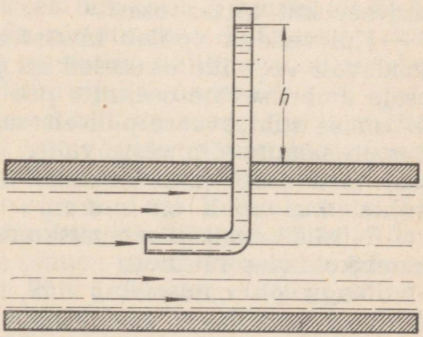
Selleks et leida dünaamilist rõhku voolava vedeliku antud kohas, tuleb kogurõhust lahutada staatiline rõhk:

$$h_{\text{dün.}} = h_{\text{kogu.}} - h_{\text{staat.}}$$

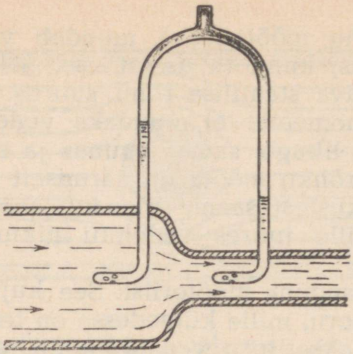
Edaspidi tuleb meil tegelda ainult staatilise rõhuga, lihtsuse mõttes nimetame seda lihtsalt rõhuks vedelikus.



Joon. 235. Staatilise rõhu mõõtmine liikuvas vedelikus.



Joon. 235 *a*.



Joon. 236. Liikuva vedeliku rõhk on kanali kitsamas osas väiksem kui laiemas osas.

Kui mõõta liikuvas vedelikus rõhku mitteühtlase toru mitmesugustes osades (joon. 236), siis selgub, et *rõhk kitsamas toru osas on väiksem rõhust jämedamas osas.*

Kuna vedeliku kiirused on pöördvõrdelised ristlõigete pindaladega, siis järelikult sõltub liikuva vedeliku rõhk vedeliku kiirusest. **Nendes kohtades, kus vedelik liigub kiiremini (toru kitsad kohad), on rõhk väiksem kui seal, kus vedelik liigub aeglasemalt (toru jämedamad kohad).**

Seda katsest selgunud tõsiasja võib seletada mehhaanika üldiste seaduste alusel.

Oletame, et vedelik läheb toru jämedamast kohast kitsamasse. Vedeliku osakesed seejuures suurendavad kiirust, s. o. nad liiguvad kiirendustega liikumise suunas. Hõõret mitte arvestades võime kinnitada Newtoni teise seaduse alusel, et igale osakesele mõjuvate jõudude resultant on samuti suunatud vedeliku liikumise suunas. Kuid see resultantjõud tekib nende jõudude vahena, millega mõjuvad igale antud osakesele ümbritsevad vedeliku osad, ja ta on suunatud ettepoole, vedeliku liikumise suunas.

Tähendab, tagant mõjub osakesele suurem rõhumine kui eestpoolt. Seega, nagu näitas katsegi, on rõhk toru jämedamas osas suurem kui kitsas osas.

Kui vedelik voolab kitsast toru osast jämedamasse, siis arusaadavalt vedeliku osakesed sel juhul pidurduvad. Igale vedeliku osale ümbritsevate osakeste poolt mõjuvate jõudude resultant on liikumise suhtes vastupidiselt suunatud. Kuid see resultant moodustub samuti rõhumiste vahest. Seega vedeliku osa, minnes kitsast toru osast jämedamasse, liigub väiksema rõhuga kohast kohta, kus rõhk on suurem.

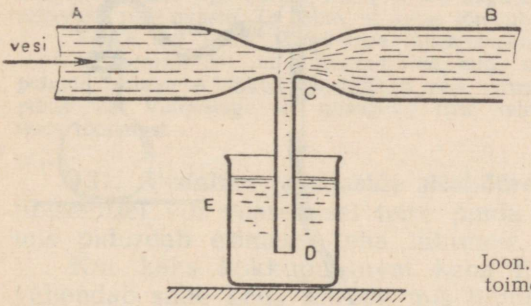
Niisiis **kanali kitsenemiskohtades on rõhk vähenenud ja laienemiskohtades tõusnud.**

Nagu oli näidatud § 127, kujutatakse vedeliku voolamise kiirused graafiliselt voolujoonte tiheduse kaudu. Seepärast nendes vedeliku statsionaarse voolamise kohtades, kus rõhk on väiksem, on voolujooni tihedamalt ja, ümberpöördult, kus rõhk on suurem, on voolujooni hõredamalt.

130. Vedelikujoa imev toime ja selle praktiline kasutamine. Ahendades mingis kohas toru, mida mööda voolab vedelik või gaas, võime teha selles kohas rõhu atmosfääri rõhust palju väiksemaks. Seejuures saadud imevjõudu võib kasutada tehnikas mõnede riistade ehituse juures.

Selliste riistade töötamise põhimõttest annab kujutluse joonisel 237 kujutatud seadis.

Klaastorule *AB* on kitsamas kohas külge joodetud manomeetritoruke *CD*, mille vaba ots on lastud nõus *E* olevasse värvitud vette. Ühendades toru *AB* veevärgiga saame temas vedeliku voolu. Vedeliku voolamise teatud kiiruse juures saab rõhk kitsas torus *AB* atmosfääri rõhust väiksemaks. Värvitud vesi tõuseb seejuures anumast *E* toru *CD* mööda ja ühineb toru *AB* mööda voolava veega.



Joon. 237. Seadis vedelikujoa imeva toime demonstreerimiseks.

Voolu imev toime leiab rakendamist karburaatorites, s. o. riistades, mis toidavad sisepõlemismootoreid küttesegu ga (mootorite ehitust vaadeldakse § 208). Karburaatori ehitus on kujutatud joonisel 238 *a*.

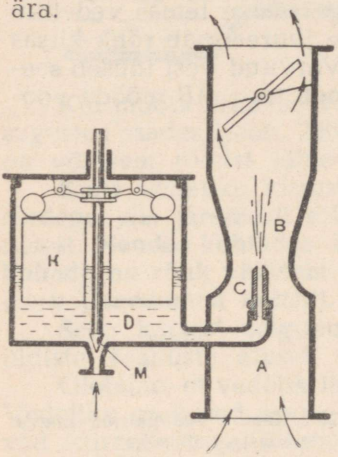
Kolvi sisseimeva käigu ajal tuleb õhk toru *A* kaudu alt üles. Sellel torul on kitsam koht, mida nimetatakse difuusoriks (segukoonuseks). Difuusorisse on asetatud kalibreeritud toruke (pihusti) *C*, mille kaudu tuleb bensiin ujukiruumist *D*[1].

Ujukiruum ja pihusti on ühendatud anumad. Kui bensiini nivoo on ujukiruumis madalamal või võrdne pihusti kõrgusega, siis bensiin välja ei voola. Kui aga õhk voolab läbi difuusori, siis rõhk pihusti ümber väheneb, tekib ujukiruumi ja difuusori rõhkude vahe (ujukiruumis on rõhk üks atmosfäär). Rõhkude vahe tõttu bensiin surutakse pihusti kaudu välja ja ta pihustub õhuvoolus. Tekib küttesegu, mis imetakse mootori silind-

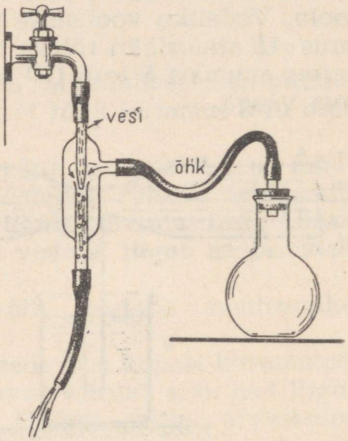
[1] Pange tähele ujukiruumi ehitust. Mida kõrgem on selles ruumis bensiini nivoo, seda kõrgemale tõuseb ujuk *K* ja seda madalamale langeb nõel *M*, mis suleb ava, mille kaudu tuleb bensiin ujukiruumi. Niiviisi reguleeritakse automaatselt bensiini nivood ujukiruumis.

risse. (Klapp reguleerib küttesegu voolu silndrisse.) Sellest, missugused protsessid tekivad mootoris, räägitakse § 208.

Joonisel 238 *b* on kujutatud veejoa-hõrenduspumba skeem, kus samuti kasutatakse veevoolu imevat toimet. Veevärgi vesi voolab läbi toru kitsama osa, kus ta liikumise kiirus tugevasti kasvab, mille tagajärjel rõhk saab atmosfääri rõhust väiksemaks. Selle tõttu reservuaariga ühenduses oleva toru kaudu imetakse õhku niikaua, kui rõhk reservuaaris saab võrdseks rõhuga toru kitsamas osas. Reservuaarist väljaimetud õhk viiakse veevooluga ära.



Joon. 238 *a*. Karburaatori ehitus.



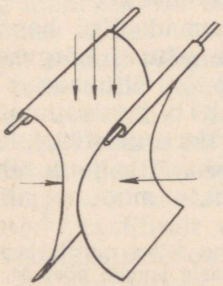
Joon. 238 *b*. Veejoa-hõrenduspumba skeem.

Harjutus 56.

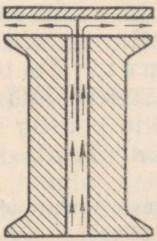
1. Riputage üles kaks veega täidetud konservipurki pikkade niitide abil 1—2 cm kaugusele teineteisest. Siis puhuge kõvasti õhku purkide vahelt. Purgid tõmbuvad teineteise poole. Seletage seda nähtust.

2. Võtke kaks neljanurgelist paksu paberi tükki, keerake neid nii, nagu näidatud joonisel 239, ja riputage nad sukavarraste külge. Puhuge ülevalt õhku nende vahele. Paberitükid lähenevad teineteisele.

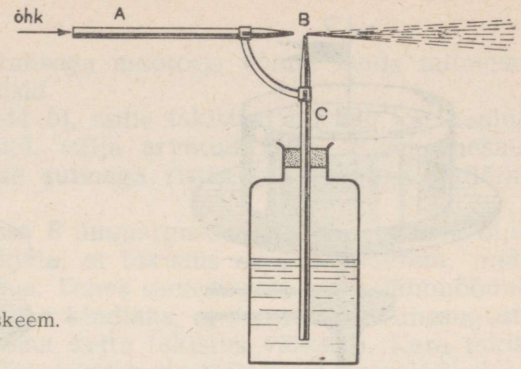
Tehke see katse ja seletage tähelepandud nähtust.



Joon. 239. Ülesande 2 juurde.



Joon. 240. Ülesande 3 juurde.



Joon. 241. Pulverisaatori skeem.

3. Valmistage papist väike kerge ketas. Ketta keskpunktist pistke läbi nööpnõel. Lähendage kettale niidirull nii, nagu näidatud joonisel 240, ja puhuge tugevasti rulli avasse. Te näete, et ketas tõmbub rulli poole.

Tehke see katse ja seletage tähelepandud nähtust.

4. Joonisel 241 on kujutatud riist, mida nimetatakse pulverisaatoriks. Kui puhuda torusse *A* õhku, siis hakkab vesi torus *CB* tõusma ja torust väljudes pihustuma. Valmistage ise niisugune riist, tehke temaga katseid ja seletage tema töötamist.

131. Vedelike ja gaaside sisehõõre. Me teame, et ühe keha libisemisel või veeremisel teise pinda mööda tekib hõõrdejõud, mis pidurdab esimese keha liikumist.

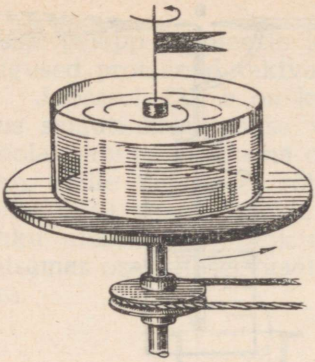
Kui kaks kokkupuutuvat keha liiguvad, siis hõõrdejõud vähendab selle keha kiirust, mis liigub kiiremini, ja suurendab teise keha kiirust, mis liigub aeglasemalt.

Katse abil võib veenduda, et teineteise suhtes liikuvate gaasi kui ka vedeliku kihtide vahel tekivad samuti jõud, mis aeglustavad ühtede kihtide ja kiirendavad teiste kihtide liikumist. Neid jõude nimetatakse *sisehõõrde-* ehk *püdeluse-* (*viskoossuse*) *jõududeks*.

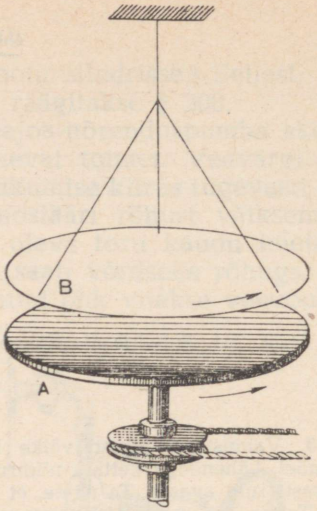
Vedeliku sisehõõret võib näha joonisel 242 kujutatud seadme abil. Laia anumasse valatud vee pinnal ujub väike puuketas lipukesega. Kui panna anum pöörlema, siis mõne aja pärast hakkab sisehõõrde tõttu pöörlema ka lipukesega ketas. Anuma seismajäämisel ketas jätkab liikumist, kuid vedelikus olevad sisehõõrdejõud vähendavad järk-järgult tema kiirust kuni täieliku seismajäämiseni.

Analoogilisel viisil võib kindlaks teha sisehõõrde olemasolu gaasides (vaata joon. 243). Kui panna pöörlema ketas *A*, siis varsti hakkab pöörlema ka ülemine paigalseisev ketas *B*.

Pöörlev ketas tõmbab endaga kaasa pöörlema pinnalähedase õhukihi, mis gaasi sisehõõrde tõttu paneb liikuma kaugemad gaasi kihid. Niiviisi antakse liikumine järk-järgult edasi kihilt kihile ja lõpuks haaratakse kaasa ülemine ketas ning pannakse see liikuma.



Joon. 242. Vedeliku sisehõõrde demonstreerimine.



Joon. 243. Gaaside sisehõõrde demonstreerimine.

Harjutus 57.

1. Missugustes toru osades voolab vesi suurima ja missugustes väikseima kiirusega?
2. Kus on jõe vool kiirem, kas kalda ääres või jõe keskel? Kas veepinna läheduses või sügavuses?
Seletage, mispärast.
3. Missugune vedelikest on püdelam (viskoossem), kas vesi või glütseriin? Vastust põhjendage.

132. Keha liikumise takistus vedelikus ja gaasis. Kogemustest teame, et kui keha liigub vedelikus, siis vedelik pidurdab seda liikumist. Järelikult tekib seejuures keha liikumist takistav jõud. Kui näiteks vaikse järve kaldalt tõugata vette lootsik, siis ta liigub inertsi tõttu teatud kaugusele ja jääb seisma. Lootsikule mõjuv vee takistus paneb ta seisma. Samal määral kehtib see keha liikumise kohta gaasis, näiteks auto, jalgratta, lennuki ja teiste kehade liikumise kohta õhus.

Viimasel juhul nimetatakse keha liikumist takistavat jõudu aerodünaamiliseks takistuseks (õhutakistuseks).

On kindlaks tehtud, et aerodünaamiline takistus ei sõltu sellest, kas liigub keha õhus või, vastupidi, seisab keha ja liigub õhk.

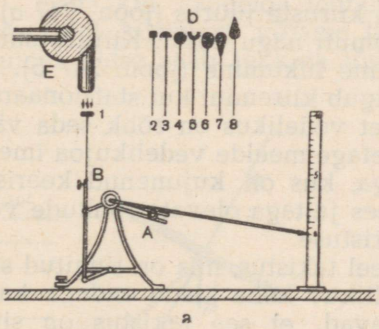
Selgitame, millest sõltub aerodünaamiline takistus. Selleks kasutame joonisel 244 kujutatud seadet. Meie seade põhiliseks osaks on spetsiaalse konstruktsiooniga aerodnüaamilised kaalud. Kaalu vardal *B* on pesa, millesse asetatakse mitmesuguse kuju ja suurusega kehad. Kaalu osuti seadmine nullile katse algul toimub koormuse *A* nihutamisega. Õhu liikumist tekitatakse erilise elektriventilaatoriga *E*.

Voolutugevuse muutmisega mootoris võime saada mitmesuguse kiirusega õhuvoolusid.

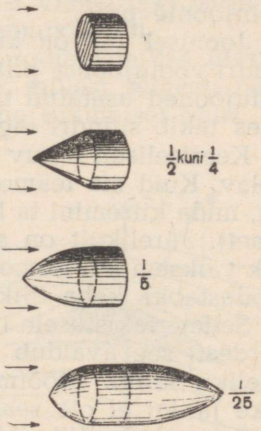
Kehad 1—8 (joon. 244 *b*), mille takistust uurime, on kaalult võrdsed. Kõikidel kehadel, välja arvatud keha 2, on ühesuurune frontlõige (liikumise suunaga ristiseisva suurima ristlõike pindala).

Kinnitades kaalu pessa *B* ümmarguse ketta 1 ja muutes õhuvoolu kiirust, võime näidata, et takistus on seda suurem, mida suurem on õhuvoolu kiirus. Tehes samasuguse katse läbimõõdult väiksema kettaga, me teeme kindlaks, et õhuvoolude ühesuguste kiiruste juures on väiksema ketta takistus väiksem. Kera takistus on väiksem kui kettal, vaatamata sellele, et frontlõiked on ühesuurused. Eriti suur on poolkera takistus, kui õõnes pool on pööratud vastu liikumissuunda. Sellepärast kasutatakse poolkera kuju langevarjude juures.

Kõik need katsed lubavad teha järelduse, et aerodünaamiline takistus sõltub õhu kiirusest keha suhtes, keha kujust ja frontlõike suurusest.



Joon. 244. Aerodünaamilised kaalud.



Joon. 245. Keha kuju mõju aerodünaamilise takistuse suurusele.

Keha kuju mõju aerodünaamilisele takistusele on näitlikult toodud joonisel 245. Ühikuks on võetud silindri takistus. Kui panna silindrile koonusekujuline osa juurde, siis väheneb takistus sõltuvalt koonuse nurgast $^1/_2$ kuni $^1/_4$-ni. Granaadikujulise osa lisamine viib takistuse kuni $^1/_5$-ni. Kui lõpuks anda kehale langeva tilga või kala kuju, siis väheneb takistus kuni $^1/_{25}$-ni.

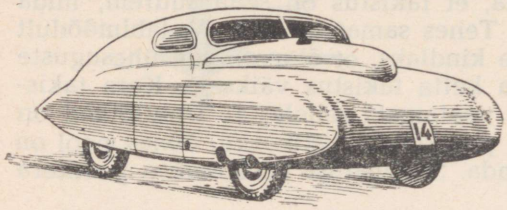
133. Kehade voolujoonelisus. Kõige voolujoonelisemaks kehaks on see keha, millel antud frontlõike juures on kõige väiksem takistus.

Keha, mis on eestpoolt ümarik ja tagantpoolt teravam, võimalikult sile ja mõhkadeta, osutub kujult kõige voolujoonelisemaks.

Niisugune kuju antakse õhulaevadele, allveelaevadele, torpeedodele, võidusõiduautodele, lennuki kerele ja tiibadele ning laeva veealustele osadele.

Joonisel 246 on kujutatud voolujooneline auto.

Selgitame nüüd, missugustest füüsikalistest protsessidest on tingitud voolujoonelise keha takistuse vähenemine.



Joon. 246. Voolujooneline võidusõiduauto.

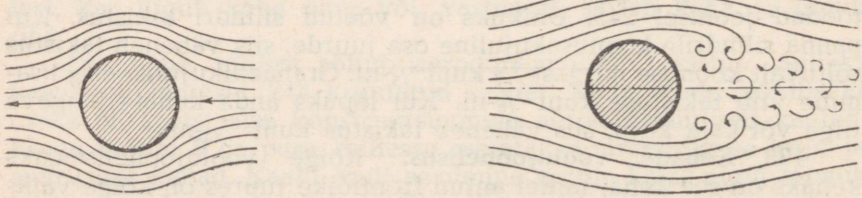
Selleks asetame vedeliku voolu mitmesuguse kujuga kehad. Muutes voolu kiirust, võime vaadelda kehade ümber tekkinud voolujoonte pilte.

Joonisel 247 on kujutatud erinevate kiiruste juures saadud silindri voolujoonte pilt. Väikeste kiiruste juures (joon. 247 *a*) on voolujooned asetatud tagapool samuti nagu eeski. Kiiruse suurenedes tekib silindri taga keeriseline liikumine (joon. 247 *b*).

Keeriselt liikuv vedelik liigub kiiremini kui statsionaarselt voolav. Kuid me teame (§ 130), et vedelikus on rõhk seda väiksem, mida kiiremini ta liigub (tuletage meelde vedelikujoa imevat toimet). Järelikult on silindri taga, kus on kujunenud keerised, rõhk väiksem kui eespool. Keha ees ja taga olevate rõhkude vahe moodustabki keha liikumise takistuse.

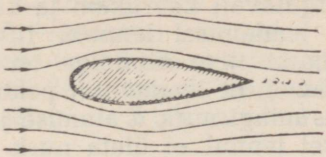
Sellele takistusele lisandub veel takistus, mis on tingitud sisehõõrdest; see avaldub selles, et liikuv keha kisub endaga kaasa vedeliku kihid. Mõõtmised näitavad, et see takistus on siiski väike ja tal ei ole seetõttu olulist tähtsust.

Seega *keha liikumisel vedelikus on takistuse peamiseks põhjuseks keha taha tekkivad keerised.* Seepärast on selle takistuse vähendamiseks tarvis kehale anda niisugune kuju, mille puhul tekib kõige vähem keeriseid.



Joon. 247. Vedeliku voolamine silindri ümber:
a — väikeste kiiruste puhul on voolujooned tagapool asetatud samuti nagu eeski,
b — kiiruse suurenedes tekib silindri taga keeriseline liikumine.

Joon. 248. Voolujoonelise keha puhul peaaegu ei teki keeriseid.



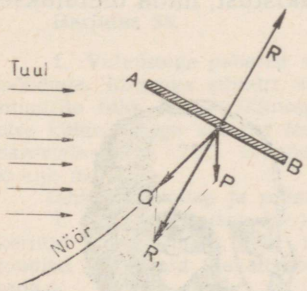
Voolujoonelisel kehal on sellepärast väike takistus, et vedelik igal pool hoidub keha ligi ja ei tekita tagapool keerisliikumist. Joonisel 248 on kujutatud voolujoonelise keha voolujoonte pilt. Sellise keha taha peaaegu ei tekigi keeriseid.

134. Aerodünaamiline üleslüke. Kehade liikumisel õhus tekib peale õhutakistuse veel teisi jõudusid. Erilist tähtsust omab aerodünaamiline üleslüke.

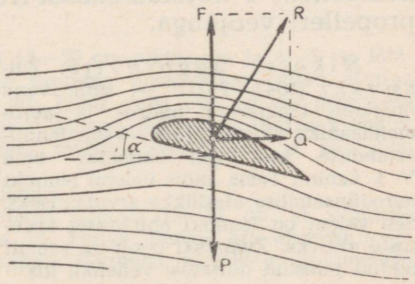
Lind liugleb vabalt õhus. Surnuks lastuna aga kukub ta kui kivi alla. Mispärast? Missugune jõud hoiab lindu õhus?

See küsimus on juba iidsest ajast peale huvitanud inimest. Inimesed on ammu unistanud kunstlikest tiibadest, mis võimaldaksid lühikese ajaga läbida suuri kaugusi. Ometi läks palju aega, enne kui see unistus leidis kehastuse lennuki näol.

Enne kui vaadelda lennuki tiiva aerodünaamilise üleslükke (tõstejõu) küsimust, võtame lihtsa näite, millest selgesti nähtub, kuidas üldse saab tekkida tõstejõud keha liikumisel õhus. Vaat-



Joon. 249. Paberlohele *AB* mõjuvad jõud.

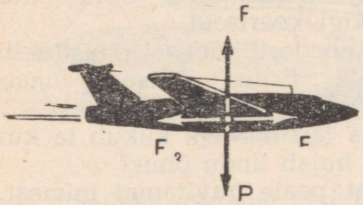


Joon. 250. Üleslükke tekkimine lennuki tiival.

leme, missugused jõud mõjuvad tuule käes nööri otsas hoitavale lohele (joon. 249). Õhuvool, põrgates lohe pinnalt *AB*, mõjub temale jõuga *R*. Peale selle mõjub lohele raskusjõud *P* ja nööri pinge *Q*, millede resultandiks on R_1. Jõudude *R* ja R_1 võrdsuse puhul seisab lohe õhus. Kui aga jõud *R* on suurem kui R_1, siis hakkab lohe tõusma. Seega kallutab õhulohe horisontaalse õhuvoolu kaldu allapoole, saab ise aga seejuures õhuvoolult tõuke üles, mis võimaldabki tal lennata.

Märgatavalt keerukam ja ka teistsugune kui lohega on lugu lennuki lendamisel lennuki tiivale mõjuva jõuga.

Lennuki tiiva läbilõige on näidatud joonisel 250. Praktika on näidanud, et lendamisel peab lennuki tiib olema asetatud nii, et tekiks mingi nurk α alumise joone ja lennusuuna vahel[1] (horisontaalsel lennul ei ületa nurk 1—1,5°, maandumisel on umbes 15°). Selgub, et sellise nurga olemasolu tõttu on tiiva ümber voolaval õhul kiirus tiiva peal suurem kui tiiva all (joon. 250 on kiiruste vahe kujutatud voolujoonte tiheduse vahega).



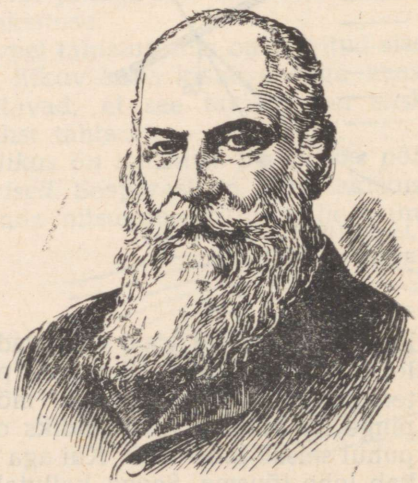
Joon. 251. Ühtlase, horisontaalse lennu puhul lennukile mõjuvad jõud.

§ 129 aga näidati, et voolu selles kohas, kus kiirus on suurem, on ka rõhk väiksem ja ümberpöördult. Sellepärast on lennuki liikumisel õhus rõhk tiiva ülemisel pinnal vähendatud ja tiiva alumisel — suurendatud. See rõhkude vahe ongi jõud R, mis mõjub tiivale alt üles (joon. 250). Selle jõu vertikaalne komponent F annab tõstejõu, mis on suunatud vastupidiselt kaalu P suhtes. Kui see jõud on lennuki kaalust suurem, siis hakkab lennuk tõusma. Teine komponent Q kujutab endast frontaalset takistust, mida ületatakse propelleri veojõuga.

Nikolai Jegorovitš Žukovski (1847—1921) — suur vene õpetlane, tänapäeva hüdro- ja aeromehhaanika aluste rajaja, «vene lennuasjanduse isa» (nii nimetas teda V. I. Lenin). Tema andis valemi lennuki aerodünaamilise üleslükke arvutamiseks. See valem on lennuki ehitamisel arvutuste aluseks. Žukovski poolt on samuti tehtud tähtsaid uurimusi vedelike liikumiste seaduspärasuse alal. Need seaduspärasused on leidnud laialdast praktilist rakendamist.

Juba lennuasjanduse arenemise algpäevil ütles Žukovski: «Inimesel ei ole tiibu ja lihaste kaalu ning kogukaalu suhte poolest on ta 72 korda nõrgem linnust. Kuid ma arvan, et ta hakkab lendama, toetudes mitte oma musklitele, vaid oma mõistuse jõule.»

Ei läinud kuigi palju aega ja need prohvetlikud sõnad tõestusid.



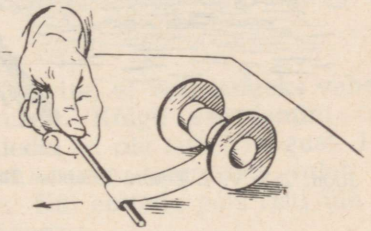
[1] See nurk muutub kõrgusrooli toimel.

Joonisel 251 on kujutatud jõud, mis mõjuvad lennukile ühtlase horisontaalse lennu juures: F_1 — tõstejõud, P — lennuki kaal, F_2 — lennuki frontaaltakistus ja F — mootori veojõud.

Lennuki konstrueerimine ja lennuomaduste arvestused toimuvad aerodünaamilise teooria alusel. Selle teooria väljatöötamisel on tähtis osa meie kuulsal õpetlasel N. J. Žukovskil ja tema õpilastel.

Meie maa on palju teinud lennuasjanduse arendamise alal. Esimese lennuki ehitas vene ohvitser A. F. Možaiski. Ülemaailmne prioriteet paljude lennuasjanduse saavutuste alal kuulub ka tänapäeval meie maale.

Suur on lennuasjanduse tähtsus ka maa majanduslikus elus. Sajad ja tuhanded lennukid lendavad meie maal, ühendades kõige kaugemaid kodumaa nurki, pidades sidet majanduslike ja kultuurikeskustega ja vedades kaupu ning reisijaid.



Joon. 252. Ülesande 1 juurde.

Harjutus 58.

1. Valmistage paberist väike silinder 15—20 cm pikkusega ja 4—5 cm läbimõõduga. Kleepige silindri otstesse natuke suurema diameetriga kettad. Kerige silindrile tükk linti (pikkusega 0,5—0,75 m). Lindi vaba ots siduge pulgakese otsa külge. Pange silinder lauale ja tõmmake kiiresti pulgakese otsaga vasakult paremale (joon. 252). Silinder veereb lauda mööda, lendab üles ja siis juba kukub maha.

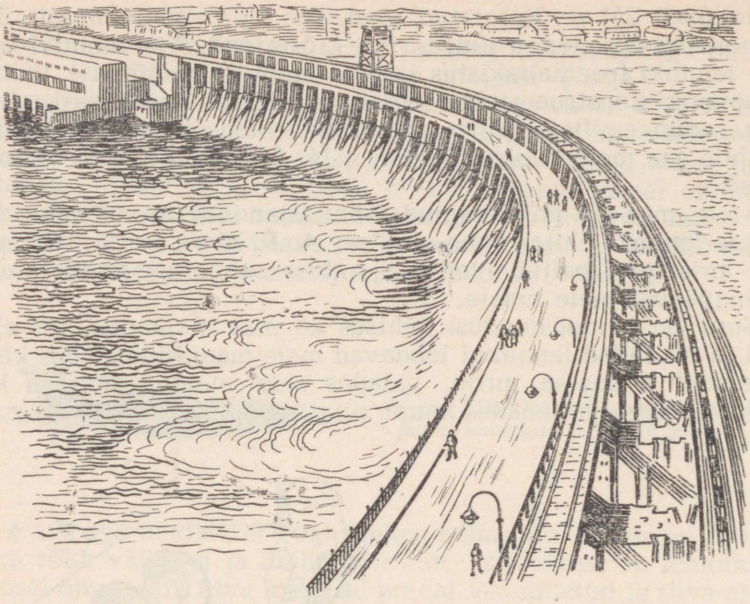
Tehke see katse ja seletage silindri lendu.

2. Pange eelmises harjutuses kirjeldatud silinder lauale nii, et silindrile keritud lint silindri järsu tõmbe juures ei keriks temast ära altpoolt nagu joonisel 252, vaid ülevaltpoolt. Jälgige silindri liikumist, kirjeldage ja seletage seda.

135. Voolava vee energia kasutamine. Juba palju aastatuhandeid kasutab inimkond liikuva vee energiat väga mitmesugusteks ülesanneteks.

Vee-energia varud Maa peal on hiiglasuured. Eelarvestuste kohaselt on juba Nõukogude Liidu hüdroenergia ressursid üksi 300 miljonit kilovatti, mis elektrienergiale üle minnes võib anda vähemalt 2000 miljardit kilovatt-tundi aastas.

Hiiglaslik «vee ringkäik» toimub päikese kiirguse tõttu. Järvede, merede ja ookeanide vesi aurustudes tõuseb üles, moodustab pilved, milledest ta vihma ja lume kujul maapinnale langedes moo-



Joon. 253. V. I. Lenini nimelise Dnepri hüdroelektrijaama pais.

dustab ojad ja jõed, kust vesi meredesse ja ookeanidesse voolates uuesti aurustub. Iga mägioja, iga jõgi moodustab energiaallika, mida võib nii või teisiti ära kasutada.

Vaatamata sellele, et vee-energia varud on hiiglaslikud ja et inimesed kasutavad seda juba kaua, on ainult viimasel ajal vee-energia saanud tööstuses suure tähtsuse ning talle on antud «valge söe» nimetus. Eriti suurt tähelepanu omistatakse «valge söe» energia kasutamise probleemidele Nõukogude Liidus.

Nõukogude Liit seadis energeetika alal esmaseks ülesandeks «valge söe» energia maksimaalse ärakasutamise. Ehitati ja ehitatakse võimsaid elektrijaamu, võimsusega kümned ja sajad tuhanded ning isegi miljonid kilovatid. Tänu meie maa sotsialistlikule korrale lahendatakse see ülesanne edukalt. Juba käesoleval ajal töötab meil rida suuri hüdroelektrijaamu, milledest vanemaks on V. I. Lenini nimeline Dnepri hüdroelektrijaam 648 000 kW võimsusega. 1952. aastal lasti Donil käiku Tsimljanski hüdroelektrijaam võimsusega 160 000 kW. Lõpetatud on maailma suurimate hüdroelektrijaamade ehitamine Volgal: Kuibõševis — 2 300 000 kW ja Volgogradis 2 530 000 kW. Need jaamad annavad meie maale uued miljonid kilovatt-tunnid elektrienergiat. Ehitatakse samuti võimsaid elektrijaamu Angaral, Kaamal, Irtõšil, Obil ja teistel jõgedel.

136. Hüdraulilised jõumasinad. Nagu teada mehhaanikast, on igal maapinna suhtes tõstetud kehal potentsiaalset energiat. See kehtib samuti ka vee kohta.

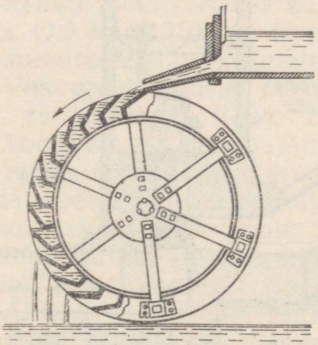
Kui näiteks mingi veehulk m on tõstetud mingi nivoo suhtes kõrgusele h, siis selle vee potentsiaalne energia on mgh. Kui see vesi kukub kõrguselt h, siis tema osakesed saavad võrdusest $v = \sqrt{2gh}$ määratava kiiruse v. Vee potentsiaalne energia muutub seejuures kineetiliseks energiaks $\frac{mv^2}{2}$. Kui ei arvestata väiksemaid energiakadusid, mis on selle juures vältimatud, siis võime kirjutada, et $mgh = \frac{mv^2}{2}$.

Veevoolu võimsus ei sõltu üksnes langemise kõrgusest h, vaid ka sekundis läbivast veehulgast. Kui näiteks sekundis läbib Q m^3 vett, s. o. 1000 Q kG, siis see vesi, langedes kõrguselt h, võib arendada võimsust $\frac{1000 \cdot Q \cdot h}{75}$ hj.

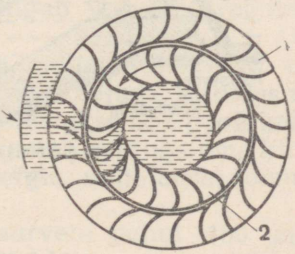
Looduses tuleb suhteliselt harva ette, et vesi langeks vahetult suuremas hulgas suuremalt kõrguselt. Kõige sagedamini tuleb kasutada niisuguseid jõgesid, milledel ei ole suurt langust. Hüdraulilistele jõumasinatele vajaliku surve saamiseks tuleb vee nivood paisu abil kunstlikult tõsta. Kui ehitada pais risti üle jõe, siis hakkab vee nivoo paisu ees tõusma.

Joonisel 253 on kujutatud V. I. Lenini nimelise Dnepri hüdroelektrijaama pais. Veesurve maksimaalne kõrgus on 51 m ja paisu üldpikkus umbes 760 m.

Antud veeallika nii potentsiaalset kui ka kineetilist energiat võib veejõumasinate abil muundada mehhaaniliseks tööks. Veeenergia nii ühe kui teise kasulikuks tööks muundumise viisi juures antakse jõumasina võllile vaid osa sellest energiast.



Joon. 254. Pealtlöödava vesiratta skeem.



Joon. 255. Vee voolamise skeem reaktiivses turbiinis.

Üheks lihtsamaks ja vanemaks veejõumasinaks on vesiratas. Joonisel 254 on kujutatud pealtlöödava vesiratta läbilõige. Pealtlöödav vesiratas kasutab peamiselt vee potentsiaalset energiat ja ainult osaliselt kineetilist energiat. Niisuguse ratta kasutegur on 40% ümber, kuid võimsus üldiselt väike. Vesirattaid ehitatakse tänapäeval harva.

Täiuslikumateks hüdraulilisteks jõumasinateks on veeturbiinid. Nendes turbiinides annab vesi järk-järgult oma energia rattale kiiruse ja voolamissuuna muutmise teel.

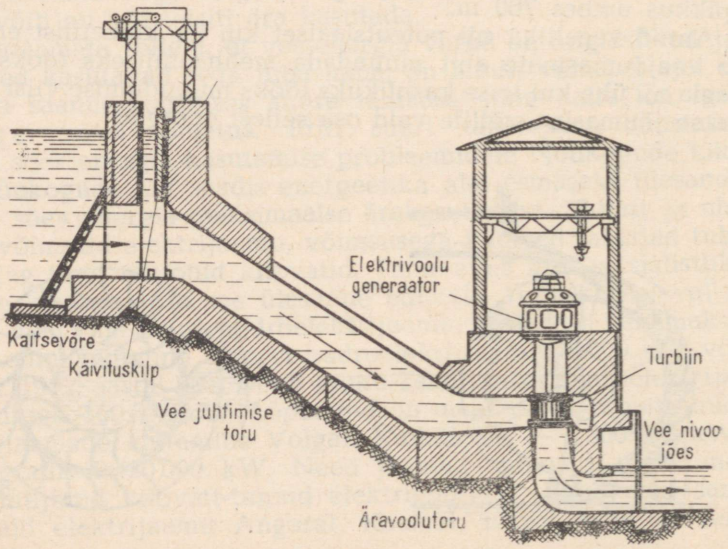
Tänapäeval ehitatavad ja kasutatavad turbiinid on kahte liiki: reaktiivsed ja aktiivsed turbiinid.

Joonisel 255 on kujutatud vee voolamise skeem läbi reaktiivse turbiini. Selle turbiini tööratas (2) asetseb pööratud labidatega juhtratta sees. Juhtratta labidate pöörde suurusega reguleeritakse veekulu.

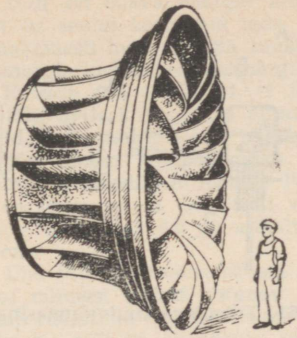
Juhtratta labidatelt tormab vesi suure kiirusega (v_0) tööratta labidatele ja seda läbides jõuab äravoolutorru juba märksa väiksema kiirusega (v). Vee mass annab seejuures töörattale energiat:

$$\frac{mv_0^2}{2} - \frac{mv^2}{2} = A.$$

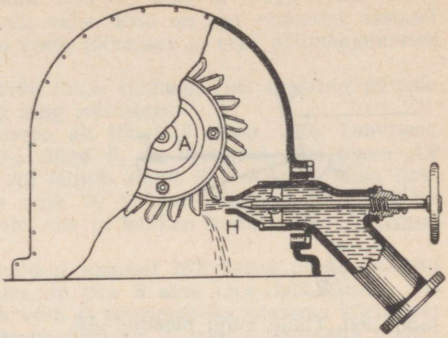
Joonisel 256 on toodud reaktiivse turbiini ülesseade skeem hüdroelektrijaamas, kuna joonisel 257 on kujutatud eraldi suure reaktiivse turbiini tööratas. Meie tehastes Kuibõševi hüdroelektrijaama jaoks ehitatavate turbiinide võimsus on 100—120 tuhat kilo-



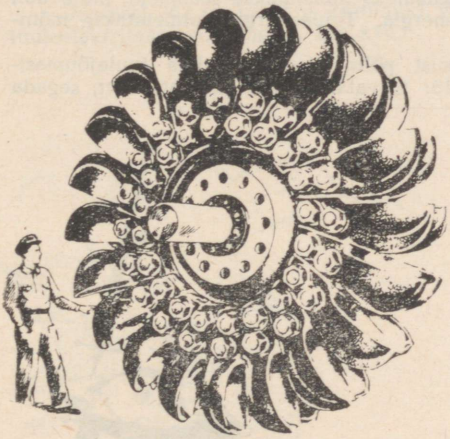
Joon. 256. Reaktiivse turbiini ülesseade skeem hüdroelektrijaamas.



Joon. 257. Võimsa reaktiivse turbiini tööratas.



Joon. 258. Aktiivse turbiini töötamise skeem.



Joon. 259. Võimsa aktiivse turbiini tööratas.

vatti. Sellise turbiini tööratta läbimõõt on 9,3 m ja üldkaal umbes 1600 tonni.

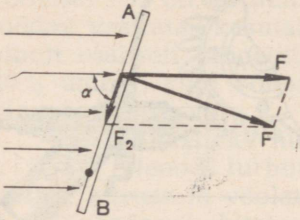
Reaktiivseid turbiine kasutatakse väga mitmesuguste survete jaoks (0,5 kuni 250 m). Nende kasutegur küünib kuni 94,5%-ni.

Joonisel 258 on kujutatud aktiivse turbiini töötamine.

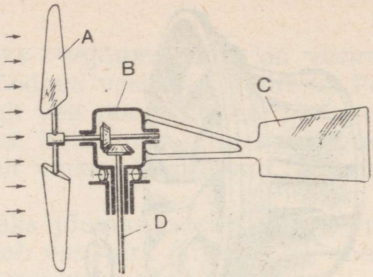
Vesi satub düüsist *H*, mille sees liigub veevoolu reguleeriv nõel, töörattale *A* (joon. 258).

Tööratas on varustatud labidatega, mille sees on nn. nuga (see ratas on eraldi kujutatud joonisel 259). Veejuga, sattudes ratta labidale peaaegu pöia puutuja suunas, lõigatakse noa poolt kaheks ja suunatakse kahele poole. Seejuures kaotab veejuga oma kiiruse ja annab rattale ära oma kineetilise energia, mille arvel toimubki turbiini töötamine.

Aktiivseid turbiine rakendatakse survete puhul 100 m ja enam. Nende võimsus ulatub kuni 20 000 kW ja nende pöörlemiskiirus on kuni 200 pööret minutis.



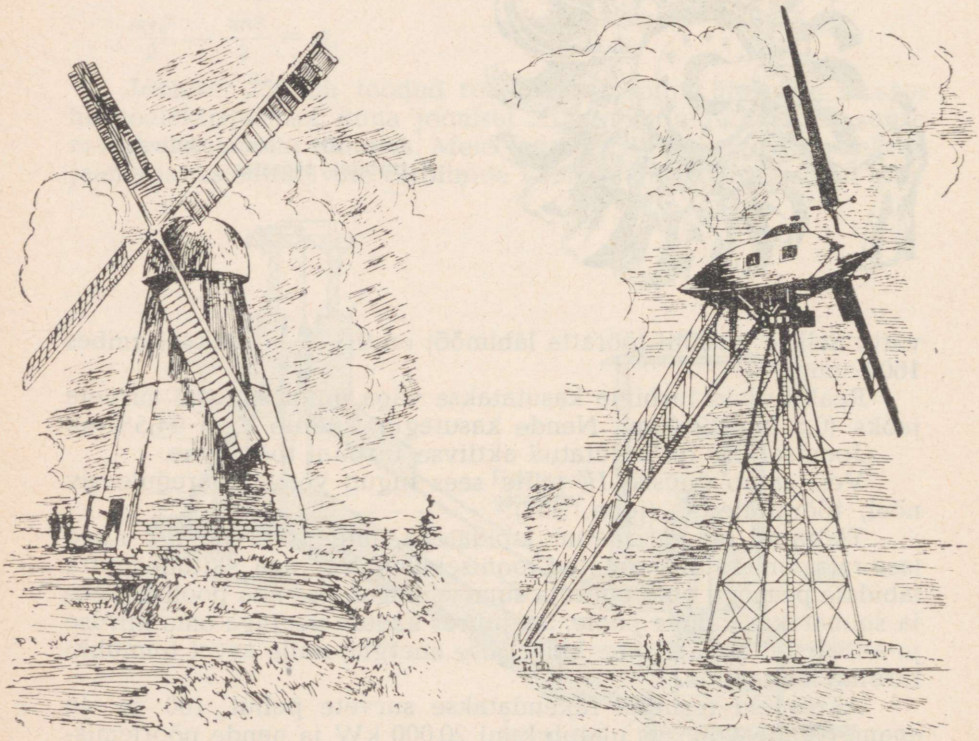
Joon. 260. Tuule mõju plaadile *AB*.



Joon. 261. Tiibadega tuulejõumasina skeem.

137. Tuulejõumasinad. Tuulejõumasinateks nimetatakse seadmeid, mille abil kasutatakse ära liikuva õhu — tuule energia. Tuuleenergiat nimetatakse mõnikord «sinise söe» energiaks.

See energia liik omab suurt tähtsust põllumajanduses, kus tuulejõumasinad võivad sooritada mitmesuguseid töid: jahvatada jahu, pumbata vett, segada savi jne.



Joon. 262. Tuuleveski (vasakul) ja 100 kW võimsusega tuuleelektrijaam.

Tuul on odava energia allikaks, kuid kahjuks pole ta kuigi püsiv. Sellepärast on senini kasutatud teda suhteliselt vähe. Küll on aga viimastel aastatel hakatud uuesti huvi tundma tuuleenergia vastu tööstuses ja eriti põllumajanduses tuuleenergia kasutamise eesmärgil.

Katsete abil on leitud, et tuule surve tuule suunaga risti asetatud pinnale on sõltuv tuule kiirusest ja pinna kujust ning suurusest.

Mõjugu tuul plaadile AB mingi nurga all jõuga F (joon. 260). Lahutame selle jõu kaheks komponendiks F_1 ja F_2. Jõud F_2 on suunatud piki plaati AB ja rõhumist plaadile ei avalda. Plaadile AB mõjub ainult $F_1 = F \sin \alpha$. Mida ligemal on tuule suuna ja plaadi vaheline nurk 90°-le, seda suurem on rõhumine plaadile. Kui plaat AB on asetatud teljele, siis ta hakkab komponendi F_1 toimel pöörlema.

Ühe tuulejõumasina skeem on kujutatud joonisel 261. Tema peamised osad on: a) mitmest tiivast koosnev tuuleratas, b) pea B sees olev mehhanism, mis muudab tuuleratta pöörlemise vertikaalse võlli D pöörlemiseks suurema kiirusega; vertikaalne võll on ühendatud töötava mehhanismiga, c) seadis tuuleratta pööramiseks tuule järgi (saba C).

Tänapäeva tuulejõumasinad on varustatud seadmega, mis tuule suuna muutumisel automaatselt pöörab tööratast.

Joonisel 262 on vasakul kujutatud vana tuuleveski ja paremal — tänapäeva tuuleelektrijaam võimsusega 100 kW.

TEINE OSA.

MOLEKULAARFÜÜSIKA JA SOOJUS.

XI PEATÜKK.

AINE EHITUSE MOLEKULAAR-KINEETILISE TEOORIA ALUSED.

138. Molekulaar-kineetilise teooria arenemine. Molekulaar-kineetiliseks teooriaks nimetatakse õpetust, mis seletab kehade omadusi molekulide ja aatomite vastastikuse mõjutamise ja liikumisega.

Aine molekulaar-kineetilise teooria põhialused anti juba vanal ajal. Juba ligi 2300 aastat tagasi õpetasid kuulsad kreeka mõttetargad Demokritos ja Leukippos, et kõik ained on ehitatud ülipisikestest osakestest — aatomitest ja et neid võib olla mitut liiki.

Samu mõtteid leiame sajandi võrra hiljem Epikurose juures ja veel hiljem vana-rooma poeedi ja mõtleja Lucretiuse kuulsas poeemis «Loodusest».

Antiikaja atomistide ideed jäid kauaks unustusse. Kirik jälitas teadlasi, kes arendasid aine ehituse atomistlik-molekulaarset ideed. Selles suhtes on iseloomustav järgmine ajalooline fakt. 1626. a. andis Pariisi parlament välja dekreedi, mis keelas surmanuhtlusega ähvardades aine ehituse atomistlik-molekulaarse kui põhiliselt materialistliku idee levitamise. Vaatamata kiriku jälitamisele hakkasid need antiikatomistide hiilgavad mõtted, õigemini aimused, XVII sajandi keskpaiku uuesti levima ja edasi arenema. Tõeliseks teaduslikuks teooriaks kujunesid need ideed alles XVIII sajandil. Üheks aine molekulaar-kineetilise teooria rajajaks on suur vene õpetlane M. V. Lomonossov.

Oma kahes töös — «Matemaatilise keemia elemendid» ja «Mittetajutavatest füüsikalistest osakestest» annab Lomonossov selged ja kindlad alused aine ehituse atomistlik-molekulaarsele teooriale ja kinnitab neid katsetel saadud faktidega.

Lomonossov kirjutas: «Metallid ja mõned teised kehad lahustuvad lahustajates õige väikesteks osakesteks, milliseid ei ole

võimalik näha eraldi lahustajast, kuid mis moodustavad koos sellega homogeense keha. Lenduvad kehad kaovad õhku. Põlevad ained haihtuvad tule toimel mittetajutavateks osakesteks.»

Osutades reale teistele katseandmetele, teeb Lomonossov järelduse: «Füüsikalised kehad jagunevad ülipisikesteks osadeks, mis üksikult pole kättesaadavad nägemismeelele, sest kehad koosnevad mittetajutavatest osakestest.»

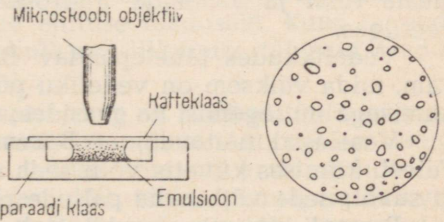
«Mittetajutavate osakeste» (molekulide) liikumisega ja nende vastastikuse mõjuga seletab Lomonossov aine agregaatolekuid ja samuti aine üleminekuid ühest olekust teise.

Lomonossovi töödes kujunevad kujutlused aine atomistlik-molekulaarsest ehitusest selgeks ja konkreetseks õpetuseks, mille põhjal sai võimalikuks paljude füüsikaliste ja keemiliste nähtuste selgitamine.

Lomonossovi rajatud molekulaar-kineetilise teooria teaduslikke aluseid arendati edasi XIX sajandil.

XIX sajandi keskpaiku töötati üksikasjaliselt välja molekulaar-kineetiline teooria gaaside jaoks ja sellest ajast peale on ta juhtivaks teooriaks gaasides toimuvate nähtuste uurimisel. Tema abil ennustati paljusid uusi fakte ja seletati paljusid nähtusi.

Meie ei näe molekulide liikumist. Sellele vaatamata kinnitavad rohkearvulised katsed meie kujutlusi molekulidest ja nende liikumisest. Vaatleme mõnda neist.



Joon. 263. Brown'i liikumise vaatlemise skeem (vasakul); paremal on kujutatud mikroskoobis nähtavad Brown'i osakesed.

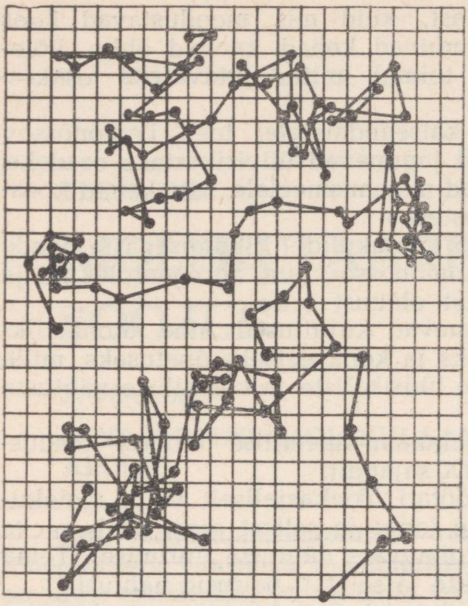
139. Brown'i liikumine. Molekulide liikumise katseliste tõestuste hulka kuulub 1827. aastal inglise teadlase B r o w n'i[1] poolt avastatud nähtus. Milles seisab see nähtus?

Kui vaadelda mikroskoobi abil mingi aine emulsiooni vees, s. o. hõljuvaid väikesi osakesi, mis ei lahustu (joon. 263), siis võib tähele panna, et need osakesed on lakkamatus liikumises. Iga niisuguse osakese liikumise kiirus ja suund muutuvad kiiresti. Niisuguste osakeste hulgaline liikumine on k a o o t i l i n e[2]. Seda liikumist nimetatakse B r o w n'i l i i k u m i s e k s.

Brown'i liikumise vaatlemiseks on vaja veega segada mingeid

[1] loe: braun.

[2] *chaos* (kreekak. sõna) — täielik korralagedus.



Joon. 264. Brown'i osakeste trajektoorid. Ringikestega on märgitud osakeste asukohad iga 30 sek. tagant.

küllalt väikesi tahke keha osakesi. Näiteks võib veele lisada vähe musta tušši ja vaadelda mikroskoobi all tema väikesi terakesi veetilgas.

Vedelikkudes tähelepandav Brown'i liikumine on seda elavam, mida väiksem on vedeliku püdelus (viskoossus). Brown'i liikumisega on tegemist ka gaasides; seal on ta eriti intensiivne.

Vaatlused näitavad, et Borwn'i liikumine kunagi ei lakka. Täiesti kinnises küvetis võib seda näha alati: igal kellaajal, talvel ja suvel; seda võib näha paljude päevade, kuude ja aastate jooksul. Brown'i liikumine on lähedalt seotud vedeliku soojusliku olekuga: temperatuuri tõusmisega kasvab Brown'i liikumise intensiivsus.

Mis on Brown'i liikumise põhjuseks?

Brown'i liikumise ainukeseks põhjuseks on selle keskkonna (vedeliku või gaasi) molekulide mitte kunagi lakkav liikumine, milles asuvad osakesed.

Mikroskoobi all ainult näib vedelik lausalisena; tegelikult ta pole seda, vaid koosneb üksikutest korrapäratult liikuvatest osakestest — m o l e k u l i d e s t, mis on tuhandeid kordi väiksemad kui Brown'i liikumise osakesed. Liikuvad molekulid põrkavad Brown'i osakestega kokku, nihutavad neid paigalt ja sellega teevad end kaudselt nähtavaks. On selge, et vedeliku liikuvad molekulid tõukavad Brown'i osakest üheaegselt igast küljest. Kuna aga molekulide liikumine on täiesti korrapäratu (kaootiline), siis

Brown'i osake võib saada kord ühelt poolt, kord teiselt poolt rohkem tõukeid, mis sunnibki teda liikuma siksakilist trajektoori mööda (joon. 264).

Tavaliste, s o. küllalt suurte mõõtmetega keha saab vedelikku (või gaasi) asetatuna samuti tõukeid vedeliku (või gaasi) liikuvate molekulide poolt. Kuid tõugete arv on niivõrd suur, et suhteliselt väike erinevus ühel pool keha, mis juhuslikult võib tekkida, ei suuda veel keha liikuma panna; selline keha jääb vedelikus paigale. Mida väiksem on keha, seda vähem saab ta tõukeid. Brown'i liikumise mikroskoopilistele osakestele antud tõugete arv ei ole enam kuigi suur, sellepärast on kogu aeg üks või teine pool ülekaalus ja osake liigub sinna-tänna.

Tuleb endale hästi selgeks teha seda, et Brown'i liikumises vaadeldav osake sisaldab endas miljoneid molekule, sellepärast ei ole tema korrapäratu liikumine õieti mitte molekulaarne liikumine. Meie ei saa vaadelda üksikute molekulide tõukeid, küll aga vaatleme ainult molekulide tõugete juhuslikku ülekaalu ühes mingis suunas.

Üksikasjalisemalt uuris Brown'i liikumist katseliselt prantsuse teadlane Perrin. Kujutluse Brown'i liikumise kaootilisest iseloomust annab üks Perrini poolt saadud joonis (joon. 264). Sellel joonisel on märgitud ühe ja sama osakese asendid mikroskoobi vaateväljas iga 0,5 minuti tagant; need asendid on ühendatud sirglõikudega, kuigi ka selles ajavahemikus osake tegelikult võttis osa kõige korrapäratumatest liikumistest. Brown'i liikumise uurimisel oli suur tähtsus aine ehituse teadusele, kuna ta andis võimaluse kindlaks teha molekulaarse liikumise tähtsaid seaduspärasusi.

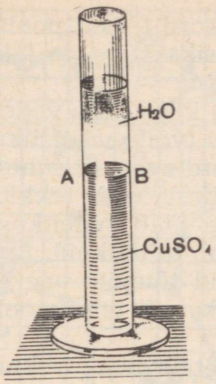
140. Difusioon. Kui anumasse, mis on pooleni täidetud vasevitrioli lahusega, valada ettevaatlikult puhast vett, siis on esialgu näha värvitu vee ja sinise lahuse teravat eralduspinda *AB* (joon. 265). Kuid mõne aja pärast võib tähele panna, kuidas vesi hakkab järk-järgult sinama, eralduspind muutub segaseks ja pikema aja jooksul kaob täiesti.

Selles katses me puutume kokku uue füüsikalise nähtusega, mis kannab difusiooni nime.

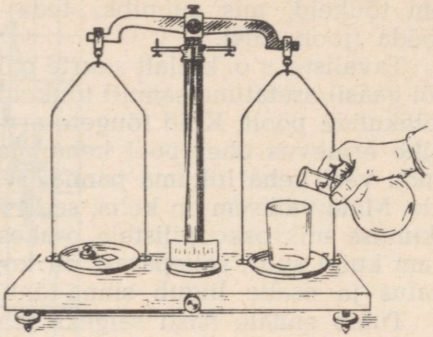
Kokkupuutumisse viidud erinevate ainete tungimist teineteisesse nimetatakse difusiooniks.

Kerge on kindlaks teha difusiooni gaasides. Täidame kaaludel tasakaalustatud klaasi eetri raskete aurudega. Eetri aurudega kaalude pool langeb alla (joon. 266). Mõne aja pärast märkame, et kaalud tasakaalustuvad ja toas on tunda eetri lõhna. Tähendab, vaatamata sellele, et eetri aurud on õhust raskemad, tungisid nad klaasist tuppa.

Difusiooni võib kindlaks teha mitte üksi vedelikkude ja gaaside juures, vaid ka tahkete kehade juures. Ühes katses paigutati siledaks lihvitud plii- ja kullaplaadid teineteisele ja asetati



Joon. 265. Vedelike difusioon.



Joon. 266. Õhu ja eetri auru difusiooni katse.

nendele veel koormus. Tavalise toatemperatuuri (umbes 20° C) juures kasvasid plii ja kuld 5 aastaga kokku, tungides teineteisesse kuni 1 cm sügavusse. Saadi plii ja kulla homogeense sulami kiht, kuigi muidugi nende metallide sulamisest 20° C juures ei saanud olla juttugi. Kirjeldatud katsete tulemusi on kerge seletada molekulaar-kineetilise teooria abil.

Tõepoolest, kui kokkupuutuvad kehad koosnevad üksikutest korrapäratult liikuvatest molekulidest, siis võivad loomulikult need molekulid ületada kokkupuutuvate kehade piire, mis kujutabki endast difusiooni.

Difusiooni katsetest võib teha järelduse ka selle kohta, et kehas on molekulide vahel vaba ruumi, millesse võivad tungida teised molekulid.

Kui difusiooninähtus leiab aset erinevate ainete kokkupuutumisel, siis ühes ja samas gaasis või vedelikus peab toimuma sama nähtus. *Difusiooni tagajärjel ühtlustub gaasi tihedus kogu ruumalas.*

Temperatuuri tõusuga kiireneb difusiooniprotsess, mis on seletatav sellega, et temperatuuri tõusuga suureneb molekulide korrapäratu liikumise kiirus.

Difusioon mängib looduses suurt osa: ta soodustab õhu koosseisu homogeensuse säilimist maapinna läheduses. Mitmesuguste soolade lahuste difusioon pinnases aitab kaasa taimede normaalsele toitumisele.

141. Maa atmosfäärist. Nagu kõiki kehi, tõmbab Maa külge ka meid ümbritseva õhu osakesi. Kuid miks nad siis kõik ei kuku maapinnale? Millega on seletatav Maa atmosfääri olemasolu?

Ainult molekulide katkestamatu liikumisega võib seletada seda tõsiasja, et vaatamata oma kaalule ei ole atmosfääri gaasid maapinnal, vaid jaotuvad järjest väheneva tihedusega üsna pak-

sus kihis, mille läbimõõt ulatub mitmesaja kilomeetrini. Selline gaaside jaotumine atmosfääris on tingitud ühelt poolt gravitatsioonist, mis paneb õhuosakesed liikuma Maa poole, ja teiselt poolt õhu molekulide liikumisest, mis paiskab molekulid igasse suunda.

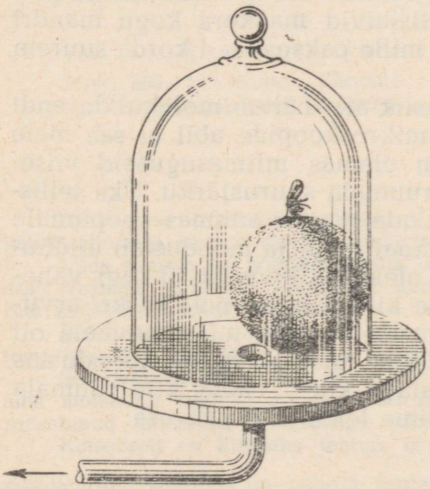
Maa atmosfääri jälgi on leitud virmaliste põhjal 1100—1300 km kõrgusel maapinnast. Rohkem kui 79% atmosfääri massist asetseb troposfääris, s. o. kõrguseni 10—16 km. Troposfääri peal on kuni 80—90 km kõrguseni stratosfäär, milles on 20% atmosfääri kogu massist. Veel kõrgemal asetseb ionosfäär, mis sisaldab ainult 0,5% atmosfääri massist.

142. Molekulaar-kineetilise teooriaga seletatavad katsed. Paigutame õhupumba kupli alla käsipalli suletud sisemise kesta, milles on natuke õhku. Kupli alt õhku välja pumbates hakkab palli kest paisuma ja võtab lõpuks kera kuju (joon. 267 *a*). Kuidas seletada seda katse tulemust?

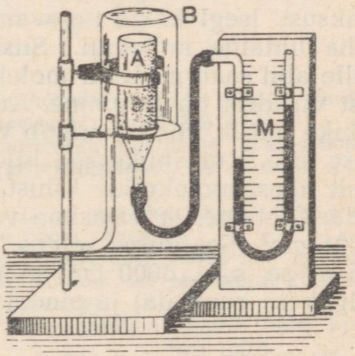
Õhu liikuvad molekulid pommitavad lakkamatult kesta nii seest- kui väljastpoolt. Kupli alt õhu väljapumpamisel väheneb kiiresti väljastpoolt pommitavate molekulide arv. Kuid kinnise kummi sees molekulide arv ei muutu; nende mõju kestale ületab ikka rohkem ja rohkem väliste molekulide mõju, mille tulemusena kest paisubki.

Katsed näitavad, et molekulid erinevad üksteisest suuruse ja massi poolest.

Ühe ja sama temperatuuri ning rõhu puhul liiguvad väiksema massiga molekulid kiiremini kui suurema massiga molekulid. Seda järeldust võib kinnitada järgmise katsega.



Joon. 267 *a*. Õhu kupli alt väljapumpamisel paisub järk-järgult palli kest ja võtab kera kuju.



Joon. 267 *b*. Õhu ja valgustusgaasi või vesiniku difusiooni demonstreerimise riist.

Poorsele anumale *A* on kleebitud manomeetriga *M* ühenduses olev lehter. Kui paigutada see anum klaasi *B* alla ja täita viimane valgustusgaasiga (või vesinikuga), siis rõhk klaasis suureneb (joon. 267 *b*). See tuleb sellest, et valgustusgaas, mille molekulid on väiksema massiga ja liikuvamad kui hapniku ning lämmastiku molekulid, tungib läbi pooride anumasse kiiremini, kui õhk sealt välja voolab. Kui mõne aja pärast võtta poorselt anumalt klaasanum *B*, milles on valgustusgaas, siis rõhk poorses anumas hakkab langema ja saab atmosfäärirõhust väiksemaks. Nüüd väljub valgustusgaas poorsest anumast kiiremini, kui õhk sinna väljast asemele läheb.

143. Molekulide arv aine ruumalaühikus. Molekulide suurus. Molekulide maailmas või, nagu tavaliselt räägitakse, mikrokosmoses me kohtume tohutu suure üliväikeste osakeste hulgaga. Mitmesuguste võtetega (õpitakse kõrgemas õppeasutuses) on leitud, et *mistahes gaasi ühes kuupsentimeetris on normaalsetel tingimustel (0° C ja 760 mm Hg) ligikaudu* $2{,}7 \cdot 10^{19}$ *molekuli.*

Et saada kujutlust sellest, kui suur on see arv, vaatleme järgmisi näiteid.

Kujutleme ampullikest ruumalaga 1 cm^3. Oletame, et ampullike on tühi. Teeme mingil viisil ampullikesse ülipeene ava, nii et läbi selle ühes sekundis saaks minna ampulli sisse 100 miljonit õhumolekuli. Küsitakse, kui palju kulub aega, et niiviisi täita ampull normaalse tiheduseni.

Arvutus näitab, et selleks on vaja umbes 9000 aastat.

Teine näide. Kui võtta normaalsetel tingimustel gaasi 1 cm^3-s olevate molekulide arvuga võrdne telliskivide arv, siis tiheda paigutamise puhul kataksid need telliskivid maakera kogu mandri 120 m paksuse kihiga, s. o. kihiga, mille paksus on 4 korda suurem 10-korruselise maja kõrgusest.

Gaasi 1 cm^3 molekulide hiiglaslik arv näitab molekulide endi väiksust. Isegi kõige tugevamate mikroskoopide abil ei saa meie näha lihtaine molekuli.[1] Siiski on olemas mitmesuguseid viise, mille abil saab määrata molekuli ruumala suurusjärku. Üks sellistest viisidest on järgmine. Kui valada mingis anumas veepinnale tilluke õlitilk, siis ta valgub veepinnal laiali ja moodustab üliõhukese kile. Kui õhuke see kile ka oleks, ta koosneb ikkagi vähemalt ühest molekulide kihist. Selle kile paksust pole raske arvutada. Oletame, et valasime veepinnale õlitilga, mille ruumala oli 0,001 cm^3. Seejuures selgus, et õlitilk laiali valgudes moodustas 0,5 m^2-se, s. o. 5000 cm^2-se pindalaga kile. Teades kile ruumala (tilgakese ruumala) ja pindala, võime leida kile paksuse:

$$d = \frac{0{,}001 \text{ cm}^3}{5000 \text{ cm}^2} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ cm}.$$

[1] Tänapäeva elektronmikroskoobid võimaldavad eraldada mõnede keerukamate mitmesajast aatomist koosnevate molekulide piirjooni.

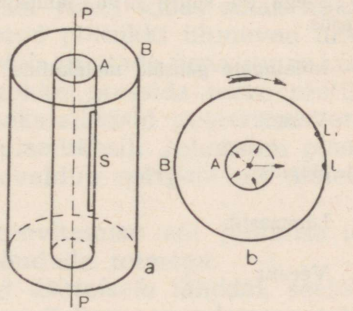
Ühe molekuli läbimõõt on tegelikult veel väiksem. Täpsemad mõõtmised ja arvutused näitavad, et molekulide diameetrid (kui võtta neid keradena) on kaks-kolm sajamiljondikku sentimeetrist (umbes 10^{-8} cm). Et saada kujutlust molekuli massi suurusest, arvutame vesiniku molekuli massi. Vesiniku kõikide molekulide mass 1 cm^3-s 0° C juures ja 1-atmosfäärilise rõhu puhul on 0,00009 g; jagades selle massi vesiniku molekulide üldarvuga 1 cm^3-s, leiame ühe vesiniku molekuli massi:

$$m_{H_2} = \frac{0{,}00009\ \text{g}}{2{,}7 \cdot 10^{19}} \approx 3{,}3 \cdot 10^{-24}\ \text{g}.$$

144. Molekulide liikumise kiirus. Gaasi molekulide liikumise kiiruse võib määrata katseliselt. Üks sellistest katsetest on järgmine.

Tugevasti hõrendatud ruumis on hõbetatud plaatinatraat *PP* (joon. 268 *a*), mis on piiratud kahe silindriga *A* ja *B*, nii et see traat on nende ühiseks teljeks, mille ümber silindrid saavad pöörelda.

Seesmises silindris *A* on paralleelselt traadiga lõigatud kitsas pilu *S*. Plaatinatraati soojendatakse temperatuurini, mille juures hõbe hakkab sulama ja aurustuma. Seejuures lendavad mõned hõbeda molekulid läbi pilu ja sadestuvad välisel silindril hõbedase ribakesena *L* (joon. 268 *b*), mis on pilu täpseks kujutiseks. Siis pannakse mõlemad silindrid noolega näidatud suunas pöörlema. Pärast silindrite seismajätmist selgub, et välisele silindrile sadestunud hõbedane ribakene *L* nihkus vastupidises suunas seadme pöörlemisele, asukohta L_1.



Joon. 268. Molekulide liikumiskiiruste määramise seadise skeem.

Nihkumine on seletatav sellega, et seni kui hõbeda molekulid liikusid pilust *S* välise silindrini, toimus silindri nihkumine vahemaa LL_1 (joon. 268 *b*) võrra.

Mida suurem on pöörlemiskiirus, seda suurem on nihkumine. Teades hõbedase ribakese nihkumise suurust ja silindrite pöörlemiskiirust, on võimalik määrata molekulide liikumiskiirust.

Pöörlemise ajal tekkinud hõbedane ribake L_1 on servadest õhem, tihedam on tema keskmine osa, kuna tihedus mõlema ääre poole väheneb.

See fakt osutab sellele, et ühe ja sama temperatuuri juures ühe ja sama aine molekulid omavad erinevaid kiirusi, kuigi suurem osa plaadikese keskosas sadestunud molekule on peaaegu võrdsete kiirustega.

Katseliselt on kindlaks tehtud, et 1200° C temperatuuri juures (niidi kuumendamistemperatuur) on hõbeda suurema osa molekulide kiirus 500—625 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Võimatu on ennustada, millise kiiruse ja suuna võtab üks või teine molekul. Kuid tähelepanuväärne on see, et korrapäratult liikuvas tohutu suures gaasi molekulide hulgas on olemas molekulide kindel jagunemine kiiruste järgi. Ilmneb,

et suurem osa molekule antud ruumalaga gaasis liigub kiirustega, mis on ligilähedased kiirusele, mida nimetatakse antud temperatuuri *kõige tõenäolisemaks kiiruseks*.

Allpool toodud tabelis on lämmastiku molekulide jaotamine liikumise kiiruste järgi toatemperatuuril.

Kiiruste vahemikud $\frac{m}{s}$	Antud vahemiku kiirusega liikuvate molekulide arv protsentides
Alla 100	1
100 kuni 300	25
300 kuni 500	42
500 kuni 700	24
700 kuni 900	7
Üle 900	1

Tabelist nähtub, et suurema arvu molekulide kiirus on 300 kuni 500 $\frac{m}{s}$: kiirusega 100—700 $\frac{m}{s}$ on 91% kõikide molekulide arvust ja ainult 9% molekulidest omavad kiirust üle 700 $\frac{m}{s}$ ja alla 100 $\frac{m}{s}$.

Seega on suure arvu juhuslike nähtuste hulgas kehtimas kindel seaduspärasus.

Mõningate gaaside molekulide keskmised kiirused 0° juures.

Vesinik . . . . . 1840 $\frac{m}{s}$

Hapnik . . . . . 460 $\frac{m}{s}$

Lämmastik . . . . . 490 $\frac{m}{s}$

Veeaur . . . . . 615 $\frac{m}{s}$

Temperatuuri tõusmisel suurenevad molekulide kiirused. Kuid ka 0° C juures on need kiirused hiiglasuured, neid saab võrrelda ainult kahurimürskude kiirustega.

145. Kokkupõrgete arv ja molekuli vaba tee keskmine pikkus. Nagu me nägime, on molekulide keskmine kiirus tavalistes tingimustes harukordselt suur. Kuid vaadeldes difusiooni, selgub, et isegi gaasides, kus osakesed on väga liikuvad, toimub see nähtus suhteliselt aeglaselt.

On teada, et kui näiteks valada toas kuskil maha lõhnaõli, siis lõhn, mis tuleneb lõhnaõli aurustumisest ja difusioonist õhus, ei levi mitte eriti kiiresti kogu toas.

Kas ei lükka ümber aeglane difusiooniprotsess seda, mis oli öeldud molekuli suurte kiiruste kohta? Ei lükka. Asi on selles, et iga gaasi molekul põrkab liikumisel kokku palju kordi teiste molekulidega. Arvutamine näitab, et keskmiselt iga lämmastiku molekul 0° C temperatuuri ja 1-atmosfäärilise rõhu juures põrkab 1 sekundi jooksul teiste molekulidega kokku umbes 7,5 miljardit korda. Selle tõttu tema vaba liikumistee, s. t. keskmine tee pikkus ühelt kokkupõrkelt teiseni, on äärmiselt väike.

Tee pikkuse leiame, kui jagame molekuli keskmise kiiruse tema kokkupõrgete keskmise arvuga. Nii näiteks lämmastiku molekuli keskmine vaba tee λ on võrdne:

$$\lambda = \frac{490 \cdot 100 \frac{\text{cm}}{\text{s}}}{7{,}5 \cdot 10^9 \frac{1}{\text{s}}} \approx 0{,}000006 \text{ cm}.$$

Niisiis, tavalistes tingimustes gaasi molekul rohkem «tammub paigal» kui liigub edasi.

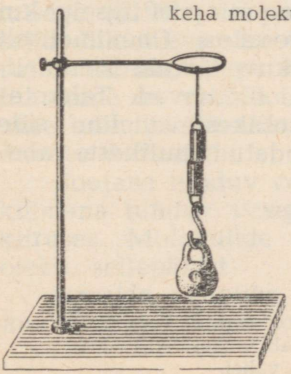
146. Molekulidevaheline vastastikune mõju. Iga keha koosneb üksikutest aatomitest või molekulidest. Kuid mispärast on siiski raske eraldada üht tahke keha osa teisest? Asi seisab selles, et üksikute molekulide vahel tegutsevad omavahelised tõmbejõud (kohesioon). Need jõud osutavad vastupanu igale katsele eraldada ühte kehaosa teisest. Molekulide tõmbejõud tegutsevad ainult väga väikestes kaugustes. Klaasikilde ei saa kokku panna terveks klaasiks osakeste lähendamisega üksteisele sellepärast, et ebatasasuste tõttu ei ole võimalik lähendada neid niivõrd, et mõju hakkaksid avaldama molekulaarsed tõmbejõud. Kui klaasi aga kuumendamise teel pehmendada, siis pehmendatult on võimalik tükke tihedalt lähendada ja sel juhul klaas sulab kokku.

Kaks puhast kõvasti kokkusurutud pliitükki ühinevad üheks tükiks nii tugevasti, et tema külge võib riputada üsna suure koormuse (joon. 269). Pliipurust võib kokku pressida terve pliitüki.

Tööstuses kasutatakse mõõtmisteks siledaid poleeritud terasplaadikesi (niinimetatud Johansoni plaadikesi). Johansoni plaadikeste kokkupuutumisel üksteisega avaldub märgatavalt molekulaarne tõmbejõud (joon. 270).

Kahe metallitüki ühendamine keevitamise või jootmise teel on seletatav molekulaarsete tõmbejõudude toimega.

Tahketes kehades on molekulid üksteisele lähedal, seetõttu on tõmbejõud nende vahel väga suur. Sellega on seletatav tahke



Joon. 269. Katse, mis näitab tahke keha molekulide vahelist kohesiooni.

Joon. 270. Johansoni plaadikeste kokkupuutumisel ilmnevad molekulaarsed tõmbejõud.

keha kuju ja ruumala püsivus. Et muuta tahke keha kuju või ruumala, on vaja rakendada suurt jõudu.

Kuid ka tahketes kehades ei ole osakesed paigal: nad võnguvad korrapäratult mingite keskasendite ümber.

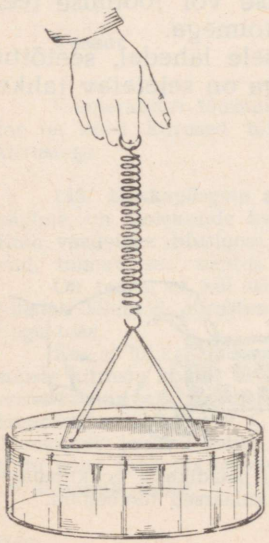
Vedelike molekulide kohesioonijõudude olemasolus on kerge veenduda järgmise katse abil.

Vedrule (joon. 271) kinnitatakse niidi abil klaasplaadike nii, et tema alumine pind oleks horisontaalne. Kui seda plaadikest lähendada veeanumale nii, et ta puutub veepinda, siis plaadike liibub vee külge. Plaadikese veepinnast lahtirebimisel venib vedru märgatavalt välja, mis tõstab tõmbejõudude olemasolu. Vedru väljavenimise pikkuse järgi võib määrata jõu suurust, mis on vajalik plaadikese veepinnalt lahtirebimiseks. Tõmmates plaadikese veest lahti, näeme, et tema alumine pind on märg, seega plaadikese veest lahtirebimisel me ületame veeosakestevahelist kohesioonjõudu. Vedelikuosakeste omavahelise tõmbejõuga on seletatav see fakt, et kaks vedelikutilka kokkupuutumisel ühinevad üheks tilgaks.

Vedeliku molekulide suure ligiduse tõttu on nendevaheline tõmbejõud samuti küllaltki suur, kuid side molekulide vahel lubab siiski üksikutel molekulidel libiseda üksteise suhtes. Selle tõttu vedelik muudab kergesti oma kuju, kui valame teda ühest anumast teise. Seda vedelike omadust nimetatakse v o o l a v u s e k s.

Tahket keha on raske välja venitada, kuid samuti on teda raske kokku suruda. Raske on kokku suruda ka vedelikku.

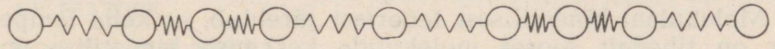
Järelikult **molekulaarsed jõud ei avaldu mitte ainult tõmbejõus, vaid ka eemaletõukamises; sellega on seletatav kehade vastupanu nii venitamisele kui survele.**



Joon. 271. Klaasplaadi tõstmisel veepinnalt vedru venib, mis näitab adhesioonjõudude olemasolu klaasi ja vee vahel.

Esimesel momendil on raske aru saada, kuidas võivad molekulaarsed mõjujõud olla ühtlasi tõmbejõududeks kui ka tõukejõududeks. Tuletame meelde, et elektrilaengute omavaheline mõjujõud võib samuti olla tõmbuv ja ka tõukuv ning et aatomites on olemas nii positiivselt kui negatiivselt laetud osakesi. Ühenimeliselt laetud osakesed tõukuvad, kuid isenimeliselt laetud osakesed tõmbuvad. Tahketes kehades sarnaneb osakestevaheline side vedrukeste abil ühendatud kuulikeste vahe-

lise sidemega (joon. 272). Vedrukesed panevad vastu nii kokkusurumisele kui ka väljavenitamisele. Muidugi pole olemas tegelikult mingisuguseid vedrukesi, molekulide ehitus ja omavaheline mõju on palju keerulisem, kuid see lihtne mudel võimaldab umbkaudseltki selgitada katsete tulemusi.



Joon. 272. Tahke keha osakestevahelist seost illustreeriv mudel.

Vaadelnud molekulaarsete tõmbe- ja tõukejõudude esinemist tahketes ja vedelates kehades, pöördume nüüd gaaside juurde.

Gaaside tihedus on tunduvalt väiksem tahkete ja vedelate kehade tihedusest. Nii näiteks on veevaru tihedus 100° C ja üheatmosfäärilise rõhu juures 1670 korda väiksem vee tihedusest samades tingimustes. Selle tõttu on gaasides osakesed suhteliselt kaugemal üksteisest kui tahketes ja vedelates kehades.

Järelikult on molekulaarsed tõmbe- ja tõukejõud gaasides väga väikesed. See mõjutab oluliselt molekulide liikumist gaasides.

Kui üksik gaasi molekul antud ajamomendil liigub mingis suunas, siis ta jätkab samas suunas liikumist jääva kiirusega seni, kuni põrkab kas anuma seina või teise molekuli vastu.

Gaasi molekuli kulgeva liikumisega on seletatav gaasi omadus levida kogu temale antud ruumalas. Nii näiteks ei saa gaas enda alla võtta ainult anuma alumist poolt, vaid levib kogu anuma ulatuses.

Milline on molekulaarsete jõudude loomus?

Teadus tegi kindlaks, et molekulid koosnevad aatomitest, millede koostisosadeks on positiivselt ja negatiivselt laetud osakesed — prootonid ja elektronid.

Nende laetud osakeste omavahelisest mõjust ja liikumisest ongi tingitud molekulaarsed jõud.

147. Soojusliikumine. Temperatuur. Tutvudes Brown'i liikumisega (§139), me panime tähele, et osakeste liikumise kiirus selles liikumises oleneb temperatuurist. Temperatuuri tõusuga kiirus suureneb, temperatuuri langemisega — langeb. Kuid Brown'i liikumine on vedelike või gaaside molekulide korrapäratu liikumise tulemus. *Järelikult sõltub keha temperatuur molekulide liikumise kiirusest.*

Soojana tunduv vesi koosneb samasugustest molekulidest kui külmana tunduv vesigi. Vahe seisab ainult molekulide liikumise kiiruses. Molekulide liikumise kiirus määrab keha soojusliku oleku, sellepärast

gaaside, vedelike ja tahkete kehade molekulide kaootilist liikumist nimetatakse soojusliikumiseks.

Soojusliikumisest võtavad osa kõik keha molekulid, mille tõttu soojusliikumise muutumisega muutub igas suhtes ka keha ise. Ja tõepoolest, sõltuvalt temperatuuri muutusest muutuvad kõik aine füüsikalised omadused: ruumala, kõvadus, elastsus, elektrilised, magnetilised ja optilised omadused. Muutub ka keemiline sugulus: ühendid, mis tekivad iseenesest ühe temperatuuri juures, lagunevad teiste temperatuuride juures.

Molekulaar-kineetilisest teooriast järeldub, et keha temperatuur on tihedalt seoses molekulide keskmise kineetilise energiaga. **Mida suurem on keha molekulide keskmine kineetiline energia, seda kõrgem on tema temperatuur.** Molekulide keskmise kineetilise energia vähenemine vastab keha temperatuuri alanemisele.

Kui ühe gaasi molekulide keskmine kineetiline energia võrdub teise gaasi molekulide keskmise kineetilise energiaga, siis nende gaaside temperatuurid on võrdsed.

Teiselt poolt võib öelda, et kui meil on tegemist mitme gaasi seguga, näiteks õhuga, siis on kindla temperatuuri juures kõikide segusse kuuluvate gaaside keskmine kineetiline energia ühesugune.

Täpselt samuti on ühesuguse temperatuuriga aine molekulide keskmine kineetiline energia üks ja sama, vaatamata sellele, millises olekus aine on. Nii on näiteks jää molekulide keskmine kineetiline energia 0° juures sama mis vee molekulide keskmine kineetiline energia 0° juures; vee molekulide keskmine kineetiline energia 100° juures võrdub auru molekulide keskmise kineetilise energiaga sama temperatuuri juures jne.

Seega annavad põhilised järeldused molekulaar-kineetilisest teooriast kokku võttes järgmist:

Kõik kehad looduses koosnevad tohutu suurest arvust aatomitest ja molekulidest, mis on katkestamatus kaootilises liikumises.

Aatomite ja molekulide vahel mõjuvad tõmbe- ja tõukejõud. Kaootiliselt liikuvate aatomite või molekulide kineetiline energia määrab keha temperatuuri. Temperatuuri tõus tähendab osakeste kaootilise liikumise keskmise kiiruse suurenemist, temperatuuri langus aga vastupidist, — selle liikumise keskmise kiiruse vähenemist.

SOOJUS JA TÖÖ.

148. Molekulide liikumise ja omavahelise mõju energia. Kehade siseenergia. Nüüd me teame, et molekulid, millest koosnevad kehad, on alalises liikumises. Gaasi molekulid liiguvad kulgevalt erinevate kiirustega ja erinevates suundades. Gaasidele on iseloomustav *molekulide liikumise kaootilisus.* Molekulid vedelikes võivad võnkuda, pöörelda ja üksteise suhtes kulgevalt liikuda. Tahketes kehades molekulid ja aatomid võnguvad mingite keskasendite ümber.

Nii nagu kõigil liikuvatel kehadel on ka molekulidel kineetilist energiat. Meie teame samuti seda, et kehas on molekulid omavahel seotud kohesioonjõududega: gaasides nõrgalt, vedelikes ja tahketes kehades väga tugevasti. Seetõttu on molekulidel samuti potentsiaalset energiat, mis oleneb molekulide omavahelisest asendist.

Keha osakeste liikumise kineetiline energia koos nende vastastikuse mõju potentsiaalse energiaga moodustab keha siseenergia.

Peale mingi siseenergia varu võib kehal samaaegselt olla veel ka mehhaanilist energiat. Näiteks on mingil kõrgusel liikuval mürsul peale siseenergia veel mehhaaniline energia, nimelt potentsiaalne ja kineetiline energia.

149. Keha siseenergia muutumine. Keha siseenergia ei osutu jäävaks suuruseks, ühe ja sama keha siseenergia hulk võib muutuda. Nii näiteks suureneb temperatuuri tõustes keha siseenergia, kuna suureneb selle keha molekulide liikumise keskmine kineetiline energia. Temperatuuri langedes aga, vastupidiselt, väheneb keha siseenergia.

Siseenergia hulk muutub samuti keha üleminekul ühest agregaatolekust teise, keha deformatsiooni ja keha purustamise puhul väiksemateks osadeks, kuna kõikidel neil juhtudel muutub osakeste vastastikune asend ja järelikult ka nende potentsiaalne energia.

Kõigest öeldust järeldub, et *keha siseenergia sõltub selle keha olekust. Keha oleku muutumisega muutub ka tema siseenergia.*

Vaatleme nüüd, missuguste protsesside tulemusena muutub keha siseenergia.

Kui liikuv keha teeb tööd hõõrdejõu ületamiseks, siis tema mehhaaniline energia väheneb; samaaegselt muutub ka keha olek.

Hõõrdel kehad soojenevad, purunevad osadeks ja võivad isegi üle minna ühest agregaatolekust teise (näiteks sulavad hõõrdel jäätükikesed). Järelikult *töötegemise protsessis muutub keha siseenergia.*

Keha siseenergiat võib muuta ka teisel teel. Pliidile asetatud teekannus hakkab vesi keema — tema siseenergia muutub. Õhk ja toas olevad esemed soojenevad ahjust, järelikult suureneb nende siseenergia, kuna suureneb molekulide kineetiline energia. Kuid seejuures tööd ei tehta. Järelikult võib siseenergia muutumine toimuda mitte üksi töötegemise tulemusena, vaid ka mitmesuguste soojuslike protsesside juures.

Keha siseenergia muutumise protsessi, mille puhul tööd ei tehta, nimetatakse soojuse edasiandmiseks (ülekandeks).

Soojuse edasiandmine toimub kehade otsesel (vahetul) kokkupuutel (teekann pliidil) ja ka siis, kui kehad on üksteisest kaugemal (esemete soojenemine ahjust või päikesest).

Seega võime keha siseenergiat muuta kahel viisil: töötegemise ja soojuse edasiandmise kaudu.

Kui keha suurendab oma siseenergia varu, siis tähendab see seda, et ta saab mingi energiahulga väljastpoolt. Vastupidiselt aga, keha siseenergia vähenemine tähendab seda, et keha annab ära osa oma energiast.

Soojuse edasiandmise protsessis on keha poolt saadud või antud energia mõõduks eriline suurus, mida nimetatakse soojushulgaks.

105. Soojushulga ühik. Sel ajal, mil esmakordselt hakati mõõtma soojushulki (XVIII sajandi teine pool), ei kasutatud teaduses veel töö ja energia mõisteid (need võeti kasutusele alles XIX sajandil).

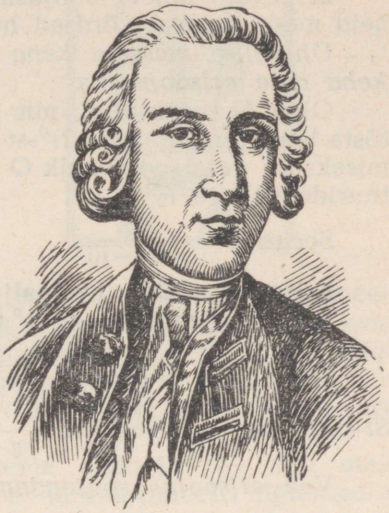
Soojushulga mõõtmiseks võeti tarvitusele eriline ühik. **Soojushulga ühikuks võeti soojushulk, mis on vajalik 1 g vee soojendamiseks 1° C võrra. Seda ühikut nimetatakse kaloriks.** Tema lühend on cal. Kasutatakse samuti tuhat korda suuremat ühikut — kilokalorit (kcal).

Täpne mõõtmine näitab, et 1 g vee soojendamiseks 1° C võrra läheb sõltuvalt algtemperatuurist kas natuke rohkem või vähem soojust. Nii on 1 g vee soojendamiseks 1° C-st kuni 2° C-ni vaja umbes 1% võrra rohkem soojust kui vee soojendamiseks +31° C-st kuni 32° C-ni. Täpsete mõõtmiste juures võetakse üheks kaloriks soojushulk, mis läheb 1 g puhta vee soojendamiseks 19,5° C-st kuni 20,5° C-ni.

SI-süsteemis kasutatakse soojushulga mõõtühikuna *džauli* (J).

Harjutus 59.

1. XVIII sajandi esimesel poolel ei tehtud veel temperatuuri ja soojushulga mõõtmises vahet. Nende mõistete täpsustamisel ja piiritlemisel olid suure tähtsusega Peterburi akadeemiku Richmani tööd.



Georg Richman (1711—1753) — meie silmapaistev teadlane. Sündis 1711. aastal, s. o. ühel aastal Lomonossoviga. Õppis Peterburi Teaduste Akadeemias. 1741. a. määrati akadeemia professoriks. Tema tööd kujutasid uurimusi peamiselt soojuse ja elektri alalt. Soojusõpetuses pani ta aluse kalorimeetriale. Koos Lomonossoviga uuris ta esmakordselt Venemaal elektrilisi nähtusi. Richman rakendas esimesena elektroskoopi kehadel olevate elektrilaengute uurimisel.

Lahendage Richmani poolt antud ülesanne.

Segati m_1 grammi vett, mille temperatuur oli $t_1°$, m_2 grammi veega, mille temperatuur oli $t_2°$. Määrata segu temperatuur.

2. Milline on segu temperatuur, kui segada 600 g vett temperatuuriga 80° *C* 200 g veega, mille temperatuur on 20° *C*?

3. Üks liiter 90° *C*-st vett valati vette, mille temperatuur oli 10° *C*. Segu temperatuur saadi 60° *C*. Kui palju oli külma vett?

4. Kui palju on vaja valada 60° *C* vett anumasse, milles oli enne 20 l 15° *C*-st vett. Segu temperatuur peab olema 40° *C*.

5. Seadis Maale langeva päikeseenergia mõõtmiseks koosneb madalast silindrist põhjapinnaga 3 dm^2. Silindris on 1200 g vett. Kui silindri põhjale langevad päikesekiired perpendikulaarselt, tõuseb vee temperatuur ühes minutis 0,5° *C* võrra. Leida, mitu kalorit ühes minutis saab iga päikesekiirtele perpendikulaarselt asetsev maapinna cm^2.

151. Keha soojusmahtuvuse mõiste. Aine erisoojus. Soojendades erinevatest ainetest (rauast, puust, savist jt.), kuid võrdsete massidega kehi, võime näha, et nende temperatuuri tõstmiseks antud kraadide arvu võrra on vaja erinevaid soojushulki. **Soojushulka, mis on vajalik keha soojendamiseks 1° võrra, nimetatakse antud keha soojusmahtuvuseks.**

Katse näitab, et keha soojendamiseks $t°$ võrra on vaja t korda rohkem soojust kui soojendamisel 1° *C* võrra. Jahtumisel $t°$ võrra annab keha ära niisama palju soojust, kui oli vaja tema soojendamiseks $t°$ võrra.

Mida suurem on keha mass, seda suurem on tema soojusmahtuvus, s. t. seda enam on vaja soojust tema soojendamiseks 1° *C* võrra. Homogeense keha soojusmahtuvus on võrdeline tema massiga ja sõltub ainest, millest keha koosneb.

Erinevate ainete soojusmahtuvust saab võrrelda, kui võtta neid massi poolest võrdsed hulgad (näiteks massi ühikud).

Ühikulise massiga keha soojusmahtuvust nimetatakse selle keha aine erisoojuseks.

Olgu Q soojushulk, mis on vaja anda kehale massiga m, et tõsta tema temperatuuri $t_1°$-st kuni $t_2°$-ni. Aine erisoojuse (c) leidmiseks on vaja soojushulk Q jagada keha massiga m ja temperatuuride vahega $t_2° - t_1°$.

Seega $c = \frac{Q}{m(t_2 - t_1)}$.

Erisoojus näitab, kui palju soojust on vaja ühikulise massiga keha soojendamiseks 1° C võrra.

Erisoojuse ühikuteks on[1] $\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}}$ või $\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{deg}}$,

SI-süsteemis aga vastavalt $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{deg}}$.

Vee erisoojus soojendamisel 19,5° C-st 20,5° C-ni on $1 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}}$.

SI-süsteemis on vee erisoojus $4186{,}8 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{deg}}$. Teistel temperatuuridel ta erineb $1 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}}$-st, kuid see erinevus on väga väike ja edaspidi me seda ei arvesta. Üldiselt muutuvad ainete erisoojused temperatuuri muutumisega vähe.

Arvutuste paljudel juhtudel kasutatakse keskmisi erisoojusi. Mõnede ainete erisoojused on antud järgmises tabelis:

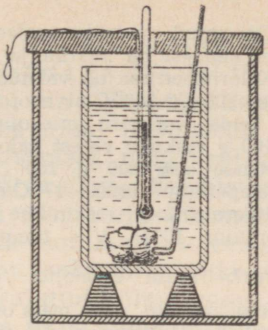
Erisoojuse tabel: $\left(\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}} \text{ või } \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{deg}}\right)$

Vesinik	3,41	Klaas	0,19
Heelium	1,26	Teemant	0,12
Piiritus	0,58	Raud	0,11
Eeter	0,56	Vask	0,09
Petrooleum	0,51	Hõbe	0,05
Jää	0,48	Elavhõbe	0,03
Õhk	0,24	Plaatina	0,03
Alumiinium	0,22	Plii	0,03

Teades aine erisoojust, võib valemi $Q = cm(t_2 - t_1)$ järgi arvutada soojushulka, mis on vajalik keha soojendamiseks.

152. Erisoojuse mõõtmine. Tahkete, vedelate ja gaasiliste ainete erisoojuse mõõtmiseks kasutatakse mitmesuguseid viise. Vaatleme tahkete ainete erisoojuse mõõtmise ühte lihtsamat viisi. Erisoojuse mõõtmiseks soojendatakse uuritav aine teatud temperatuurini ja lastakse ta siis erilisse riista — kalorimeetrisse, kuhu on valatud teatud hulk vett (joon. 273).

[1] GOST 8550-61 alusel kasutatakse Kelvini ja Celsiuse kraadides väljendatud temperatuuride vahe tähistamisel rahvusvahelist lühendit «deg».



Joon. 273. Seadis keha erisoojuse määramiseks kalorimeetri abil.

Kui kalorimeetris on vee temperatuur madalam kalorimeetrisse paigutatud keha temperatuurist, siis vesi soojeneb, kuid keha jahtub kuni temperatuuride võrdsustumiseni. Keha poolt antud soojushulk on võrdne soojushulgaga, mis läks üle kalorimeetrile ja selles olevale veele. See tõsiasi võimaldabki määrata keha erisoojust.

Olgu kalorimeetri mass m_1, tema erisoojus c_1, vee mass kalorimeetris m_2, vee erisoojus c, vee ja kalorimeetri algtemperatuur t_1, uuritava keha mass m, tema erisoojus c_x ja algtemperatuur t, lõpuks kogu kalorimeetri, vee ja keha üldine temperatuur Θ (kreeka täht «teeta»). Siis selle katse tulemust võime väljendada võrrandiga:

$$c_x m(t - \Theta) = c_1 m_1(\Theta - t_1) + c m_2(\Theta - t_1). \qquad (1)$$

See on **soojusliku tasakaalu** võrrand. See näitab, et soojuse vahetamisel uuritava keha ja kalorimeetri vahel on keha poolt antud soojushulk võrdne kalorimeetri poolt saadud soojushulgaga. Võrrandist (1) leitakse otsitav erisoojus:

$$c_x = \frac{c_1 m_1 (\Theta - t_1) + c m_2 (\Theta - t_1)}{m (t - \Theta)}.$$

Tuleb silmas pidada seda, et peale soojushulga vahetamist uuritava keha ja kalorimeetri vahel on võimalik soojuse vahetus keha ja kalorimeetrit ümbritsevate kehade vahel. Täpsetel mõõtmistel on vaja teha soojuskaod võimalikult väikseks ja arvutustes võtta arvesse see energia osa, mis on antud katse tegemise jooksul ümbritsevale keskkonnale.

Harjutus 60.

1. Kui palju on vaja soojust 425 g vee soojendamiseks 20° C võrra?
2. Mitme kraadi võrra soojeneb 5 kg vett, kui see vesi saab 40 kcal soojust?
3. Kui palju on vaja kaloreid, et m g vett temperatuuriga $t_1°$ soojendada temperatuurini $t_2°$?
4. Kalorimeetrisse on valatud 2 kg vett temperatuuriga 15° C. Missuguseks muutub vee temperatuur kalorimeetris, kui sinna lasta valgevasest 100° C-ni soojendatud kaaluviht massiga 500 g? Valgevase erisoojus on 0,088 $\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{deg}}$.

5. On antud ruumala poolest ühesugused vase-, alumiiniumi- ja tinatükid. Missugusel nendest on suurim ja missugusel väikseim soojusmahtuvus?

6. Kalorimeetrisse oli valatud 450 g vett temperatuuriga 20° C. Kui sellesse vette lasti 200 g 100° C-ni soojendatud rauapuru, siis vee temperatuur tõusis 24° C-ni. Leida rauapuru erisoojus.

7. 100 g raskune vasest kalorimeeter mahutab 738 g 15° C-st vett. Samasse kalorimeetrisse lasti 200 g 100° C-ni kuumendatud vaske, mille mõjul kalorimeetris temperatuur tõusis 17° C-ni. Leida vase erisoojus.

8. 10-grammine teraskuulike võeti ahjust ja lasti vette, mille mass oli 50 g ja temperatuur 10° C. Vee temperatuur tõusis 25° C-ni. Missugune oli ahju temperatuur? Terase erisoojus on 0,12 $\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}}$.

9. Raudkatlasse, mille mass on 1,5 kg, valatakse 5 kg vett. Kui palju on vaja kaloreid selleks, et katlas olevat vett soojendada 15° C-st 100° C-ni?

153. Vaadete arenemine soojuse olemusest. XVIII sajandil valitses arvamine, et soojus on eriline nähtamatu ja kaaluta vedelik, mis on võimeline minema ühest kehast teise. Seda vedelikku nimetati «flogistoniks», mis selle hüpoteesi pooldajate arvamisel pidi olema kõikides kehades.

Flogistoni hüpoteesi pooldasid omal ajal kuulsad teadlased — Newton, Lavoisier, Laplace, Gay-Lussac ja teised. Nimetus «soojusmahtuvus» võeti kasutamisele just sellepärast, et see viitas flogistoni olemasolule.

Sel ajal, kui suurem osa XVIII saj. teadlasi pooldas flogistoni olemasolu hüpoteesi, astus selle vastu M. V. Lomonossov. M. V. Lomonossov avaldas 1745. a. oma töö «Mõtisklused sooja ja külma põhjuste üle», mis algab järgmiselt: «On hästi teada, et soojust tekitatakse liikumisega; vastastikusest hõõrumisest soojenevad käed ja puu hakkab põlema; ränikiviga vastu terast lüües lendavad sädemed, raud hakkab hõõguma kiirete ja tugevate löökide all; nende lakkamisel väheneb soojus ja saadud tuli kustub... Kõigest sellest on täiesti ilmne, et on küllaldaselt alust soojust võtta liikumisena. Kuna aga mingit liikumist ilma materiata olla ei saa, siis on vajalik, et mingis materia liikumises oleks küllaldane soojuse alus.»

Lomonossovi järgi tekib kehades liikumise resultaadina soojus. Järelikult *soojuse olemus seisneb keha moodustavate osakeste liikumises.*

Lomonossovi õpetust soojuse olemuse kohta tunnustasid tema kaasaja suuremad õpetlased. Nii näiteks kirjutas tuntud matemaatik ja füüsik Euler Lomonossovile saadetud kirjas: «Igaüks teab, et tänaseni ilmunud traktaadid soojuse põhjuste kohta ei ole veel selgitanud täielikult seda asja, ja iga uurija, kes seda küsimust uurib, väärib suurimat kiitust. Teid ei saa tänamata jätta selle eest, et kaotasite kuni tänase päevani kestnud udu selle küsimuse ümbert.»

Lomonossovi töödest teadis ka tuntud itaalia füüsik Volta, kes 1786. aastal märkis «seda erilist teravmeelsust, kuidas härra Lomonossov omal ajal ümber lükkas flogistoni hüpoteesi». Edas-

pidise arengu ja katselise põhjenduse õpetusele soojuse olemuse kohta andsid inglise teadlaste Rumfordi ja Davy tööd.

Rumford kirjutas 1798. aastal: «Kui ma olin Münchenі arsenalis suurtükkide puurimise juures, siis mind hämmastas kõrge temperatuur, mille sai metall kiirel puurimisel, ning veel kõrgem metallilaastude temperatuur, mis oli kõrgem vee keemistemperatuurist.» Soovides lahendada flogistoni olemasolu küsimust, tegi Rumford rea katseid, millede juures ta hoolikalt isoleeris uuritava eseme teistest kehadest, et need ei saaks talle anda soojust. Ta puuris metallsilindreid, mis olid paigutatud külma veega täidetud kasti, ning veendus, et vesi hakkas varsti keema. «On raske kirjeldada juuresolijate nõutust ja hämmastust, kui nad nägid, et nii suur hulk vett oli pandud keema ilma tule abita.»

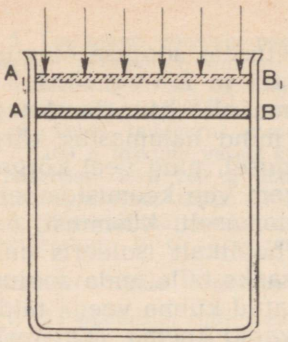
Rumford pani tähele, et mida rohkem töötas hobune, kes pani puuri liikuma, seda rohkem eraldus soojust. Selle vaatluse alusel ta järeldas, et «ei saa nimetada aineks seda, mida võib saada isoleeritud kehast piiramatul hulgal, ning ei saa soojust kujutleda teisiti kui mingit liikumist.»

Davy näitas 1802. aastal katseliselt, et kahe jäätüki hõõrdumisel tekib vesi, mille soojusmahtuvus on kaks korda suurem kui jää soojusmahtuvus. Seda katset Davy kordas, paigutades jäätüki õhupumba kupli alla. Ka sel puhul, vaatamata sellele, et jää ei võinud saada kusagilt «flogistoni», muutus ta veeks. Selle muutmise juures on aga vaja kulutada soojust. Vaatamata sellele, et Lomonossov, Rumford ja Davy veenvalt lükkasid ümber flogistoni olemasolu võimalusi, püsis flogistoni hüpotees veel kaua teaduses. Selle hüpoteesi paikapidamatuse tõestamiseks tuli teha uusi katseid, uut teaduslikku tööd.

154. Soojuse mehhaaniline ekvivalent. XIX sajandi alguses juurduvad laialt tööstuses ja transpordis aurumasinad. Samal ajal otsitakse võimalusi nende ökonoomsuse tõstmiseks. Sellega ühenduses seatakse füüsika ja tehnika ette suure praktilise väärtusega küsimus: kuidas väikseima kütuse kuluga saada masinas võimalikult rohkem mehhaanilist tööd.

Kõigepealt oli tarvis kindlaks teha, missugust tööhulka on võimalik saada antud soojushulga kulutamisel; teiste sõnadega, oli tarvis kindlaks teha soojuse mehhaaniline ekvivalent.

Esimese sammu selle küsimuse lahendamiseks tegi prantsuse insener Sadi Carnot (loe karnoo) 1824. aastal. 1842. aastal andis soojuse mehhaanilise ekvivalendi küsimuse teoreetilise lahenduse saksa teadlane Robert Mayer. Tema määras kindlaks, milline hulk mehhaanilist tööd tuleb teha, et saada soojushulka, mis on võrdne ühe kilokaloriga.



Joon. 274. Joonis soojuse mehhaanilise ekvivalendi teoreetilise arvestuse juurde.

Oma arvutuste aluseks võttis Mayer gaaside soojusmahtuvuste erinevuse. *Gaaside juures tehakse vahet kahe soojusmahtuvuse vahel: soojusmahtuvus jääva rõhu (c_p) ja soojusmahtuvus jääva ruumala juures (c_v).*

Soojusmahtuvust jääva rõhu juures mõõdetakse soojushulgaga, mis on vajalik antud gaasimassi soojendamiseks $1^\circ C$ võrra, muutmata tema rõhku.

Soojusmahtuvus jääva ruumala juures on arvuliselt võrdne soojushulgaga, mis on vajalik antud gaasimassi soojendamiseks $1^\circ C$ võrra, muutmata gaasi ruumala.

Iga gaasi soojusmahtuvus jääva rõhu juures on alati suurem sama gaasi soojusmahtuvusest jääva ruumala juures. Nii näiteks on õhu erisoojused c_p ja c_v järgmiste suurustega:

$$c_p = 0{,}2376 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{deg}}; \quad c_v = 0{,}1690 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{deg}}.$$

Gaaside soojusmahtuvuste erinevust seletatakse järgmiselt: gaaside soojendamisel j ä ä v a r u u m a l a juures suureneb gaasile antava soojuse arvel ainult gaasi siseenergia.

Gaaside soojendamisel j ä ä v a r õ h u juures aga suureneb gaasile antava soojuse arvel gaasi siseenergia samuti kui esimeselgi juhul, kuid peale selle teeb gaas veel paisudes tööd.

Jälgime Mayeri arutluste käiku.

Oletame, et anumasse (joon. 274) põhjapindalaga 1 m^2 on suletud 1 m^3 õhku, mille temperatuur on 0° ja rõhk 760 mm Hg. Anum on suletud kolviga AB_1 mille kaalu Mayer oma arutlustes ei arvestanud.

1 m^3 õhu mass on 1,293 kg. Kui soojendada seda õhku $1^\circ C$ võrra, siis ta paisub ning tõstab kolvi $\frac{1}{273}$ m = 0,00366 m võrra (asendisse A_1B_1).

Kolvi tõstmisel teeb anumas olev õhk tööd õhurõhu ületamiseks. Kuna õhurõhk on $1{,}0332 \frac{\text{kG}}{\text{cm}^2}$, siis jõud, mis mõjub kolvile ülevalt, on

$$1{,}0332 \frac{\text{kG}}{\text{cm}^2} \cdot 10^4 \text{ cm}^2 = 10\,332 \text{ kG}.$$

Selle jõu ületamiseks õhu poolt tehtud töö on 10 332 kG · 0,00366 m = = 37,82 kGm.

Soojushulk, mis on vajalik anumas oleva õhu soojendamiseks jääva rõhu juures, võrdub

$$0{,}2376 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{deg}} \cdot 1{,}298 \text{ kg} \cdot 1 \text{ kraad} = 0{,}3071 \text{ kcal}.$$

Sama hulga õhu soojendamiseks aga jääva ruumala juures on vajalik soojushulk: $0{,}1690 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{deg}} \cdot 1{,}298 \text{ kg} \cdot 1 \text{ kraad} = 0{,}2185 \text{ kcal}$.

Gaasi soojendamiseks jääva rõhu juures on vaja (0,3076 kcal — — 0,2185 kcal) = 0,0886 kcal võrra rohkem soojust. Selle soojushulga arvel tegi gaas tööd 37,82 kGm.

Mayeri arvestustest ilmnes, et 0,0886 kcal on ekvivalentne 37,82 kGm tööga. Sellest järgneb, et 1 kcal soojushulgaga ekvivalentne mehhaanilise töö hulk on:

$$\frac{37{,}82 \text{ kGm}}{0{,}0886 \text{ kcal}} \approx 427 \frac{\text{kGm}}{\text{kcal}}.$$

Soojushulga ühikuga ekvivalentset tööhulka nimetatakse soojuse mehhaaniliseks ekvivalendiks.

Soojuse mehhaanilise ekvivalendi suuruse katselist määramist toimetas esimesena ajavahemikul 1840.—1849. a. Joule (loe džaul). Üks tema populaarsemaid mehhaanilise ekvivalendi määramise viise seisis järgmises (joon. 275).

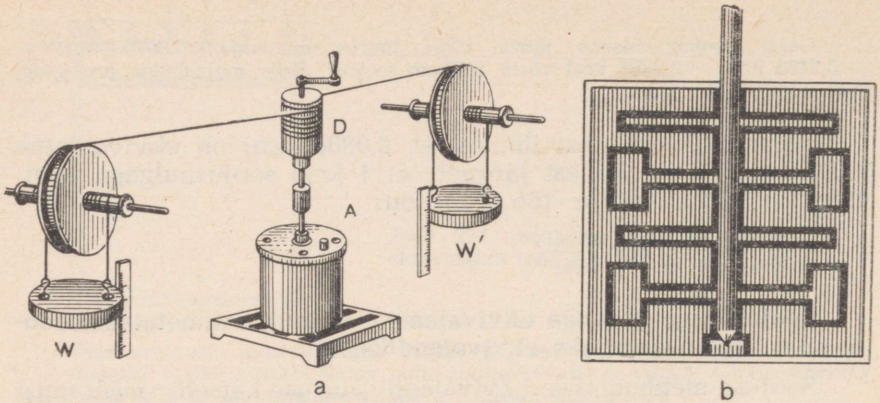
Kalorimeetris A (läbilõige on näidatud joonisel 275 *b*) oli vesi. Langevad koormused W ja W' panid pöörlema tiivakestega varustatud telje. Kalorimeeter on varustatud vaheseintega. Ta oli ehitatud nii sellepärast, et suurendada liikuva osa ja vee vahelist hõõret. Tiivakeste ja vee vahelise hõõrde tõttu vesi soojenes (kalorimeetri sees olevat temperatuuri mõõdeti termomeetri abil).

Kõrguse h ja koormuse massi m puhul arvestati tööd $A = mgh$. Temperatuuri tõusu järgi kalorimeetris ja vee, kalorimeetri ning tiivakeste teadaoleva massi M järgi arvutati soojushulk Q, mis eraldus kalorimeetri liikuva osa ja vee vahelisest hõõrdest. Selle suuruse võrra suurenes vee siseenergia.

Rohkearvulised katsed näitasid, et suurus, mida mõõdab töö A suhe soojushulgaga Q (selle soojushulga võrra suurenes vee

James Prescott Joule (1818—1889) — silmapaistev inglise füüsik, kellel on suuri teeneid energia jäävuse ja muundumise seaduse katselisel põhjendamisel.

Ta määras esimesena katseliselt soojuse mehhaanilise ekvivalendi. Avastas üheaegselt vene füüsiku E. H. Lenziga seaduse, mille abil arvutatakse elektrivoolu toimel juhtmes tekkinud soojushulka. Koos W. Thomsoniga avastas gaasi paisumisega kaasneva temperatuuri langemise nähtuse. Joule'i nime järgi nimetatakse tööhulga ühikut džauliks.



Joon. 275. Joule'i katse skeem soojuse mehhaanilise ekvivalendi määramiseks (*a*). Et vesi hakkaks tiivakestega kaasa liikuma, jaotati kalorimeeter vaheseintega osadeks. Tiivakeste läbipääsemiseks tehti vaheseintesse väljalõiked (*b*).

siseenergia) on jääv suurus. See suurus ongi soojuse mehhaaniline ekvivalent. Soojuse mehhaaniline ekvivalent tähistatakse tähega J:

$$J = 427\ \frac{\text{kG} \cdot \text{m}}{\text{kcal}} = 4{,}182\ \frac{\text{džaul}}{\text{cal}}.$$

Joule asendas vee elavhõbedaga ja sai sama tulemuse. Lõpuks asendas ta tiivakeste ja vee vahelise hõõrde ületamise töö kahe metallitüki vahelise hõõrde tööga. Mõõtmised andsid ka sel juhul niisama suure soojuse mehhaanilise ekvivalendi.

Teades soojuse mehhaanilist ekvivalenti, on kerge avaldada soojushulga ühikuid tööhulga ühikute kaudu:

$$1\ \text{cal} = 4{,}182\ \text{džauli, või}\ 1\ \text{kcal} = \frac{1}{860}\ \text{kilovatt-tundi.}$$

155. Energia jäävuse ja muundumise seadus. Vaatleme eespool kirjeldatud Joule'i katset lähemalt. Selles katses langevate koormuste potentsiaalne energia muundus pöörlevate tiivakeste kineetiliseks energiaks. Hõõrde ületamiseks tehtud töö kaudu muundus tiivakeste kineetiline energia vee siseenergiaks. Siin on meil tegemist energia liikide muundumise juhuga. Potentsiaalne energia muundub vee siseenergiaks ja soojushulk Q on siinjuures muundunud energia mõõduks. Niiviisi säilib potentsiaalse energia hulk tema muundumisel teisteks energia liikideks.

Tekib loomulikult küsimus: kas säilivad muundumisel ka teiste energia liikide (kineetiline, elektriline jt.) hulgad? Oletame, et lendab kuul, mille mass on m ja kiirus v. Tema kineetiline energia on $\frac{mv^2}{2}$. Kuul sattus esemesse, mille mass on M, ja jäi sinna peatuma. Kuuli kineetiline energia muundub seejuures kuuli siseenergiaks, mida mõõdab soojushulk Q ja mida omakorda

saame arvutada tuntud valemi abil (§ 151). Kui kineetilist energiat siseenergiaks muundumisel kaduma ei lähe, siis peab kehtima võrdus:

$$\frac{mv^2}{2} = Q,$$

kus kineetiline energia ja soojushulk on väljendatud samades ühikutes.

Katse kinnitab seda järeldust. Säilib ka kineetilise energia hulk.

Elektrivoolu läbimisel juht soojeneb: elektrienergia muundub juhi siseenergiaks. Katse näitab, et 1 kilovatt-tund elektrit annab töötades alati 860 kcal-se soojushulga. Seega säilib ka elektrienergia hulk. See järeldus kehtib kõikide energia liikide kohta.

Tuhandeaastane praktika näitas, et mitte ükski energia liik mitte kunagi ei teki mitte millestki. Seda seadust kinnitab *perpetuum mobile* ehitamise võimatus (vt. § 78). Rohkearvulised katsed ja kogemused näitavad samuti, et energia ei kao ühegi muundumise juures. Kõik loodusnähtused toimuvad kooskõlas energia jäävuse ja muundumise seadusega, mida formuleeritakse järgmiselt:

Üheski looduses toimuvas protsessis energia ei teki ega kao, vaid ainult muundub ühest liigist teiseks ühesugustes (ekvivalentsetes) hulkades.

Kõik energia vormid: kineetiline, potentsiaalne, elektromagnetiline, keemiline, aatomisisene jt., on võimelised muunduma üksteiseks.

Kõikide energiavormide muundumise võimalus põhjustabki loodusnähtuste rikkuse ja mitmekesisuse.

Selle suure ja tähtsa loodusseaduse illustreerimiseks vaatleme mõnda näidet.

Päikesekiired kannavad teatud hulga energiat. Langedes maapinnale, nad soojendavad teda. Päikesekiirte energia muundub seejuures maapinna ja maapinnal olevate kehade siseenergiaks. See antakse Maad ümbritsevale õhule; õhumassid hakkavad liikuma, tekib tuul — toimub muundumine mehhaaniliseks (kineetiliseks) energiaks. Üks osa päikesekiirte energiat neelatakse maapinnal taimede lehtede poolt. Seejuures tekivad taimedes keerukad keemilised reaktsioonid, mille tulemusena kujunevad orgaanilised ühendid — toimub muundumine keemiliseks energiaks.

§-s 135 ja §-s 136 räägiti liikuva vee energia kasutamisest. Liikuva vee energia tekib samuti päikese kiirgusenergia muundumise tulemusena. Lõpuks on tänapäeva teadusel võimalused muundada aatomisisene energia praktikas vajalikeks energia liikideks.

Energia jäävuse ja muundumise seadust kasutatakse laialt loodusnähtuste uurimisel. See seadus on samuti igasuguste tehnikaalaste arvutuste teaduslikuks aluseks.

Harjutus 61.

1. Teraskuulike kaaluga 50 G langeb 1,5 m kõrguselt kiviplaadile ja, põrgates sellelt, tõuseb 1,2 m kõrgusele. Miks kuulike ei tõusnud endisele kõrgusele? Kui palju mehhaanilist energiat muundus kuulikese ja plaadi siseenergiaks?
2. Klaasanumasse pumbati õhku 1,5 atmosfääri. Kraani avades tekkis anumas aur, mis näitab seda, et õhk jahtus. Miks jahtus õhk?
3. Missuguse tööhulgaga on ekvivalentne 1 kg söe ärapõlemisel tekkinud soojushulk?

Söe kütteväärtus $q = 7000 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$.

4. Kui suurele soojushulgale vastab hobuse töö, kes veab vagoneti 40 m kaugusele, rakendades seejuures jõudu 50 kG?
5. Kui palju soojust eraldub, kui mitteelastne keha massiga 50 kg langeb 4 m kõrguselt?
6. Kui palju on vaja sütt tunnis 1 hj kohta, kui masina kasutegur on 20%?
7. Kui palju on vaja naftat 6 päeva pikkuseks reisiks aurulaevaga, kui laevamasin on võimsusega 40 000 hj ja töötab kasuteguriga 20%? Nafta kütteväärtus on 11 000 kcal/kg.
8. Kui palju soojust eraldub 4,9 kG raskuse vasara löögist alasil asuva eseme pihta, teades, et vasara kiirus löögi momendil on 6 m/s?
9. Kui palju on vaja 1500 hj võimsusega vedurile sütt 200 km pikkuseks sõiduks kiirusega 40 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$? Veduri kasutegur on 10%?

XIII PEATÜKK.

TAHKETE JA VEDELATE KEHADE SOOJUSPAISUMINE.

156. Keha ruumala sõltuvus temperatuurist. Tahke keha molekulid on üksteise suhtes kindlates asendites, kuid nad ei püsi paigal, vaid võnguvad. Keha soojenemisel suureneb molekulide keskmine liikumiskiirus. Sellest tingituna suurenevad molekulide keskmised kaugused ja vastavalt sellele suurenevad keha joonmõõtmed, järelikult suureneb ka keha ruumala.

Keha jahtumisel keha joonmõõtmed vähenevad, samuti väheneb keha ruumala.

Teatavasti paisuvad soojenemisel kõik kehad ja jahtumisel tõmbuvad kokku. Nende nähtustega tutvusime kvalitatiivsest küljest juba füüsika algkursuses.

Meie ülesanne on nüüd tutvuda nende nähtuste kvantitatiivsete seadustega.

157. Tahkete kehade joonpaisumine. Tahkel kehal on antud temperatuuri juures kindel kuju ja ka kindlad joonmõõtmed. Keha joonmõõtmete suurenemist soojenemisel nimetatakse keha soojuslikuks joonpaisumiseks ehk termiliseks joonpaisumiseks.

Mõõtmised näitavad, et üks ja sama keha paisub erinevate temperatuuride juures erinevalt — kõrgema temperatuuri juures tavaliselt rohkem kui madalama temperatuuri juures. Kuid see paisumise erinevus on niivõrd väike, et suhteliselt väikeste temperatuurivahemike ulatuses võime seda jätta arvestamata ja pidada keha mõõtmete juurdekasvu (muutust) võrdeliseks temperatuuri juurdekasvuga.

Füüsika algkursuses tehti kindlaks, et erinevad ained paisuvad soojenemisel erinevalt, ühed rohkem, teised vähem. Näiteks raud paisub rohkem kui klaas ja vähem kui vask.

Et kvantitatiivselt iseloomustada seda tähtsat kehade termilist omadust, võtame kasutusele erilise suuruse, mida nimetatakse joonpaisumise koefitsiendiks.

Olgu tahkel kehal $0^\circ C$ juures pikkus l_0, kuid temperatuur t° juures l_t Järelikult temperatuuri muutumisel t° võrra suureneb keha pikkus $l_t - l_0$ võrra. Eeldades, et pikkuse suurenemine iga kraadi kohta toimub ühtlaselt, leiame, et soojenemisel $1^\circ C$ võrra keha kogupikkus suurenes $\frac{l_t - l_0}{t}$ võrra ja iga pikkusühik

$\beta = \frac{l_t - l_0}{l_0 t}$ ... (1) võrra. Suurust β (kreeka täht «beeta»), mis iseloomustab aine termilist joonpaisumist, nimetatakse aine joonpaisumise koefitsiendiks.

Valem (1) näitab, et kui $t = 1° C$ ja $l_0 = 1$ pikkusühik, siis β on võrdne vahega $l_t - l_0$, s. t. *joonpaisumise koefitsient on arvuliselt võrdne pikkuse juurdekasvuga, mis varras saab soojendamisel 1° C võrra, kui varda algpikkus 0° C juures on üks pikkusühik.*

Valemist (1) järgneb, et paisumise koefitsiendi nimetuseks on $\frac{1}{\text{deg}}$. Valemit (1) võib kirjutada järgmisel kujul:

$$l_t = l_0(1 + \beta t).$$

Siit on kerge arvutada keha pikkust mistahes temperatuuri juures, kui on teada ta algpikkuse ja joonpaisumise koefitsient.

Allpool toodud tabelis on antud mõnede ainete katseliselt määratud joonpaisumise koefitsiendid.

Aine	Joonpaisumise koefitsient	Aine	Joonpaisumise koefitsient
Valgevask	0,000018	Klaas	0,000009
Vask	0,000017	Invar (sulam, milles on 63,2% *Fe*, 36,1% *Ni*, 0,39% *C* ja 0,39% *Mn*)	0,0000015
Raud	0,000012		
Plaatina	0,000009	Kvarts-klaas	0,0000005

158. Tahkete kehade ruumpaisumine. Tahke keha mõõtmete suurenemisega soojuspaisumisel suureneb ka keha ruumala. Analoogiliselt joonpaisumise koefitsiendiga võib kasutusele võtta ruumpaisumise koefitsiendi. Katse näitab, et samuti nagu joonpaisumist võib ka ruumpaisumist ilma suurema veata pidada võrdeliseks temperatuuri tõusuga.

Tähistades keha ruumala 0° C juures V_0-ga, ruumala $t°$ juures V_t-ga ja ruumpaisumise koefitsiendi α-ga, saame

$$\alpha = \frac{V_t - V_0}{V_0 t}. \qquad (1)$$

Kui $V_0 = 1$ ruumalaühik ja $t = 1° C$, siis α on võrdne $V_t - V_0$-ga, s. o. *ruumpaisumise koefitsient on arvuliselt võrdne ruumala juurdekasvuga keha soojendamisel 1° C võrra, kui keha ruumala 0° juures oli võrdne ruumalaühikuga.*

Teades keha ruumala 0° C juures, võime valemi (1) abil arvutada ruumala mistahes temperatuuri $t°$ juures.

$$V_t = V_0(1 + \alpha t).$$

Teeme kindlaks ruum- ja joonpaisumise koefitsientide vahelise seose.

Oletame, et meil on kuup, mille serv $0^\circ C$ juures on 1 cm. Soojendamisel $1^\circ C$ võrra muutub serv võrdseks $1 + \beta$ cm ja kuubi ruumala suureneb α cm^3 võrra.

Võime kirjutada järgmise võrduse:

$$1 + \alpha = (1 + \beta)^3, \text{ kuid } (1 + \beta)^3 = 1 + 3\beta + 3\beta^2 + \beta^3.$$

Selles valemis on β^2 ja β^3 nii väikesed, et neid võib ära jätta ja kirjutada: $1 + \alpha = 1 + 3\beta$ või $\alpha = 3\beta$.

Tahke keha ruumpaisumise koefitsient võrdub tema kolmekordse joonpaisumise koefitsiendiga.

159. Soojuspaisumise arvestamine tehnikas. Tabelist on näha, et tahkete kehade joonpaisumise koefitsiendid on väga väikesed, järelikult, kehade soojendamisel on mõõtmete muutused väikesed. Kuid need väikesed paisumised põhjustavad siiski suurte jõudude tekkimist. Katse näitab, et tahke keha vähesekski pikendamiseks on tarvis hiiglasuurt välist jõudu. Näiteks tuleb rakendada 1 cm^2 ristlõikega raudvarda algpikkuse suurendamiseks 0,0004 algpikkuse ühiku võrra 1000 kG suurust jõudu. Soojendamisel $50^\circ C$ võrra pikeneb see varras niisamapalju, s. t. varras avaldab kehadele, mis takistavad tema paisumist, rõhku 1000 $\frac{kG}{cm^2}$.

Tehnikas arvestatakse tahkete kehade soojuspaisumisel tekkivate tohutute jõududega. Nii näiteks kinnitatakse sild ainult ühest otsast, teine seisab rullidel; raudteeröövbaste paigaldamisel jäetakse nende otste vahele väike vahe; aurutorustik riputatakse üles konksudele ja üksikute torude vahele paigutatakse kompensaatorid, mis võtavad vastu torustiku paisumise sel teel, et painduvad aurutorustiku pikenemisel. Samal põhjusel kinnitatakse veduri katel ühest otsast, teine aga võib vabalt liikuda.

Tohutu tähtsusega on soojuspaisumine täpsetel mõõtmistel. Kui mastaapjoonlaud või kaliiber, millega kontrollitakse valmis masinaosa, muudab tunduvalt oma suurust, siis vajalikku täpsust mõõtmisel ei saada. Jämedate vigade vältimiseks mõõtmistel või valmistoodete mõõtmete kontrollimisel tuuakse need aegsasti ruumi, kus toimub mõõtmine, selleks et toodete temperatuur saaks võrdseks kaliibrite temperatuuriga. Kaliibrid ja mõõteriistad ise aga tehakse väga väikese paisumiskoefitsiendiga materjalist. Sääraseks materjaliks on näiteks eriline raudnikkelteras — invar, mille paisumiskoefitsient on 0,0000015. Nagu eespool toodud tabelist näha, on plaatina ja klaas võrdsete paisumiskoefitsientidega, mille tõttu võib plaatinat klaasiga kokku sulatada. Pärast jahtumist ei toimu nende ainete sidestuse nõrgenemist ega klaasi pragunemist.

Elektrilampides sulatatakse klaasi sisse raudnikkeltraat, millel on niisama suur joonpaisumise koefitsient kui klaasilgi. Tähele-

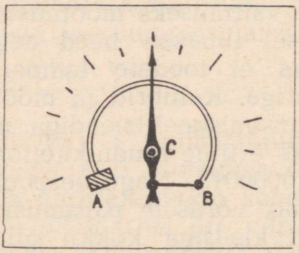
panuvääriv on kvartsklaasi väga väike paisumiskoefitsient. Niisugune klaas kannatab välja ebaühtlase soojendamise ja jahutamise — ta ei mõrane ega purune seejuures.

Nii näiteks võib hõõguvasse kvartsklaasist kolbi valada külma vett, kuna harilikust klaasist kolb sellise katse juures puruneb. See kvartsklaasi omadus tuleneb tema paisumiskoefitsiendi väiksusest.

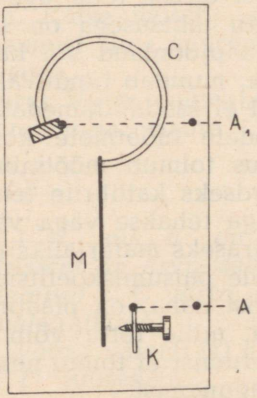
159 a. Termoregulaator. Kaks ühesuurust erinevatest metallidest, näiteks terasest ja valgevasest kokkuneeditud plaati moodustavad niinimetatud bimetallplaadi. Soojendamisel niisugused plaadid kaarduvad. See plaatidest, mille paisumine on suurem, jääb kaardumisel väljapoole. Seda bimetallplaadi omadust kasutatakse laialt temperatuuri mõõtmisel ja reguleerimisel.

1. Metalltermomeeter. See riist kujutab endast kaarekujulist bimetallriba (joon. 276 *a*), mis on otsast *A* kinnitatud ja vabalt liikuv ots on punktis *B* ühendatud osutiga. Temperatuuri muutudes keerdub kaar kokku või lahti ja sellega vastavalt liigutab osutit. Skaalat gradueeritakse hariliku termomeetri järgi. Kui osuti otsale kinnitada sulg, siis võib temperatuuri kõikumised üles kirjutada spetsiaalsele paberilindile. Sellel printsiibil on ehitatud termograaf.

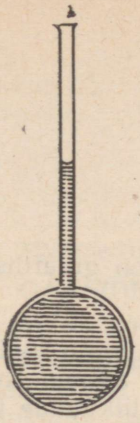
2. Termostaat. Nii nimetatakse riista, mille abil saavutatakse temperatuuri muutumatus. Joonisel 276 *b* on kujutatud temperatuuri reguleerija ehituse printsiip. Bimetallist spiraal *C* keerdub temperatuuri muutudes vastavalt kokku või lahti. Vabale otsale on kinnitatud plaat *M*, mis lahtikeerdumisel puudutab kontakti *K*, kuid kokkukeerdumisel eemaldub sellest. Kui näiteks kontakt *K* ja plaat *M* on ühendatud soojendusriista sisaldava elektrivoolu ahela AA_1 otstega, siis *M* ja *K* kokkupuutumisel lülitub vool ahelasse ja soojendusriist hakkab ruumi soojen-



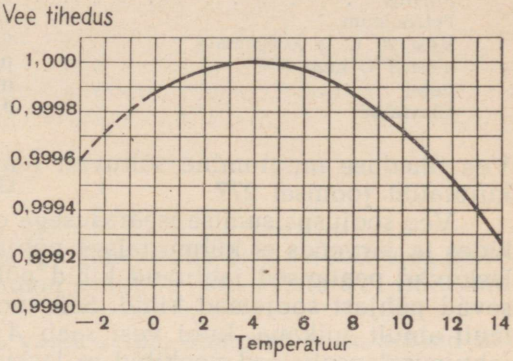
Joon. 276 *a*. Metalltermomeetri skeem.



Joon. 276 b. Skeem temperatuuri reguleerimiseks bimetallplaadiga.



Joon. 276 *c*. Vedeliku ruumpaisumise koefitsiendi määramise riist.



Joon. 277. Vee tiheduse muutumise graafik, sõltuvalt temperatuurist.

dama. Bimetallspiraal *C* hakkab soojendamisel kokku keerduma ja kindlaksmääratud temperatuuri juures eemaldab plaadi *M* kontaktist *K*. Seega on vool katkestatud ja soojenemine lakkab. Jahtumisel keerdub spiraal *C* lahti ja uuesti lülitab ahelasse soojendusriista. Niiviisi hoitakse ruumis temperatuuri soovitaval kõrgusel.

160. Vedelike soojuspaisumine. Vedelike juures on mõtet kõnelda ainult ruumpaisumisest. Vedelikel on see tunduvalt suurem kui tahketel kehadel. Nagu näitab katse, väljendub vedeliku ruumala sõltuvus temperatuurist samasuguse valemi abil nagu tahkete kehade juureski.

Kui $0^\circ C$ juures on vedeliku ruumala V_0, siis t° juures tema ruumala:

$$V_t = V_0 (1 + \alpha t).$$

Vedeliku ruumpaisumise koefitsiendi mõõtmiseks kasutatakse termomeetrikujulist klaasanumat (joon. 276 *c*), mille ruumala on teada. Toruga varustatud õõnes klaaskera täidetakse ääreni vedelikuga ja soojendatakse seda teatud kindla temperatuurini. Seejuures voolab osa vedelikku anumast välja. Pärast seda jahutatakse klaaskera sulavas jääs kuni $0^\circ C$-ni. Näeme, et vedelik enam ei täida kogu anumat: tühi ruum näitab, kui palju vedelik paisus soojendamisel. Teades klaasi paisumiskoefitsienti, võib päris täpselt välja arvutada ka vedeliku ruumpaisumise koefitsiendi.

Vesi soojenemisel paisub erinevalt teistest vedelikest. Kui soojendada vett $0^\circ C$-st alates, siis näeme, et soojendamisel kuni $4^\circ C$-ni ta ei paisu, vaid tõmbub kokku. Soojendamisel üle $4^\circ C$ vesi hakkab paisuma. Vee suurim tihedus $1 \frac{g}{cm^3}$ on $4^\circ C$ juures.

Mõnede vedelike ruumpaisumise koefitsiendid.

Piiritus	0,00110
Petrooleum	0,00100
Vesi 20° *C* ja kõrgemale	0,00020
Vesi 5° *C* kuni 8° *C*	0,00002
Eeter	0,00166
Elavhõbe	0,00018

Vee tiheduse muutumine sõltuvalt temperatuurist on graafiliselt kujutatud joonisel 277.

Vee soojuspaisumise iseärasusega on seletatav see, et vesi tiikides ja järvedes ei külmu talvel põhjani. Vee jahtumisel sügisel laskuvad pealmised jahtunud kihid põhja ja nende asemele tõusevad põhjast soojemad kihid. Säärane veekihtide liikumine toimub ainult niikaua, kuni vesi saab 4° *C* temperatuuri. Edasisel jahtumisel pealmised veekihid ei lasku enam alla, vaid järk-järgult jahtudes külmuvad.

Harjutus 62.

1. 10 m pikkune aurujuhtimise terastoru soojeneb 0° *C*-st 100° *C*-ni. Kui palju muutub seejuures toru pikkus?
2. Termomeetri soojenemisel suureneb elavhõbedat mahutav klaasi õõs. Miks elavhõbedasammas termomeetris siiski tõuseb?
3. Mõõdukolb, mida nimetatakse püknomeetriks, mahutab 0° *C* juures 340 g ja 100° *C* juures 335 g elavhõbedat. Määrata nende andmete põhjal kolvi aine paisumiskoefitsient.
4. Avaldada keha tihedus D temperatuuril t 0° *C* juures oleva tiheduse D_0 kaudu.

XIV PEATÜKK.

GAASIDE OMADUSED.

161. Gaaside rõhumine. Iga gaas rõhub kestale, mis teda ümbritseb. Gaasi rõhumine anuma seintele on seletatav liikuvate molekulide löökidega.

Gaasi molekulid, lüües vastu seina, annavad edasi teatud liikumishulga; sein on sel puhul jõu mõju all.

Üksiku molekuli löök vastu anuma seina kutsub esile väga väikese mõju. Kuid gaasi molekule on väga palju, löögid vastu anuma seina toimuvad pidevalt ja selle tulemusena tekib tunduv rõhk.

Molekulide liikumise korrapäratus põhjustab igas suunas ühtlase gaasi rõhumise.

Soojendamisel gaasi rõhumine suureneb. Kuna aga gaasi molekulide arv soojenemisel ei suurene, siis gaasi rõhumise suurenemist võib seletada ainult sellega, et molekulide löögid vastu anuma seina muutuvad tihedamaks ja iga löök tugevamaks. Löögid aga võivad olla tihedamad ja tugevamad siis, kui suureneb molekulide kiirus. Seda kinnitavad, nagu me nägime (peatükk XI), paljud katsed.

162. Gaasi ruumala ja rõhu vaheline sõltuvus. Boyle-Mariotte'i seadus. Gaasi olek on määratud tema ruumala, rõhu ja temperatuuriga. Nende suuruste muutumisega muutub ka gaasi olek. Vaatleme järjekorras protsesse, millede juures üks gaasi olekut iseloomustav suurus on jääv, kuid kaks teist muutuvad.

Algame protsessidega, millede juures rõhk ja ruumala muutuvad, kuid temperatuur jääb muutumatuks. Neid protsesse nimetatakse i s o t e r m i l i s t e k s[1].

Niisiis vaatleme, kuidas muutub antud gaasimassi rõhk tema ruumala muutudes, jättes gaasi temperatuuri muutmata.

Katseid, millega saab leida seda sõltuvust, võib teha riistaga, mille kolm asendit on kujutatud joonisel 278. Selles riistas klaastoruke *A* on ühendatud kummitorukese abil teise klaastorukesega *B*. Toruke *A* on ülemises otsas varustatud kraaniga *a*. Mõlemad torukesed on täidetud elavhõbedaga.

Avame kraani *a* ja paigaldame torukesed *A* ja *B* nii, et elavhõbe torus *A* oleks seisnud keskel (asend I). Mõlemas torukeses

[1] Kreekak. sõnadest *isos* — ühesugune, *therme* — soe.

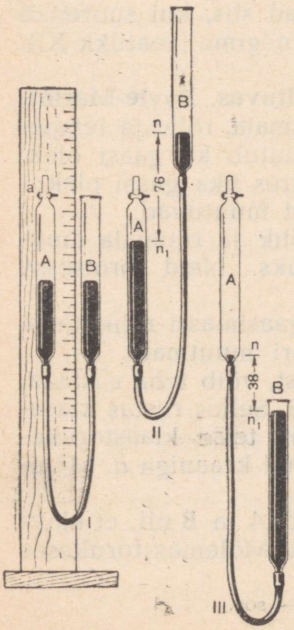
on rõhk elavhõbeda peal ühe atmosfääri suurune; oletame, et ta võrdub 76 cm Hg. Sulgedes kraani *a*, me eraldame seega torukeses *A* oleva õhuhulga atmosfääri õhust. Niiviisi on meil katse selles staadiumis torukeses *A* kindel õhu hulk, mis on rõhu all $p_1 = 76$ cm Hg.

Tõstame nüüd torukese *B* üles niipalju, et õhu ruumala torukeses *A* väheneks kaks korda (asend II). Elavhõbeda nivoo torukeses *B* tõuseb märgatavalt kõrgemale torukese *A* nivoost.

Vaatleme nüüd, kui suur on õhuhulga rõhk torukeses *A*. Selle õhuhulga rõhku tasakaalustab õhurõhk ja kogu elahõbedasamba rõhk torukeses *B*, mis seisab kõrgemal nivoost n_1; selle samba nn_1 kõrgus on aga 76 cm. Seega tasakaalustab rõhk torukeses *A* mitte ühte, nagu esimesel juhul, vaid kahte atmosfääri ($p_2 = 2$ at).

Tähendab, vähendades antud gaasihulga ruumala kaks korda, suurendame tema rõhku kaks korda. Kui vähendada gaasi ruumala 1,5; 2,5; 3 korda, siis suureneb tema rõhk vastavalt 1,5; 2,5; 3 korda.

Langetame torukese *B* nii, et õhu hulk torukeses *A* oleks ruumalalt kaks korda suurem (asend III). Seejuures alaneb elavhõbeda nivoo torukeses *A*. Ühte atmosfääri tasakaalustab nüüd torukeses olev rõhk ja elavhõbedasammas nivoolt *n* anumas *A* kuni nivooni n_1 anumas *B*. Mõõtmised näitavad, et selle elavhõbedasamba kõrgus on 38 cm. Torukeses *A* oleva õhurõhu leiame, kui lahutame atmosfääri rõhust elavhõbedasamba rõhu: $p_3 = 76$ cm Hg — 38 cm Hg = 38 cm Hg = 0,5 at, järelikult $p_3 = 0{,}5$ at. Seega gaasi ruumala suurendamisel kaks korda tema rõhk väheneb kaks korda.



Joon. 278. Riist, mille abil saab näidata gaasi ruumala ja rõhu vahelist sõltuvust.

Asetades torukese *B* mitmesugustesse asenditesse ja igakordselt arvestades torukeses *A* oleva õhu ruumala ja rõhku, võime järeldada: *uuritava õhuhulga ruumala vähendamisel mingi arv korda suureneb rõhk sama arv korda* (ja ümberpöördult).

Kõikide katsete juures jääb õhu temperatuur muutumatuks.

Teiste gaasidega korraldatud katsed andsid samad tulemused.

Inglise teadlane Boyle (loe boil) (1627—1691) ja prantsuse teadlane

Mariotte (loe mariott) (1620—1684), uurides kumbki omaette katseliselt gaasi rõhu sõltuvust ruumalast, leidsid järgmise seaduse.

Jääval temperatuuril on antud gaasihulga rõhk pöördvõrdeline ruumalaga.

Seda seadust nimetatakse Boyle-Mariotte'i seaduseks. Avaldame Boyle-Mariotte'i seaduse matemaatiliselt. Olgu mingi gaasihulga temperatuur jääv ja olgu

V_1 gaasi ruumala rõhu p_1 juures ja

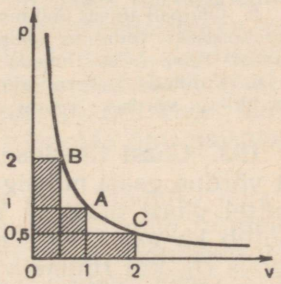
V_2 gaasi ruumala rõhu p_2 juures.

Vastavalt Boyle-Mariotte'i seadusele võime kirjutada:

$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p_2}{p_1}$. Sellest valemist järgneb: $p_1V_1 = p_2V_2$.

Nii saame Boyle-Mariotte'i seaduse uue väljenduse.

Jääva temperatuuri juures on antud gaasihulga ruumala ja rõhu korrutis jääv suurus.



Joon. 279. Isotermilise protsessi graafik.

Kujutame gaasi oleku isotermilise muutumise graafiliselt. Selleks kanname abstsissteljele ruumala väärtused ja ordinaatteljele vastavad rõhu väärtused. Valime mastaabi nii, et esialgsed rõhu ja ruumala väärtused oleksid võrdsed 1-ga. Siis gaasi algruumala kujutab punkt *A* (joon. 279). Kui rõhk suureneb kahekordseks, siis ruumala väheneb kaks korda ja gaasi olekut kujutab graafikul punkt *B*. Algrõhu vähenemisel kaks korda suureneb ruumala kahekordseks, saame punkti *C*. Võttes edaspidi rõhud kolm, neli jne. korda suurematena või väiksematena algrõhust ning ruumalad vastavalt kolm, neli jne. korda väiksematena või suurematena, saame punktide rea, mis iseloomustab ühe ja sama gaasihulga olekuid muutumatu temperatuuri juures. Ühendades need punktid kõverjoonega, saame isotermilise kõverjoone ehk i s o t e r m i. Täpsemad uurimised näitavad, et gaasid ei allu täiesti Boyle-Mariotte'i seadusele. Nii näiteks, kui korrutis pV on 1 at juures võrdne ühikuga, siis 2 at juures on tal järgmised väärtused:

Õhu	jaoks	0,99977
Vesiniku	„	1,00026
Vingugaasi	„	0,99974
Süsihappegaasi	„	0,99720

Suurte rõhkude juures (sajad ja tuhanded atmosfäärid) on Boyle-Mariotte'i seadus rakendamiseks täiesti kõlbmatu. Sellisel juhul tuleb kasutada keerukamaid võrrandeid (neid õpitakse kõrgemas õppeasutuses).

Harjutus 63.

1. 1 at rõhu juures on gaasi ruumala 10 l. Kui suur on selle gaasi ruumala 5 at rõhu juures? Temperatuurid on mõlemal juhul ühesuurused.
2. Gaasipudelis on 10 l gaasi 20 at rõhu all. Kui suure ruumala võtab enda alla see gaas, kui avada pudeli ventiil, muutmata seejuures temperatuuri?
3. Kaks pudelit on ühendatud kraaniga varustatud torukese abil. Ühes pudelis, mille ruumala on 5 liitrit, on õhk 3 at rõhu all, teine pudel, mille ruumala on 1 l, on tühi. Missugune rõhk tekib mõlemas pudelis, kui avada kraan? (Kraaniga varustatud torukese ruumala mitte arvestada.) Katse kestel on temperatuur muutumatu.
4. Jalgpalli, mille ruumala on 2,5 l, pumbatakse käsipumbaga õhku. Pumba iga löögiga surutakse palli õhu hulk, mille ruumala 1 at juures on 125 cm^3. Kui suure rõhu all on õhk pallis, kui kokku on tehtud 40 tõuget ja pall algul oli tühi? Temperatuur lugeda konstantseks.
5. Õhupall tõusis 760 mm Hg rõhu juures õhukihti, kus rõhk oli 500 mm Hg. Mitmekordseks suurenes gaasi ruumala õhupallis? Õhupall on tehtud elastsest kummist. Temperatuur lugeda konstantseks.
6. Kujutada isoterm $pV = 8$ at $\cdot$ cm^3, võttes ruudulisel paberil ruumala ja rõhu ühikud võrdseks ruudu küljega.

163. Gaasi tiheduse sõltuvus rõhust. Gaasi tihedus on arvuliselt võrdne gaasi massiga ühes ruumala ühikus. Rõhumisel ja paisumisel gaasi mass ei muutu, kuid ruumala muutub, järelikult muutub ka gaasi tihedus. Olgu jääva temperatuuri juures gaasi tihedus D_1, kui ruumala on V_1 ja rõhk p_1, ning gaasi tihedus D_2, kui ruumala on V_2 ja rõhk p_2.

Kui gaasi mass on m, siis võib kirjutada:

$D_1 = \frac{m}{V_1}$; $D_2 = \frac{m}{V_2}$, millest

$\frac{D_1}{D_2} = \frac{V_2}{V_1}$. Kuid Boyle-Mariotte'i seaduse põhjal on

$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2}$. Seega saame

$\frac{D_1}{D_2} = \frac{p_1}{p_2}$, s. t. *jääva temperatuuri juures on gaasi tihedus võrdeline tema rõhuga.* Pole raske aru saada selle järelduse õigsusest, kui lähtuda molekulaar-kineetilisest teooriast. Gaasi rõhk on tõeliselt tingitud tema molekulide löökidest. Kui gaasi ruumala väheneb kaks korda, siis gaasi tihedus muutub kahekordseks. Kahekordselt suureneb molekulide löökide arv vastu seina, s. t. rõhk suureneb kaks korda.

Harjutus 64.

1. Kuidas muutub õhumulli ruumala, kui mullike tõuseb veemahuti põhjast vee pinnale?

2. Miks kõrgele mäele tõus on sagedasti seoses valuga ja verejooksuga kõrvadest ning ninast?

3. 100 m^3 vesinikku, mis on normaalse rõhu all, surutakse 5 m^3 ruumalaga terasballooni. Leida rõhk balloonis kG/cm^2.

4. Autokummi, mille ruumala on 25 000 cm^3, pumbati õhk kuni 8 kG/cm^2 rõhuni. Leida õhu tihedus ja kaal kummis, kui õhu tihedus on 760 mm Hg juures 0,00129 $\frac{g}{cm^3}$.

5. Vette lastud tuukrikellas on veepind 1033 cm madalam vee üldisest nivoost. Leida õhu tihedus tuukrikellas, lugedes õhu kokkusurumise protsessi isotermiliseks. Õhu tihedus veepinnal on 0,00129 $\frac{g}{cm^3}$.

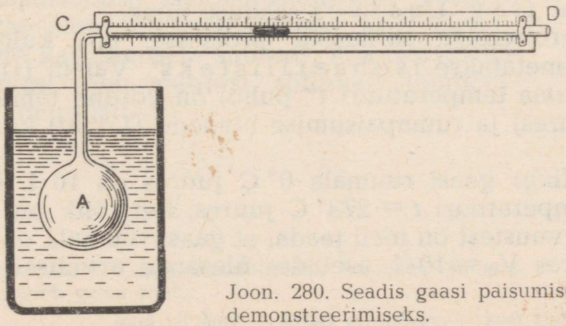
164. Gaasi ruumala sõltuvus temperatuurist. Gay-Lussac'i seadus. Nii nagu kõik kehad, paisuvad ka gaasid soojenemisel. Seda võib tähele panna isegi vähesel soojenemisel. Näidata saab seda järgmise lihtsa katsega (joon. 280).

Kolb *A* ühendatakse horisontaalselt asetatud torukesega *CD*, mis on kinnitatud piki skaalat. Torukeses on väike elavhõbedatilgake. Piisab kolvi puutumisest käega, et elavhõbedatilgake hakkaks torukeses *CD* liikuma. Jahutades kolbi *A*, liigub elavhõbedatilgake vasakule, soojendades aga paremale. Järelikult tõmbub gaas jahenedes kokku ja paisub soojenedes. Teades kolvi mahtu ja torukese läbimõõtu, võib mitte ainult vaadelda õhu paisumist, vaid ka mõõta õhu ruumpaisumist.

Õhku järk-järgult kolvis soojendades võib kindlaks teha, et konstantsel rõhul on antud gaasimassi ruumpaisumine võrdeline temperatuuri suurenemisega. Seetõttu võib gaasi soojuspaisumist iseloomustada, samuti nagu teiste kehade soojuspaisumistki, ruumpaisumise koefitsiendi abil.

Olgu 0° *C* temperatuuri juures õhu ruumala V_0, kuid temperatuuri t juures — V_t. Iga ruumalaühiku kohta tulev ruumala juurdekasv, mis on võetud soojenemisel ühe kraadi võrra, on võrdne:

$$\alpha = \frac{V_t - V_0}{V_0 t}, \text{ millest } V_t = V_0(1 + \alpha t). \quad (1)$$



Joon. 280. Seadis gaasi paisumise demonstreerimiseks.

Suurust α nimetatakse gaasi ruumpaisumise koefitsiendiks.

Prantsuse teadlane Gay-Lussac (loe gelüssak), uurides katseliselt gaaside soojuspaisumist, tegi kindlaks, et **konstantse rõhu puhul on kõikidel gaasidel ruumpaisumise koefitsiendid ühesuurused ja arvuliselt võrdsed** $\frac{1}{273}$. Selles suhtes erineb gaaside paisumine soojenemisel tahkete kehade ja vedelike paisumisest, kus, nagu me nägime (vaata § 159 ja § 160), sõltub paisumiskoefitsient keha koostisest.

Võtame valemi (1) $t = 1^\circ C$, $\alpha = \frac{1}{273}$; saame: $V_t = V_0 + \frac{1}{273}V_0$, millest järgneb, et **antud gaasimassi ruumala suureneb 1° võrra soojenemisel jääva rõhu all** $\frac{1}{273}$ **võrra sellest ruumalast, mis tal oli 0° C juures.**

Gay-Lussac, Joseph Louis (1778—1850) — üks silmapaistvamatest prantsuse keemikutest ja füüsikutest. Ta avastas rea tähtsaid keemilisi ja füüsikalisi seadusi, milledest on füüsikas laialt tuntud tema nime kandev seadus.

See seadus sai Gay-Lussac'i seaduse nime.

Vaadeldud protsessiga sarnaseid protsesse, mis kulgevad jääva rõhu all, nimetatakse isobaarilisteks[1]. Valem (1) näitab, et gaasi ruumala temperatuuri t° puhul on võrdne tema algruumala ($0^\circ C$ juures) ja ruumpaisumise binoomi $(1 + \alpha t)$ korrutisega.

Näide 1. Mingi gaasi ruumala $0^\circ C$ juures on 10 l. Leida tema ruumala temperatuuri $t = 273^\circ C$ juures, kui rõhk on jääv.

Ülesande tingimustest on meil teada, et gaasi ruumala on $0^\circ C$ temperatuuri juures $V_0 = 10$ l, asetades ülesande arvulised and-

[1] Kreekak. sõnadest *isos* — võrdne ja *baros* — raskus, kaal.

med valemisse $V_t = V_0(1 + \alpha t)$, leiame, et $V_t = 10(1 + \frac{273}{273})$ l = = 20 l.

Näide 2. Mingi gaasi ruumala 273° C temperatuuri juures on 10 l. Kui suur on selle gaasi ruumala 546° C temperatuuri juures, kui rõhk on jääv?

Meil on teada gaasi ruumala 273° C juures; selleks, et leida selle gaasi ruumala temperatuuril $t_2 + 546°$ C, on vaja leida esialgselt ruumala 0° C juures. Selle ruumala leiame võrdusest:

$$10 \text{ l} = V_0(1 + \frac{1}{273} \cdot 273), \text{ millest}$$

$$V_0 = \frac{10 \text{ l}}{2} = 5 \text{ l}.$$

Leiame nüüd gaasi ruumala 546° C juures:

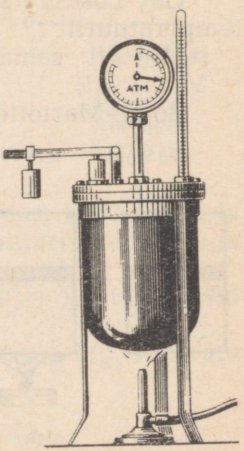
$$V_t = 5(1 + \frac{1}{273} \cdot 546) \text{ l} = 15 \text{ l}.$$

Harjutus 65.

1. Vesinik 0° C juures on ruumalaga 5 l. Kui suureks muutub vesiniku ruumala 100° C juures? Rõhk seejuures ei muutu.
2. Süsihappegaas 30° C juures on ruumalaga 720 cm³. Missugune on selle gaasi ruumala sama rõhu ja 0° C juures?
3. Kui kõrge temperatuurini on vaja soojendada gaasi konstantse rõhu juures, et ta ruumala suureneks kahekordseks, kui gaasi algtemperatuur on 0° C?
4. Õhu ruumala 27,3° C juures on 100 l. Kui suur on tema ruumala 54,6° C juures?
5. Kujutage graafiliselt gaasi ruumala muutumise protsessi, mis avaldub võrrandiga $V_t = V_0(1 + \alpha t)$, kui p on konstantne.

165. Gaasi rõhu sõltuvus temperatuurist. Charles'i seadus. Soojendades suletud silindris A (näiteks Papini katlas) gaasi (joon. 280 *a*), võib manomeetrit M jälgides tähele panna, et gaasi rõhk suureneb. Jälgides termomeetris temperatuuri tõusu, on kerge kindlaks teha, et konstantse ruumala puhul suureneb gaasi rõhk võrdeliselt temperatuuri tõusuga.

Analoogiliselt sellega, kuidas me gaaside soojuspaisumise iseloomustamiseks võtsime kasutamisele ruumpaisumise koefitsiendi, võtame kasutamisele suuruse, mis iseloomustab gaasi rõhu muutusi sõltuvalt temperatuuri muutustest.



Joon. 280 *a*. Gaasi kuumutamisel kinnises anumas suureneb gaasi rõhk.

Tähistame $0°$ C juures oleva gaasi rõhu tähega p_0 ja rõhu temperatuuri $t°$ juures tähega p_t. Rõhu suurenemine soojendamisel $1°$ C võrra, mis tuleb iga algrõhu ühiku kohta, avaldub järgmiselt:

$$\gamma = \frac{p_t - p_0}{p_0 t}. \qquad (1)$$

Suurust γ (kreeka täht «gamma») nimetatakse gaasi r õ h u t e r m i l i s e k s k o e f i t s i e n d i k s.

Mõõtmised näitavad, et gaasi rõhu termiline koefitsient on kõikidel gaasidel ühesuurune ja on arvuliselt võrdne $\frac{1}{273}$.

Määrates valemist (1) p_t suuruse, saame $p_t = p_0(1 + \gamma t)$. (2)

Võtame valemis (2) $\gamma = \frac{1}{273}$, $t = 1°$, siis $p_t = p_0 + \frac{1}{273} p_0$.

Siit järgneb, et **antud gaasihulga soojendamisel $1°$ C võrra, konstantse ruumala juures, suureneb gaasi rõhk $\frac{1}{273}$ võrra sellest rõhust, mis tal oli $0°$ C juures.**

Seda seadust nimetatakse C h a r l e s ' i s e a d u s e k s prantsuse teadlase nime järgi, kes esimesena 1787. aastal selle avastas.

Charles'i (loe šarli) seadusest järeldub, et gaasi rõhu termiline koefitsient γ on võrdne ruumpaisumise koefitsiendiga α. See võrdsus tuleneb Boyle-Mariotte'i seadusest.

Tõestame seda. Olgu gaasi mingi mass suletud silindrisse kolvi alla (joon. 281 *a*) ja olgu tema temperatuur esialgses olekus $0°$, ruumala V_0 ja rõhk p_0. Kinnitame kolvi AB ja soojendame gaasi temperatuurini $t°$ (joon. 281 *b*). Gaasi rõhk suureneb ja saab võrdseks p_t, ruumala aga jääb endiseks.

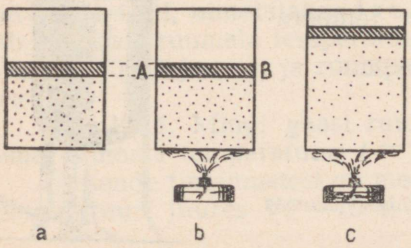
Charles'i seaduse järgi $p_t = p_0(1 + \gamma t)$.

Soojendame nüüd gaasi $0°$-st kuni $t°$-ni (joon. 281 *c*) ja laseme kolvi vabalt liikuda. Gaasi rõhk jääb endiseks, s. o. p_0, ruumala aga suureneb kuni V_t.

Gay-Lussac'i seaduse järgi: $V_t = V_0(1 + \alpha t)$. Seega on meil: temperatuuril $t°$ antud gaasimassi ruumala V_0 ja rõhk $p_t = p_0(1 + \gamma t)$; samal temperatuuril: rõhk p_0 ja ruumala $V_t = V_0(1 + \alpha t)$.

Boyle-Mariotte'i seaduse järgi:

$p_0 V_0(1 + \alpha t) = p_0 V_0(1 + \gamma t)$, kust saame võrduse $\alpha = \gamma$.

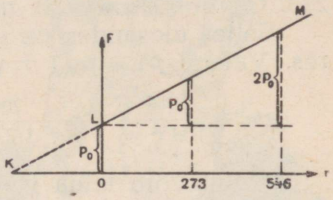


Joon. 281. *a* — gaasi algolek, mis on määratud suurustega $0°$, V_0, P_0; *b* — gaasi olek, mis on määratud suurustega $t°$, V_0; $p_t = p_0(1 + \gamma t)$; *c* — gaasi olek, mis on määratud suurustega $t°$; $V_t = V_0(1 + \alpha t)$; p_0.

Avaldame gaasi rõhu sõltuvuse temperatuurist esialgselt tabeli kujul ja siis graafiliselt. Selleks kasutame võrrandit:

$p_t = p_0 (1 + \gamma t)$ või $p_t = p_0 + \gamma p_0 t$.

t	p_t
0	p_0
1	$p_0 + \gamma p_0 \cdot 1$
2	$p_0 + \gamma p_0 \cdot 2$
273	$p_0 + p_0$
546	$p_0 + 2p_0$



Joon. 282. Gaasi rõhu muutumine temperatuuri muutudes.

Kanname abstsissteljele mingis mastaabis gaasi temperatuurid, ordinaatteljele aga nendele temperatuuridele vastavad rõhud eespool toodud tabelist. Ühendades teljestikul saadud punktid, tekib sirge LM (joon. 282), mis kujutab gaasi sõltuvust temperatuurist.

Gaasi oleku muutumise protsessi, mis kulgeb gaasi konstantse ruumala puhul, nimetatakse isohoorilise[1] protsessiks, joont LM, mis kujutab gaasi rõhu muutumist konstantse ruumala puhul sõltuvalt temperatuurist, nimetatakse isohooriks.

Gay-Lussac'i ja Charles'i seadused, samuti nagu Boyle-Mariotte'i seaduski, peegeldavad ainult ligikaudselt gaaside omadusi. Seda võib näha kas või sellest, et erinevatel gaasidel on suurused γ ja α mõningal määral erinevad üksteisest (vt. tabelit).

Gaas 0° C temperatuuri ja 760 mm Hg rõhu juures	α	γ
Vesinik	0,0036600	0,0036613
Heelium	0,0035820	0,0036601
Lämmastik	0,0036732	0,0036744
Süsihappegaas	0,0037414	0,0037262
Õhk	0,0036760	0,0036750

Täpsed mõõtmised näitavad, et iga antud gaasi kohta on α ja γ väärtused sõltuvad sellest, missuguses temperatuurivahemikus ja missuguse rõhu juures nad on määratud.

Toome nüüd Charles'i seaduse rakendamise kohta mõned näited.

Näide 1. Gaasi rõhk 0° C juures on 780 mm Hg. Määrata selle gaasi rõhk, kui temperatuur on 273° C.

[1] Kreekak. sõnadest *isos* — ühesugune, *chōra* — ruumala.

Valemist $p_t = p_0(1 + \gamma t)$ leiame, et

$$p_t = 780(1 + \frac{1}{273} \cdot 273) \text{ mm Hg} = 1560 \text{ mm Hg} \approx 2 \text{ at.}$$

Näide 2. Milline on gaasi rõhk 546° *C* juures, kui ta rõhk 273° *C* juures on 780 mm Hg?

Selles ülesandes on eelkõige vaja leida gaasi rõhk 0° *C* juures. Valemi $p_t = p_0(1 + \gamma t)$ abil leiame, et

$$p_0 = \frac{p_t}{1 + \gamma t} = \frac{780}{1 + 1/273 \cdot 273} = 390 \text{ mm (Hg).}$$

Nüüd võib leida gaasi rõhu 546° *C* juures:

$$p_t = 390\,(1 + 1/273 \cdot 546) = 1170 \text{ (mm Hg).}$$

Harjutus 66.

1. Ehitada gaasi isohoor 0° *C*-st kuni 100° *C*-ni, kui 0° *C* juures on gaasi rõhk 500 mm Hg.
2. Kui suur on vesiniku rõhk 30° *C* juures, kui ta rõhk 0° *C* juures on 700 mm? Gaasi ruumala on seejuures muutumatu.
3. Kaks kolbi, ruumalaga 200 cm^3 ja 1 l, mis sisaldavad 0° *C* ja normaalse rõhu juures olevat õhku, suletakse õhukindlalt ja soojendatakse seejärel keeva vee aurus. Kas nendes kolbides jäävad rõhud erinevateks või võrdseteks?

166. Temperatuuri absoluutne skaala. Vaatleme veelkordselt temperatuurist tingitud gaasi rõhu muutumise graafikut (joon. 282).

Pikendame sellel graafikul sirglõigu *LM* lõikumiseni horisontaalteljega, millele on kantud gaasi temperatuur. Ta lõikab seda telge punktis *K*. Punkt *K* kujutab graafikul gaasi seda temperatuuri, mille puhul tema rõhk võrdub nulliga. Kui suur on see temperatuur?

Kasutame võrrandit $p_t = p_0(1 + \gamma t)$. Võtame selles võrrandis $p_t = 0$, s. t. kirjutame järgmise võrduse:

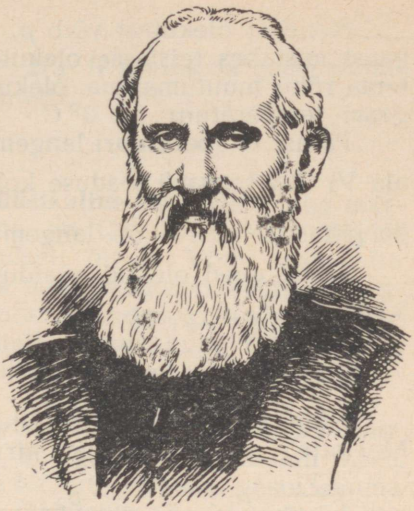
$$0 = p_0(1 + \gamma t).$$

Kuna gaasi rõhk 0° *C* juures ei võrdu nulliga ($p_0 \neq 0$), siis kirjutatud võrdusest järeldub, et $1 + \gamma t = 0$, millest $t = -\frac{1}{\gamma}$.

Kuna $\gamma = \frac{1}{273}$, siis $t = -273°\ C$.

Seega on gaasi rõhk nulltemperatuuril —273° *C*.

Inglise teadlane William Thomson (Kelvin) pani ette sellise temperatuuri skaala, kus nulliks on võetud temperatuur —273° *C*. Säärast skaalat hakati nimetama absoluutseks ehk Kelvini skaalaks. Selle skaala nullpunkti, mis Celsiuse skaalal on võrdne temperatuuriga —273°, nimetatakse temperatuuri absoluutseks nulliks. Kelvini skaalas on ühe kraadi suurus niisama suur kui Celsiuse sajakraadises skaalas.



Thomson (Kelvin), William (1824—1907) — väljapaistev inglise füüsik. Temale kuuluvad tähtsad avastused elektri ja soojuse valdkonnas ning tööd, millest kõige tähtsamaks on telegraafiside täiustamine. Tema tõi füüsikasse absoluutse temperatuuri mõiste. Tema nime järgi nimetatakse temperatuuri absoluutse skaala jaotusi Kelvini kraadideks.

Tähistame temperatuuri Kelvini skaalas tähega T ja kraadide arvu järele kirjutame tähe K. Normaalse rõhu juures on jää sulamistemperatuur Kelvini skaala järgi $T_0 = 273^\circ K$ ja vee keemistemperatuur $T = 373^\circ K$.

Iga teine temperatuur t sajakraadise Celsiuse skaala järgi on seotud absoluutse temperatuuriga T järgmiselt:

$T = t + 273^\circ K$. $t = T - 273^\circ C$.

Harjutus 67.

1. Arvutage ümber absoluutse temperatuuri skaalale järgmised temperatuurid Celsiuse skaalalt: 20°; —14°; —260°; 125°.
2. Arvutage ümber Celsiuse skaalale Kelvini skaala järgmised temperatuurid: 15°; 124°; 273°; 373°; 1150°.

167. Gaasi ruumala, rõhu ja temperatuuri vaheline sõltuvus. Gaasi oleku ühendatud seadus. Me käsitlesime neid protsesse, kus üks kolmest gaasi olekut iseloomustavast suurusest (ruumala, rõhk ja temperatuur) ei muutu.

Me nägime, et kui ei muutu temperatuur, siis gaasi ruumala ja rõhk on teineteisega seotud Boyle-Mariotte'i seaduse järgi. Kui rõhk on konstantne ja temperatuur muutub, siis muutub gaasi ruumala Gay-Lussac'i seaduse kohaselt ja lõpuks, kui gaasi ruumala on konstantne, siis muutub rõhk temperatuuri muutudes Charles'i seaduse järgi. Kuid looduses esineb sagedasti protsesse, kus üheaegselt muutuvad kõik kolm gaasi olekut iseloomustavat suurust. Teeme nüüd kindlaks, missugune seos valitseb ruumala, rõhu ja temperatuuri vahel.

Olgu need suurused gaasi kahe mingi oleku puhul järgmised:

1) V_1; p_1; t_1; 2) V_2; p_2; t_2.

Nendest olekutest võib p, V või t suuruste muutmisega viia gaasi mistahes teistesse olekutesse. Viime näiteks gaasi, hoides tema rõhu muutumatuna, olekutest 1 ja 2 olekutesse, mille puhul gaasi temperatuur on 0° C.

Pärast temperatuuri langemist t°-st kuni 0°-ni on gaasi ruumala V_1 Gay-Lussac'i seaduse kohaselt võrdne $\frac{V_1}{1 + \alpha t_1}$ ja ruumala V_2 on pärast temperatuuri langemist t°-st kuni 0°-ni $\frac{V_2}{1 + \alpha t_2}$.

Gaasi uued olekud avalduvad järgmiselt:

1) $\frac{V_1}{1 + \alpha t_1}$, p_1 0°;

2) $\frac{V_2}{1 + \alpha t_2}$, p_2 0°.

Nüüd on temperatuurid ühesugused ja sellepärast võib Boyle-Mariotte'i seaduse põhjal kirjutada:

$$\frac{V_1}{1 + \alpha t_1} \cdot p_1 = \frac{V_2}{1 + \alpha t_2} \cdot p_2. \qquad (1)$$

Kuna gaasi olekut iseloomustavad suurused p, V ja t olid võetud vabalt ja tähistatud indeksitega 1 ja 2, siis võrdus (1) on kehtiv mistahes gaasi oleku kohta. Sellepärast võib kinnitada, et

$$\frac{pV}{1 + \alpha t} = const. \qquad (2)$$

Antud gaasimassi kohta on gaasi ruumala korrutis rõhuga, jagatud ruumpaisumise binoomiga, jääv suurus.

Gaasi ruumala, rõhu ja temperatuuri vahel tuletatud sõltuvust nimetatakse gaasi oleku ühendatud seaduseks ja võrdusi (1) või (2) gaasi oleku võrrandiks.

Gaasi oleku võrrandit võib lihtsustada, kasutades Celsiuse skaala järgi võetud temperatuuri asemel absoluutse skaala järgi võetud temperatuuri. Selleks teisendame võrrandit:

$$\frac{p_1V_1}{1 + \alpha t_1} = \frac{p_2V_2}{1 + \alpha t_2}.$$

Asendades väärtuse $\alpha = \frac{1}{273}$, saame:

$$\frac{p_1V_1}{\frac{273 + t_1}{273}} = \frac{p_2V_2}{\frac{273 + t_2}{273}}, \text{ mis pärast taandamist 273-ga annab:}$$

$$\frac{p_1V_1}{273 + t_1} = \frac{p_2V_2}{273 + t_2}.$$

Kuna $273 + t_1 = T_1$ ja $273 + t_2 = T_2$, siis järelikult võime kirjutada: $\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}$.

See tähendab, et **antud gaasimassi kohta on rõhu korrutis ruumalaga, jagatud absoluutse temperatuuriga, jääv iga temperatuuri juures.**

$$\frac{pV}{T} = const.$$

Eri juhul, kui temperatuuri $T = 273° K$ juures on gaasi ruumala V_0 ja rõhk p_0, siis võime kirjutada:

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{273}.$$

168. Absoluutse nulli mõiste füüsikaline sisu. Meie juba märkisime, et reaalsete gaaside kohta on Gay-Lussac'i ja Boyle-Mariotte'i seadused ainult ligikaudselt õiged. Võib siiski ette kujutada säärast gaasi, mille kohta need seadused kehtivad täpselt. Niisuguse gaasi molekulid kujutavad endast kaduvalt väikese ruumalaga elastseid kerakesi, millede vastastikune mõju seisab nende omavahelises põrkamises. Niisugust gaasi nimetatakse füüsikas i d e a a l s e k s g a a s i k s.

Võrrandist $p_t = p_0(1 + \alpha t)$ järeldub, et kui temperatuur $t = -273° C$, s. o. absoluutne null, siis gaasi rõhk on null. Kuid gaasi rõhk on liikuvate molekulide löökide tulemus vastu anuma seinu. Järelikult peab temperatuuri lähenedes absoluutsele nullile lakkama ideaalse gaasi molekulide soojusliikumine.

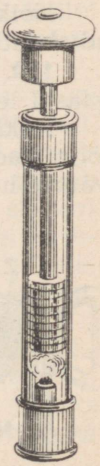
Katse näitab, et väikeste rõhkude juures on reaalsete gaaside omadused väga lähedased ideaalse gaasi omadustele. Seega peab järelikult lähenemisel absoluutsele nullile lakkama ka reaalse gaasi molekulide soojusliikumine. See järeldus kehtib mitte üksi gaaside, vaid ka tahkete kehade ja vedelikkude kohta. Füüsika on kindlaks teinud, et aine selline olek on saavutamatu, kuid õige lähedale sellele jõuda võib. Tänapäeval on saavutatud temperatuur, mis on kõrgem absoluutsest nullist kõigest 0,0044° K võrra.

169. Gaasi temperatuuri muutumine kiirel paisumisel ja kokkusurumisel. Katse näitab, et gaasi järsul kokkusurumisel suureneb gaasi temperatuur, kuid järsul paisumisel väheneb.

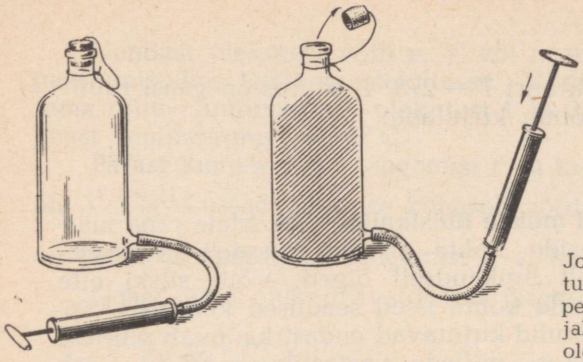
Gaasi temperatuuri suurenemist kokkusurumisel võib näidata järgmise lihtsa katse abil. Võtame paksuseinalise silindrikujulise klaasanuma, mille sees tihedalt saaks liikuda kolb (joon. 283).

Järsul kokkusurumisel soojeneb õhk ja silindri põhja asetatud kergeltsüttiv aine (näiteks eetriga immutatud osake) süttib.

Sellist nähtust kasutatakse näiteks sisepõlemismootorites-diislites: õhu kokkusurumisel soojeneb küttesegu silindris süttimistemperatuurini (kuidas töötab mootor, seda vaatleme edaspidi, § 209).



Joon. 283. Õhu järsul kokkusurumisel silindris tõuseb õhu temperatuur niivõrd, et kergestisüttiv aine süttib.



Joon. 284. Anumasse kokkusurutud õhk paisub ja viskab korgi pealt. Tehes seejuures tööd, ta jaheneb, mille tagajärjel anumas olev veeaur muutub uduks.

Gaasi paisumisel alaneb aga tema temperatuur. Seda võib näha järgmise katsega. Pumpame õhku kinnikorgitud klaasanumasse, milles on veeauru. Teatava rõhu saavutamisel lendab kork välja; õhk seejuures tegi paisudes tööd ja jahenes, mille tagajärjel veeaur muutus uduks (joon. 284).

Temperatuuri alanemist gaasi paisumisel kasutatakse gaaside veeldamisel. Sellest lähemalt § 200.

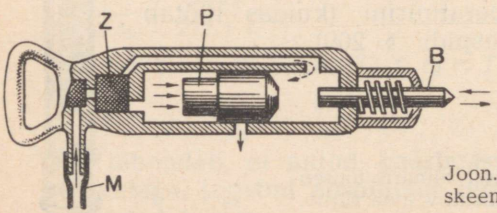
Keha temperatuuri muutumine on seotud, nagu oli kindlaks tehtud § 149, keha siseenergia muutumisega. Kuna järsul kokkusurumisel gaasi temperatuur tõuseb, siis tõuseb seega ka tema siseenergia. See gaasi siseenergia suurenemine toimub selle töö tulemusena, mis tehakse kokkusurumisel. Paisumisel aga gaas teeb tööd, seejuures tema siseenergia väheneb, ja kui paisumine toimub kiiresti, siis, nagu katsetel nägime, temperatuur langeb.

Kehas toimuvat protsessi, mille juures ei ole energia vahetamist ümbritsevate kehadega, nimetatakse adiabaatiliseks protsessiks.

Kõiki kiiresti toimuvaid protsesse võib praktiliselt lugeda adiabaatilisteks.

170. Kokkusurutud gaasid. Kompressor. Paljud kokkusurutud gaasid leiavad tänapäeval laialdast kasutamist tehnikas.

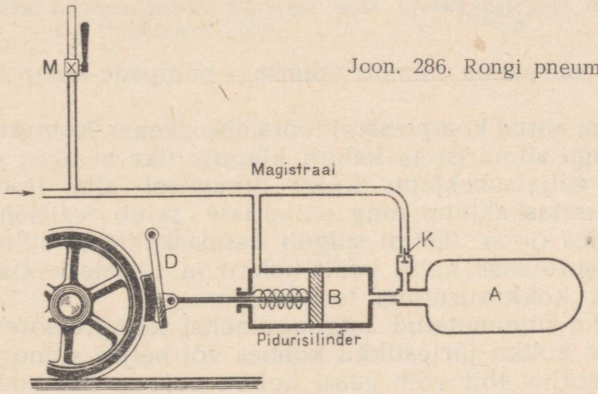
Kokkusurutud õhku kasutatakse mitmesuguste pneumaatiliste tööriistade juures: pneumaatilised vasarad, neetimisvasarad, värvipihustajad jne. Joonisel 285 on näidatud pneumaatilise



Joon. 285. Pneumaatilise vasara ehituse skeem.

vasara skeem. Kokkusurutud õhk juhitakse vasarasse vooliku *M* kaudu. Jaotussiibrid *Z* analoogiliselt aurumasinate siibritega suunavad õhu vaheldumisi kord silindri esimesse, kord tagumisse ossa. Seetõttu surub õhk kord ühest, kord teisest küljest kolvile *P*, mis põhjustab kolvi ja vasara otsmiku *B* kiiret edasi-tagasi kulgevat liikumist. Üksteisele järgnevate löökide toimel tungib otsmik *B* söesse ja murrab sealt lahti tükke.

Samuti on olemas liivapritsid, mis annavad liivaga segatud tugeva õhujoa. Neid kasutatakse näiteks seinte puhastamisel. Praegusel ajal võib sagedasti näha ka erilisi seinte värvimise aparaate, kus värvi pihustamine toimub kokkusurutud õhu abil. Kokkusurutud õhu abil avanevad metroo vagunite ja trollibusside uksed. Raudteetranspordis kasutatakse kokkusurutud õhku pidurite tööks.

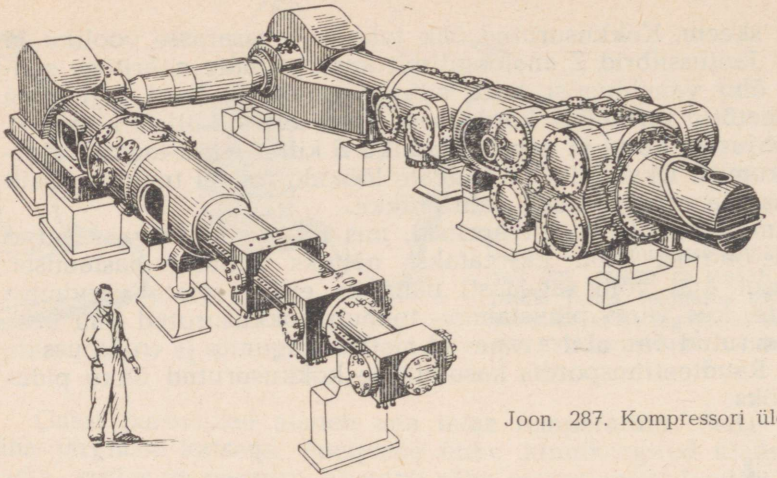


Joon. 286. Rongi pneumaatilise piduri skeem.

Et selgitada, kuidas seda tehakse, vaatame joonist 286, millel on skemaatiliselt kujutatud raudteevaguni pneumaatilise piduri (õhkpiduri) ühe liigi ehitus.

Kompressorist juhitakse õhk peatoru mööda terasreservuaari *A*. Pidurisilindri kolb on vasakult ja paremalt ühesuguse rõhu all, sellepärast on temaga ühenduses olev piduriklots rattast eemaldatud. Kui avada piduri kraan *M*, siis rõhu all olev õhk tungib välja, seejuures ta suleb klapi *K* ja isoleerib sellega silindri magistraalist. Nüüd on rõhk kolvile *B* paremalt suurem kui vasakult. Rõhu ülekaal kandub piduriklotsile ja surub ta ratta pöiale. Kui sulgeda kraan *M* ja uuesti anda suruõhku magistraali kaudu, siis taastub esialgne olukord.

Mõned gaasid on leidnud laialdast kasutamist tehnikas. Nii näiteks kasutatakse vesinikku, atsetüleeni ja hapnikku keevitamisel, ammoniaaki kasutatakse külmutusseadeldistes jne. Selleks et gaase oleks hõlpsam transportida, mahutatakse nad tugevatesse terasballoonidesse, 60—200 at rõhu all.

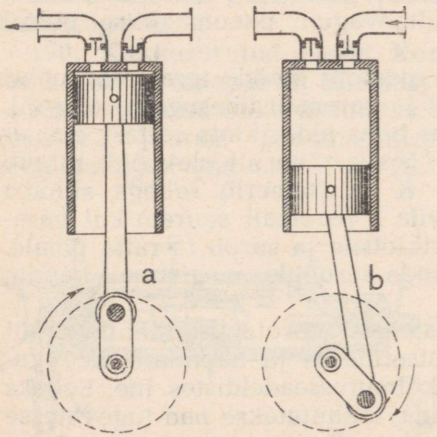


Joon. 287. Kompressori üldvaade.

Gaaside kokkusurumine toimub võimsate pumpade-kompressorite abil.

Joonisel 287 on antud kompressori töötamise skeem. Kompressor koosneb kolviga silindrist ja kahest klapist; üks nendest on sisselaske-, teine väljalaskeklapp. Kolvi liikumisel alla (joon. 287 *b*) avaneb sisselaskeklapp ning silindrisse satub välisõhk; kolvi liikumisel üles (joon. 287 *a*) sulgub sisselaskeklapp, silindrisse tulnud õhk surutakse kolvi poolt kokku ja väljalaskeklapi kaudu liigub õhk kokkusurutuna terasballooni.

Tarvitatakse ka niinimetatud mitmeastmelisi kompressoreid, kus gaas surutakse kokku järjestikku kolmes või neljas silindris. Sääraste kompressorite abil võib gaasi kokku suruda tuhandete atmosfäärideni. Joonisel 287 on kujutatud üks mitmeastmeline kompressor.



Joon. 287 *a*, *b*. Kompressori töötamise skeem.

Harjutus 68.

1. Hapniku tihedus 0° *C* ja normaalse atmosfäärilise rõhu puhul on $0{,}0014 \frac{g}{cm^3}$. Leida hapniku tihedus 16° *C* temperatuuri ja 20-atmosfäärilise rõhu juures.

2. 0° *C* ja 760 mm Hg rõhu juures on õhu ruumala 5 l. Kui suur on õhu ruumala 800 mm Hg rõhu ja 20° *C* juures?

3. Üheatmosfäärilise rõhu ja 15° *C* temperatuuri juures on õhu ruumala 2 l. Kui suure rõhu puhul on õhu ruumala 4 l, kui ta temperatuur on 20° *C*?

4. Vesiniku ruumala on 50° *C* ja 750 mm Hg rõhu juures 2,5 l. Kui suur on sama vesinikumassi ruumala 0° *C* temperatuuri ja 760 mm Hg rõhu juures?

5. Kui kõrge temperatuurini soojeneb gaasi segu sisepõlemismootoris, kui ta on silindris, atmosfäärilise rõhu ja 50° *C* temperatuuri juures ruumalaga 40 dm^3, aga kolvi liikumisel surutakse 15-atmosfäärilise rõhuga kokku 5 dm^3-ni?

6. Gaasi tihedus temperatuuril 0° *C* ja rõhu p_0 juures on D_0. Missugune on gaasi tihedus D_t temperatuuri $t°$ *C* ja rõhu p puhul?

7. Joonestage gaasi ruumala absoluutsest temperatuurist sõltuvuse graafik jääva ruumala puhul. Võrrelge seda graafikuga, mis on saadud võrrandist $p_t = p_0 (1 + \gamma t)$ (joon. 282).

XV PEATÜKK.

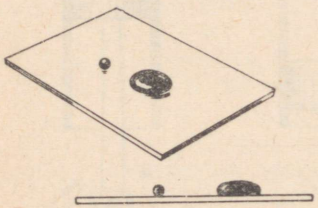
VEDELIKE OMADUSI.

171. Molekulaarne liikumine vedelikes. Vedelikus asuvad molekulid üksteisele palju lähemal kui gaasides. Säärase järelduse võib teha seepärast, et vedeliku tihedus on näiteks normaalrõhu ja keemistemperatuuri juures 1700 korda suurem kui tema auru tihedus. Seetõttu on vedeliku molekulide liikumine ja paljud tema teised omadused suurel määral tingitud molekulide omavahelistest mõjujõududest.

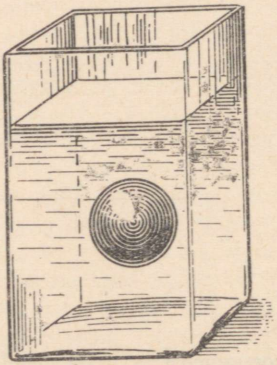
Vedeliku põhiline omadus on v o o l a v u s. Kõik vedelikud nagu gaasidki on voolavad, mistõttu vedelik omandab anuma kuju, milles ta on. Väikeses koguses võtab vaba vedelik kuju, mis on lähedane kera kujule. Selline kuju on näiteks vihmatilgal ja tilkadel, milleks laguneb vedeliku juga.

Suur elavhõbedatilk, mis on paigutatud horisontaalsele klaasplaadikesele, on lame, väike tilk aga kerakujuline (joon. 288). Kui katta kerakujuline tilgake plaadikesega, siis plaadikese kaalu mõjul tilgake muutub laperguseks. Suure tilga lapikus on seletatav sellega, et tilga kaal ületab vedeliku molekulaarjõud. Võib arvata, et kui vedelik jätta ainult tema enda molekulaarjõudude mõju alla, siis ta võtab kera kuju. Järgmine katse kinnitab seda arvamust.

Kui valmistada veega soolalahus, mille tihedus võrdub aniliini tihedusega, ja viia lahusesse mingi hulk aniliini, siis võtab see lahuses kera kuju (joon. 289).



Joon. 288. Suur elavhõbedatilk on lamendunud, väike — kerakujuline.



Joon. 289. Aniliinõlitilk soolalahuses.

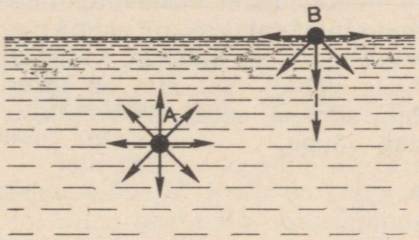
On teada, et keral on kõige väiksem pindala antud ruumala juures.

Vedelik võtab säärase kuju, mille juures tema pindala on antud tingimustes kõige väiksem.

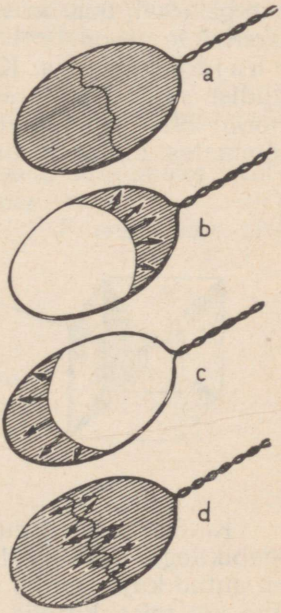
See on seletatav vedeliku pinnakihi igale molekulile mõjuvate molekulaarjõudude iseärasustega.

172. Pindpinevus. Vaatleme molekulaarjõu mõju molekulile vedeliku pealispinnal ja vedeliku sees.

Joonisel 290 kujutab ring *A* molekuli vedeliku sees, aga *B* — pinnal. Molekul *A* on ümbritsetud igalt poolt sama vedeliku teiste molekulidega, mis tõmbavad teda. Kõik molekulaarjõud, mis mõjuvad molekulile *A*, on kokku võttes omavahel tasakaalus. Molekul *B* on aga teises olukorras. Tema peal on gaas, mille tihedus, võrreldes vedeliku tihedusega, on väike, seepärast võib arvestamata jätta gaasi mõju molekulile *B*; jäävad mõjuma vedeliku molekulaarjõud, mille resultant on suunatud vedeliku sisse perpendikulaarselt vedeliku pinnaga. Sel põhjusel on vedeliku pind erilises olekus.



Joon. 290. Vedeliku sees ja vedeliku pinnal vedeliku molekulile mõjuvad jõud.

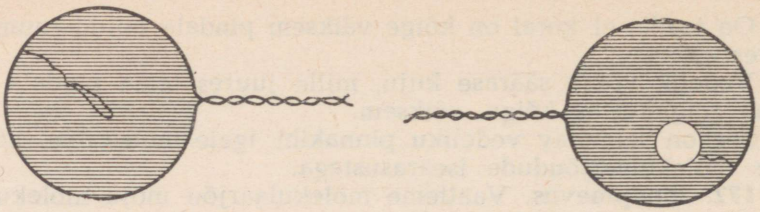


Joon. 291. Pindpinevuse demonstreerimine.

Paljud selle vedelikukihi omadused on seletatavad, kui vaadelda teda õhukese kilena, millel on püsiv pingsus, mis ei sõltu tema kujust ning suurusest.

Näitliku kujutluse annavad sellest katsed seebikilega.

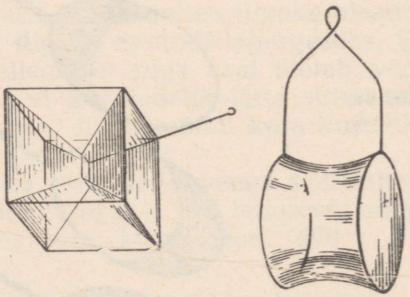
Joonisel 291 on kujutatud traatrõngas, mille külge on kinnitatud kahes punktis niit. Kattes rõnga seebikilega, võib tähele



Joon. 292. Niidist aas on seebikilel vabalt; kui aga torgata sõlme sees kile läbi, siis tõmbub sõlm ringiks.

panna, et niit on kilel vabalt (joon. 291 *a*). Kui aga purustada kile niidi mistahes küljest, siis niit tõmbub pingule ja muutub ringjoone kaareks, nagu näidatud joonisel 291 *b*, või nii, nagu joon. 291 *c*, sõltuvalt sellest, kummast niidi küljest on purustatud kile.

Niidi pinguletõmbumist võib seletada, oletades, et niidi kõikidele võrdsetele elementidele mõjuvad vedeliku poolt võrdse suurusega jõud, mis on suunatud perpendikulaarselt vastavatele elementidele (joon. 291 *d*). Neid jõude nimetatakse pindpinevusjõududeks. Kui panna seebikilele vees märjaks kastetud niidist silmus, siis jääb silmus kilele vabalt, kui kile on terve (joon. 292). Kui aga torgata kile läbi silmuse sees, siis seebikile, tõmmates ühtlaselt niiti, moodustab rõnga.



Joon. 293. Kile võtab kõikidest võimalikkudest minimaalse pindala.

Kattes mitmesuguse kujuga traadist karkassid (raamistikud) seebikilega, võib saada mitmesuguseid kujundeid, millest igaühel on antud kuju juures väikseim pindala. Pindpinevuse mõjul võtab ühe või teise kujuga traatkarkassil olev seebikile kõikidest võimalikkudest kõige väiksema pindalaga kuju (joon. 293).

Pindpinevusjõud on risti iga vedeliku pinda piirava joone elemendiga ja on puutujaks vedeliku pinnale. Kui vedeliku pind on tasapinnaline, siis pindpinevusjõu vektor on vedeliku pinnal.

173. Pindpinevuskoefitsient. Anname nüüd pindpinevuse kvantitatiivse iseloomustuse. Teeme järgmise katse. Valame pipetti *B* (joon. 294) vett ja avame natuke kraani *K* nii, et pipetist

hakkaks aeglaselt tilkuma vesi. Võib tähele panna, et iga tilk, kasvades järk-järgult, rebib end lahti ja kukub. Kui projekteerida pipeti ots koos tilgaga ekraanile, siis võib näha, et tilga kasvamisel tekib tema ja vedeliku vahele kael, mis järk-järgult aheneb. Tilga C lahtirebimine toimub kaelast AB ringjoont mööda (joon. 295). Järelikult on see ringjoon lahtirebimise momendil vedeliku pinna piirjooneks. Seda mööda mõjuvad ülessuunatud pindpinevusjõud ja tilga kaal.

Selle tõttu, et pindpinevusjõud on jaotunud mööda joone pikkust, võib otsitavaks kvantitatiivseks iseloomustajaks olla ühele joone pikkusühikule mõjuv pindpinevusjõud.

Suurust, mida mõõdetakse pindpinevusjõu ja vedeliku pinna piirjoone pikkuse suhtega, nimetatakse pindpinevusteguriks ehk pindpinevuskoefitsiendiks.

Tähistame pindpinevuskoefitsiendi tähega σ (kreeka «sigma»). Siis vastavalt definitsioonile

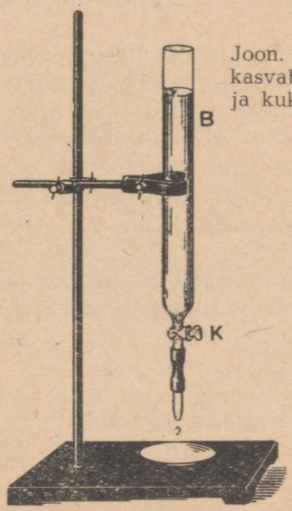
$$\sigma = \frac{F}{l},$$

kus F on pindpinevusjõud ja l — vedeliku pinna piirjoone pikkus. Kui anda jõud düünides ja pikkus sentimeetrites, siis avaldub σ $\frac{\text{dyn}}{\text{cm}}$.

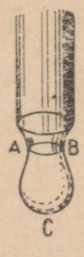
Vaatame nüüd, kuidas arvutada vee pindpinevuskoefitsienti meie katses.

Tilk rebib end lahti siis, kui ta kaal P saab suuremaks pindpinevusjõust F. Kui r on kaela AB raadius, siis $l = 2\pi r$.

Kuna otse enne lahtirebimise momenti $F = P$, siis võime kirjutada: $= \sigma \frac{P}{2\pi r}$.



Joon. 294. Pipetist voolav tilk kasvab järk-järgult, rebeneb lahti ja kukub.



Joon. 295. Tilga lahtirebenemine toimub kaela ringjoont mööda.

Kaaludes ära mõnikümmend tilka, võime määrata tilga keskmise kaalu ja võttes r võrdseks torukese sisemise raadiusega (tegelikult on r natuke väiksem sellest raadiusest), võime selle valemi abil saada σ ligikaudse väärtuse. Järgnevas tabelis on toodud mõnede vedelike pindpinevuskoefitsiendid.

Vedelik	Temperatuur C kraadides	Pindpinevus $\frac{\text{dyn}}{\text{cm}}$	Vedelik	Temperatuur C kraadides	Pindpinevus $\frac{\text{dyn}}{\text{cm}}$
Vesi	0	75,5	Elavhõbe	20	470
Vesi	18	73	Vedel plii	336	442
Vesi	35	70	Vedel raud	1267	963
Vesi	100	58,8	Vedel plaatina	2000	1819
Seebilahus	20	40	Vedel vesinik	—253	2,1
Piiritus	20	22	Vedel heelium	—269	0,12
Eeter	25	17			

Nagu nähtub tabelist, *väheneb temperatuuri tõusuga vee pindpinevus.* See kehtib kõikide vedelikkude kohta.

Väga suur on pindpinevus sulametallidel, väga väike aga veeldunud gaasidel, eriti vedelal heeliumil.

Pindpinevuse suurust mõjustavad mitmesugused põhjused. Kõige väiksemadki lisandid muudavad (harilikult vähendavad) märgatavalt pindpinevuse suurust. Praktikas tuleb seda arvestada. Pindpinevuskoefitsiendi määramisel tuleb seepärast kasutada ainult puhtaid vedelikke.

Kui visata veepinnale kampri väikesi tükikesi, siis hakkavad nad liikuma väga keerukaid teid mööda. Mis tekitab neid liikumisi?

Seetõttu, et kampritükikesed on korrapäratud, lahustuvad nad veepinnal erinevalt. Kampri lisandite ilmumine vees muudab vee pindpinevust seda rohkem, mida rohkem lahustub kamprit. Kampritükikest ümbritseva vee osakeste pindpinvuse suuruse erinevus kutsubki välja need imelikud liikumised.

174. Märgamine. Vaadeldes veest väljavõetud puhast klaasplaati, näeme, et ta on kaetud veega. Parafiinitatud või rasvatatud kartongi külge aga vesi ei hakka. Tahkete kehade kokkupuutumisel vedelikuga võib tähele panna kahte nähtust: m ä r g a m i s t ja m i t t e m ä r g a m i s t. Vesi märgab puhast klaasi, kuid ei märga parafiini. Elavhõbe märgab tsinki, kuid ei märga malmi.

Vedeliku märgamine on seletatav sellega, et vedeliku ja tahke keha molekulidevahelised tõmbejõud (adhesioon) on suuremad kui vedeliku molekulide omavahelised tõmbejõud (kohesioon).

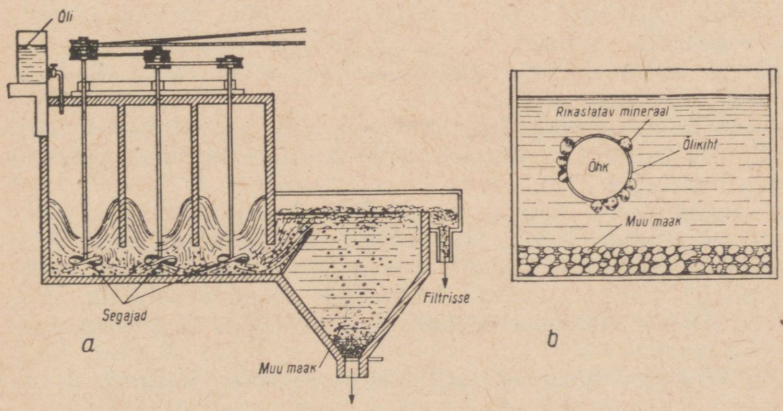
Joon. 296. *a* — tahket keha märgav vedelik jookseb pinda mööda laiali; *b* — tahket keha mittemärgav vedelik ei jookse laiali.

Sel juhul kui vedelik ei märga tahket keha, on vedeliku molekulide omavahelised tõmbejõud suuremad kui vedeliku ja tahke keha molekulidevahelised tõmbejõud.

Vedelike molekulide adhesiooni erinevust tahke keha suhtes võib näha, kui valada väike hulk vedelikku tahke keha plaadile. Kui vedelik märgab tahket keha, siis ta valgub plaadi pinnal laiali (joon. 296 *a*). Kui aga vedelik ei märga tahket keha, siis tekib tilk (joon. 296 *b*).

Kehade erinevat märgamist erinevate vedelike poolt rakendatakse maakide rikastamisel, s. o. nende mineraalide eraldamisel maakidest, millel ei ole tööstuslikku väärtust. Kogemused näitavad, et selliste mineraalide (kvarts, silikaadid, rauahapendid jt.) pinnal vesi valgub laiali (märgamine), moodustades üliõhukese kelme. Kui visata selliste mineraalide tükikesi vette, siis nende külge ei kleepu õhumullikesi.

Hinnaliste mineraalide (tinaläige, vaskrähk, väävel, grafiit jt.) pinnale koguneb vesi tilgakeste kujul (mittemärgamine), kuid õlivedelikud moodustavad õhukesed kelmed. Selliste mineraalide väikesed osakesed kleepuvad vees olevate õhumullikeste külge. Maagi rikastamisel jahvatatakse ta pulbriks. Viimast loksutatakse vee ja õliga. Saadakse õlikilega õhumullikestest koosnev vaht. Kiledele kleepuvad hinnaliste mineraalide tükikesed, mis tõusevad koos vahuga üles, kuna väärtuseta mineraalide tükikesed (aheraine), mida ei kanna õhumullikesed, langevad kambri põhja

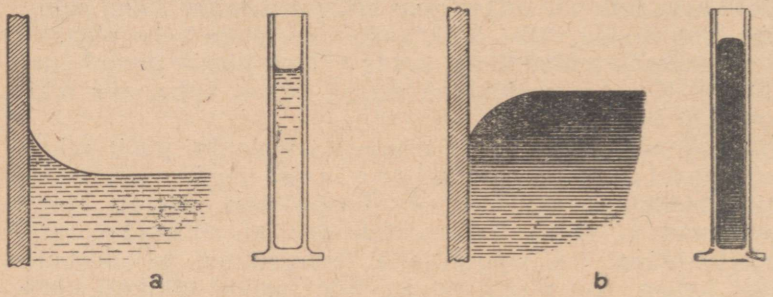


Joon. 297. *a* — flotatsiooniseadise skeem; *b* — õhuga täidetud õlikilele kleepuvad metallitükikesed ja ujuvad üles, aheraine sadestub anuma põhjale.

(joon. 297). Sellist maakide rikastamist ja mitmesuguste metallide eraldamist nimetatakse flotatsiooniks.

Adhesiooni ja kohesiooni erinevusest on tingitud vedeliku pinna kõverdumine anuma seina äärtel.

Märgamisel tõstab adhesioon vähesel määral vedeliku pinda anuma seina äärtel ja muudab vedeliku pinna seal nõgusaks (joon. 298 *a*).



Joon. 298. *a* — märgamisel on vedelik anuma seinte ääres tõusnud; *b* — mittemärgamisel on vedelik anuma seinte ääres langenud. Peenikestes torudes on vedeliku pind kumer.

Mittemärgamisel aga, vastupidiselt, eemaldavad vedeliku molekulide kohesioonjõud, mis on suunatud vedeliku sisse, vedeliku anuma seintest ja vedeliku pind muutub kumeraks (joon. 298 *b*).

175. Kapillaarsus. Suhkrutükk, tellis, kuivatuspaber, käterätt ja rida teisi kehi imevad endasse vett. Millega seda seletada? Kõikides nendes kehades on palju väikesi kanaleid, mis on ülipeenikeste torukeste taolised.

Selliseid torukesi nimetatakse kapillaarideks (lad. k. capillus — juus).

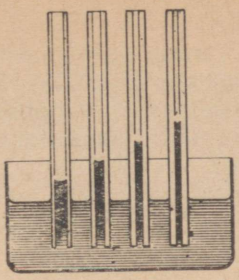
Pistame mõne klaasist kapillaartoru otsa veeanumasse. Vesi tõuseb nendes torudes veepinnast seda kõrgemale, mida peenem on toru (joon. 299).

Kui samasugused torud pista elavhõbeda anumasse, siis elavhõbeda nivoo osutub nendes madalamaks kui anumas (joon. 300).

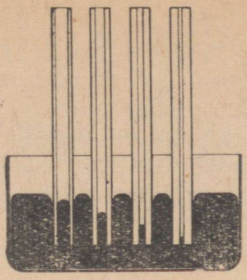
Vedeliku pind on kapillaartorus kogu ulatuses kõver; seda kõverat pinda nimetatakse meniskiks. Nagu näitavad joonised 299 ja 300, on menisk märgamise puhul nõgus ja mittemärgamisel — kumer.

Vedeliku tõusu kõrgust kapillaartorudes võib kergesti arvutada.

Joon. 301 on kujutatud vedelikku pistetud kapillaartoru läbilõike suurendus. Vedeliku pind hoitakse toru sees üleval ring-



Joon. 299. Märgamisel on vedeliku nivoo kapillaartorudes kõrgemal kui laias anumas.



Joon. 300. Mittemärgamisel on vedeliku nivoo kapillaartorudes- madalamal kui laias anumas.

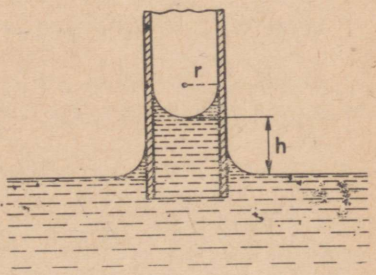
joont $2\pi r$ mööda, mille juures pinna ääred on peaaegu vertikaalsed. Pindpinevus mõjub vertikaalses sihis klaasile kleepunud kile ringjoone $2\pi r$ ulatuses. Kui pindpinevuskoefitsient on σ, siis jõud, mis hoiab vedelikku pindkile äärt pidi, on $2\pi r\sigma$, kus r on toruõõne raadius. See jõud hoiab ülal vedelikusamba, mille kõrgus on h ja raskus $\pi r^2 hDg$, kus D on vedeliku tihedus.

Kuna vedelik on torus tasakaalus, siis

$$2\pi r\sigma = \pi r^2 hDg, \text{ millest } h = \frac{2\sigma}{rDg}.$$

Vedeliku tõus kapillaartorus on võrdeline pindpinevuskoefitsiendiga ja pöördvõrdeline toru raadiusega.

Tuletatud valem on rakendatav ka mittemärgava vedeliku jaoks; kuid sel juhul ei ole juttu vedeliku tõusust, vaid langemisest.



Joon. 301. Kapillaartorus olevat vedelikusammast kõrgusega h hoiab üleval pindpinevusjõud, mis mõjub ringjoont mööda, mille raadius on r.

Kapillaarsusega on seletatav vedeliku levimine poorses kehas: vedeliku tõus tahis, vedeliku tungimine kive mööda vundamendisse, niiskuse tõus maapinnas ja paljud teised nähtused.

Erakordselt tähtsat osa mängivad kapillaarnähtused bioloogias. Enamik taim- ja loomkudesid on läbistatud väga suurest hulgast iga liiki kanalitest, mis kujutavad endast kapillaartorusid.

Vedelike liikumisega nendes anumates on seletatavad niisugused bioloogilised nähtused, nagu toitvate mahlade levimine juurtest kuni taime ladvani.

Vedelike kapillaarne tõus on asjaolu, mida arvestatakse põllumajanduses. Asi seisneb selles, et pinnases olev niiskus tõuseb kapillaare mööda pinnale ja aurustub. Selleks et vähendada aurustumist, on tarvis kapillaarid lõhkuda. Seda saavutatakse pinnase kobestamise teel (põldu äestatakse).

Mõnikord (näiteks pärast tatra külvamist) on tarvis vastupidist — suurendada niiskuse juurdevoolu kapillaaride kaudu. Siis kapillaarkanalite arvu suurendamiseks rullitakse põldu.

Harjutus 69.

1. Vee pindpinevus $\sigma = 74 \frac{\text{dyn}}{\text{cm}}$. Millisele kõrgusele tõuseb vesi kapillaartorus, mille raadius on 0,05 mm?

2. 1 mm diameetriga torus tõuseb vesi 30,05 mm kõrgusele. Leida nende andmete põhjal vee pindpinevus.

XVI PEATÜKK.

TAHKETE KEHADE OMADUSED.

176. Kristallilised ja amorfsed kehad. Tehakse vahet kahte liiki tahkete kehade — kristalliliste ja amorfsete vahel. Mõlemad need liigid erinevad oluliselt teineteisest füüsikaliste omaduste poolest.

Homogeense kristallilise keha peamiseks tunnuseks on see, et ta füüsikalised omadused, nagu soojuspaisumine, soojusjuhtivus, elektrijuhtivus, mehhaaniline tugevus jt., pole igas suunas ühesugused. Seda kristallide omadust nimetatakse anisotroopsuseks[1].

Katame kipsplaadi ja klaasplaadi õhukese vaha- või parafiinikihiga ning puudutame neid tulise nõela otsaga (joon. 302).

Me näeme, et puutepunkti O ümber sulab parafiin ära, mille juures sulanud ala piirjoon on kristallilise kipsplaadi juures ellips (joon. 302 *b*), kuna klaasplaadil — ringjoon (joon. 302 *c*).

See katse näitab, et soojus ei levi kristallilises kipsis nii nagu klaasis, vaid igas suunas erinevalt.

Kristalli oluliseks väliseks tunnuseks on tema korrapärane geomeetriline kuju. Seejuures on kristallilise kuju iseloomustavaks tunnuseks ühe ja sama aine kristallide tahkudevaheliste nurkade võrdsus.

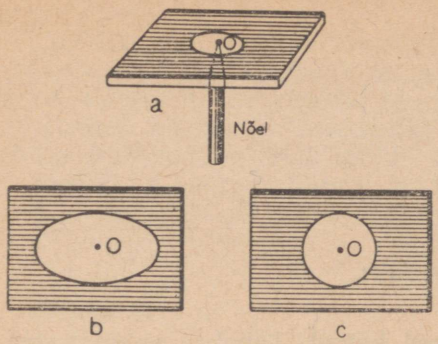
Kristallilisteks kehadeks on metallid, keedusool, vasevitriol, kvarts, maarjajää jt. Joonisel 303 on kujutatud mäekristallide perekond.

Kui keha kujutab endast ühte kristalli, siis teda nimetatakse monokristalliliseks (monos — üks).

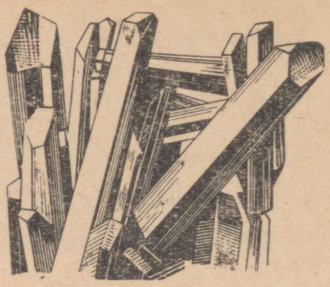
Keha, mis koosneb paljudest korrapäratult asetatud ja kokkukasvanud väikestest kristallidest, nimetatakse polükristalliliseks (polü — palju). Polükristallilise keha füüsikalised omadused on selle tõttu, et kristallikesed on korrapäratult asetatud, igas suunas ühesugused.

Polükristalliliste kehade hulka kuuluvad metallid. Mõnikord võib isegi palja silmaga näha kõvasti karastatud terase, malmi ja valgevase murde pinnal väikesi kristalle. Mõnede teiste metallide kristallilist struktuuri võib kindlaks teha mikroskoobi abil. Kuid

[1] Anisotroopia — kreekak. sõnadest *anisos* — mitteühtlane, *tropos* — omadus.



Joon. 302. Kui puudutada kuuma nõela otsaga vahaga kaetud plaati, siis vaha sulab.



Joon. 303. Mäekristallide perekond.

mõned polükristallilised kehad koosnevad nii väikestest kristallikestest, mida pole võimalik näha isegi mikroskoobi abil.

Erinevalt kristallilistest kehadest on amorfsetel[1] kehadel igas suunas ühesugused füüsikalised omadused.

Amorfseteks kehadeks on näiteks pigi ja klaas.

Pigitükk puruneb vasara löögist, s. o. käitub nagu habras tahke keha, kuid ühtlasi ilmneb tema juures vedelike omadusi. Kõvad pigitükid näiteks valguvad aja jooksul horisontaalsel pinnal laiali. Ümberläinud vaadist voolab pigi aeglaselt välja. Anumas olevad pigitükid valguvad aegamööda laiali ja pigi võtab lõpuks anuma kuju. Rasked kehad upuvad aeglaselt pigis, kuid pigikihi alla paigutatud kerged kehad ujuvad aja jooksul pigi pinnale. Nende omaduste põhjal võib pigi vaadelda kui väga paksu ja sitket vedelikku.

Klaas on väga tugev ja kõva, s. t. tal on tahke keha iseloomulikud tunnused, kuid oma molekulaarse struktuuri poolest kuulub ta rohkem vedelike hulka.

Tänapäeval kasutatakse laialdaselt tehnikas amorfseid kehi plastmassi kujul.

Esineb juhtumeid, et üks ja sama aine võib olla nii kristallilises kui ka amorfses olekus. Peensuhkur näiteks omab kristallilist struktuuri. Kuid sama peensuhkur pärast ülessulamist hangub läbipaistvaks klaasitaoliseks kompvekiks, mis osutub juba amorfseks aineks. Aja jooksul see kompvek «suhkrustub» — s. o. kattub kristallilise suhkru koorukesega.

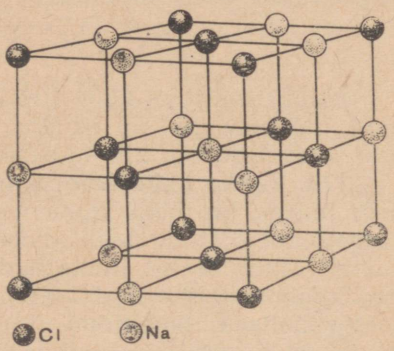
Kui sulatatud ja veidi üle 300° C kuumendatud väävlit valada külma vette, siis saadakse pehme amorfne väävel, mis aja jooksul läheb üle kristalliliseks. Pikema aja jooksul võib kristalliseerumist tähele panna ka klaasis. See ilmneb klaasi mõnes osas tuhmide plekkide tekkimises.

[1] *Amorfos* (kreeka k.) — kujuta, vormita.

Nendest tähelepanekutest võib teha järelduse, et tahke keha amorfne olek ei ole püsiv. Paljudel juhtudel amorfne keha läheb järk-järgult üle kristalliliseks.

177. Ruumvõred. Kristallide uurimised röntgenikiirte abil, mida alustati 1912. a., tõestasid, et kristallide korrapärasus on seletatav aatomite korrapärase paiknemisega kristalli sees.

Kui kristalli aatomid ühendada sirgjoontega, siis saadakse niinimetatud r u u m v õ r e. Kristalli moodustavad üksikud aatomid asetsevad ruumvõre moodustavate joonte lõikepunktides (sõlmpunktides). Tihti on ruumvõre sõlmpunktides positiivselt või negatiivselt laetud aatomid — ioonid. Joonisel 304 on kujutatud keedusoola ruumvõre skeem. Iga *Na* positiivne ioon on *Cl* negatiivsete ioonide vahel ja iga negatiivne *Cl* ioon asetseb *Na* positiivsete ioonide vahel. *Na* ja *Cl* ioone üksteise läheduses hoidvad jõud on oma loomult elektrilised külgetõmbejõud.



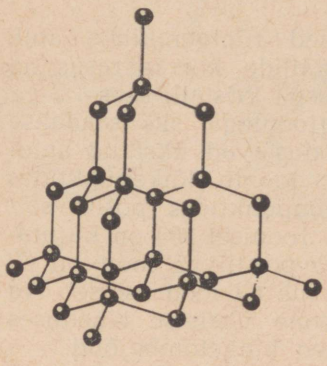
Joon. 304. Keedusoola ruumvõre.

Ruumvõrede kujude mitmekesisusega on seletatav kristallide kujude mitmekesisus.

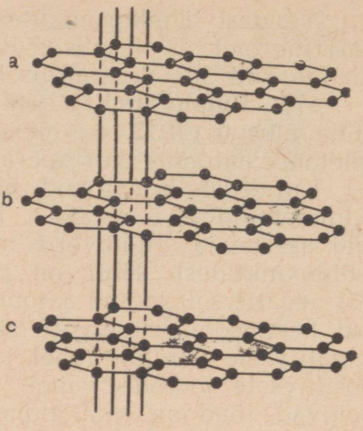
Ruumvõre ümberehitusega muutuvad ka keha füüsikalised omadused. Aine omadust võtta mitut kristallilist olekut nimetatakse p o l ü m o r f i s m i k s (mitmekujususeks).

Süsinik võib olla aine näiteks, mis võib võtta mitut kristallilist olekut. Kui süsiniku aatomid on paigutatud nii, nagu kujutatud joonisel 305 *a*, siis on tegemist kõva teemandiga. Aatomite paiknemisel ahelasse kuusnurgakujuliselt (joon. 305 *b*) saadakse grafiit. Grafiidi kõvadus on palju väiksem teemandi kõvadusest. Grafiidis nihkub kergesti üks ahelate kiht teise suhtes, mis lubab grafiiti kasutada määrdeainetes.

Väliste mõjude (rõhk, temperatuur) toimel võib muutuda aine kristalliline struktuur. Nii võivad näiteks raua ja terase väikesed kristallid üle minna suuremateks. Eriti kiiresti toimub see protsess raputamiste-põrutamiste puhul, nagu näiteks raudteerööbaste, sildade ja vagunitelgede juures.



Joon. 305 *a*. Teemandi ruumvõre.



Joon. 305 *b*. Grafiidi ruumvõre.

Polükristallilise keha kristallikeste suurus mõjustab oluliselt keha tugevust. Nii on näiteks väiksematest kristallikestest koosnev teras tugevam kui suurematest kristallikestest koosnev teras.

178. Tahke keha deformatsioon. Nii nagu vedeliku molekulidegi juures, on tahke keha molekulide või aatomite vahel peale külgetõmbejõudude tegutsemas veel tõukejõud. Osakeste lähendamisel suurenevad tõukejõud, ja seda rohkem, mida lähemale me viime nad üksteisele. Keha venitamisel saavad ülekaalu osakestevahelised tõmbejõud. Joonisel 306 kujutatud mehhaaniline mudel illustreerib kristalliosakeste omavahelise mõju iseloomu. Kristalliosakesed asetsevad ruumvõre sõlmedes ja võnguvad tasakaaluasendite ümber.

Igasugune väline, näit. mehhaaniline mõju kristallile rikub ruumvõre tasakaaluolekut. Ta põhjustab kristalli sees osakeste nihkumist, mis tekitab keha kuju ja ruumala muutumist, s. o. deformatsiooni.

Vaatleme, millest sõltub keha deformatsiooni suurus. Deformatsiooni suuruse all tuleb mõista venimise, kokkusurumise, paindumise jne. suurust. Vaatleme katset.

Asetame puust joonlaua otstega kahele toele. Joonlaud asetseb horisontaalselt, peaaegu sirgjooneliselt. Paneme nüüd joonlaua keskele mingi koormuse. Joonlaud paindub, koormuse suurenemisel paindumine suureneb.

Riputades kummipalmiku otsa mitmesuguseid koormusi, me näeme, et mida suurem on koormus, seda rohkem venib palmik välja.

Järelikult sõltub deformatsiooni suurus rakendatud jõu suurusest.

Tehes kirjeldatud katse paksema joonlauaga, märkame, et niisama suure koormuse puhul on deformatsioon väiksem. Samuti venib paks palmik mingi koormuse mõjul vähem kui peenike palmik sama koormuse puhul.

Asetame jälle õhukese joonlaua kahele toele ja paigutame temale koormused mitmesugustes kohtades; selgub, et deformatsiooni suurused on erinevad.

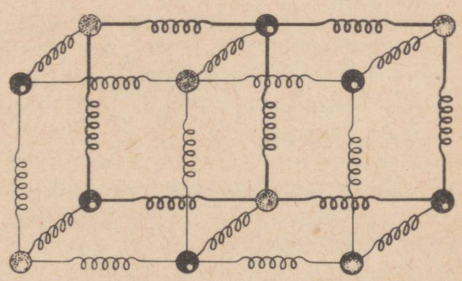
Kui puust joonlaua asemel võtta niisama suur joonlaud mingist teisest ainest ja sooritada kirjeldatud katsed, siis võime kindlaks teha, et deformatsioon sõltub sellest materjalist, millest on valmistatud joonlaud.

Seega näitavad katsed, et deformatsiooni suurus sõltub keha suurusest, jõu rakenduskohast ja suunast ning materjalist, millest on valmistatud keha.

179. Elastsus ja plastilisus. Me nägime, et materjal, millest on valmistatud keha, mõjustab oluliselt deformatsiooni suurust.

Materjalide väga tähtsate omaduste hulka kuuluvad e l a s t s u s ja p l a s t i l i s u s. Mis omadused need on ja missugust osa mängivad nad tehnikas? Pöördume uuesti katse juurde. Painutame natuke puust joonlauda ja laseme ta siis vabaks. Me näeme, et ta sirgestub ja võtab endise kuju. Järelikult deformeerus joonlaud jõu toimel, kuid jõu toime lakkamisel deformatsioon kadus täielikult.

Deformatsioone, mis kaovad pärast jõu mõju lõppemist, nimetatakse e l a s t s e t e k s d e f o r m a t s i o o n i d e k s.



Joon. 306.

Kehade omadust võtta pärast jõu mõju kadumist tagasi oma esialgne kuju ja ruumala, nimetatakse e l a s t s u s e k s.

Kordame katset puust joonlauaga, kuid seekord painutame teda tugevamini; me näeme, et joonlaua juures kaob jällegi deformatsioon, kuid lõplikult siiski joonlaud ei sirgestu. Pärast jõu mõju kadumist kehasse jäänud deformatsiooni nimetatakse p l a s t i l i s e k s d e f o r m a t s i o o n i k s.

Plastiline deformatsioon iseloomustab materjali omadust, mida nimetatakse p l a s t i l i s u s e k s.

Elastsus ja plastilisus on omased kõikidele tahketele kehadele.

Kui koormata terasvedrut, siis võime tähele panna, et väiksemate venitamiste puhul taastub täielikult vedru kuju ja suurus; kui aga venitamine on tugevam, siis võib kindlaks teha plastilise deformatsiooni olemasolu. Tugevasti kokkusurutud kummisilinder näiteks ei saa endist suurust, vaid võtab vaadi kuju.

Kui aga pliist valmistatud joonlauda kergelt painutada, siis ta sirgestub täielikult. Kergelt venitatud pliispiraal vedrutab. Niisugustel juhtudel ilmnevad plii juures elastsed omadused.

Sellepärast on materjalide jaotamine elastseteks ja plastilisteks tinglik. Kuid praktikas seda jaotust siiski tehakse.

Suurust, mida mõõdetakse latile asetatud koormuse ja lati ristlõike suhtega, nimetatakse pingeks ja antakse harilikult $\frac{kG}{cm^2}$*-tes või* $\frac{kG}{mm^2}$*-tes.*

Minimaalset pinget, mille puhul tekivad esimesed plastilise deformatsiooni tunnused, nimetatakse elastsuspiiriks.

Ühesuguse suuruse ja kujuga, kuid erinevast materjalist valmistatud kehadel on erinevad elastsuspiirid. Järgnevas tabelis on näidatud mõnede materjalide elastsuspiirid.

Materjal ja töötlemise viis	Elastsuspiir $\frac{kG}{cm^2}$
Valtsteras, süsinikune	2570
Sepateras, "	1860
Nikkelteras, vanaadiumiline, noolutatud	5830
Raud (tõmbe)	3160
Koltšugalumiinium, karastatud	1900—2300
" külmvalts	3500—5000
Plii	25
Tamm, piki süüd	250

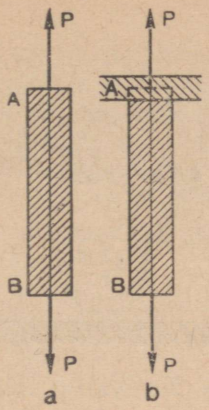
Keha deformeerimisel tekkinud jõudu nimetatakse elastsusjõuks. Elastsusjõud on vastupidine välise jõuga. Mida suurem on keha deformatsioon, seda suurem on elastsusjõud. Elastsusjõud kaob niipea, kui kaob kehas tekkinud deformatsioon.

180. Deformatsioonide liigid. Kehas tekkivad elastsed deformatsioonid võivad olla mitmesugused.

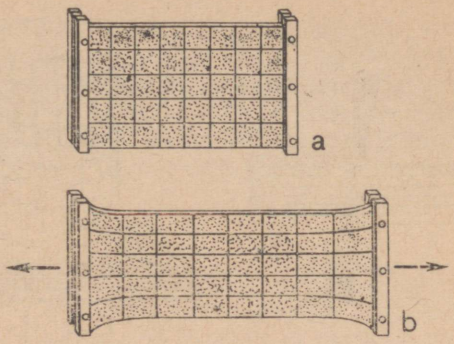
Tehakse vahet nelja põhilist liiki deformatsiooni vahel: tõmme (või surve), nihe, vääne ning paine. Vaatleme neist igaühte eraldi.

1. *Tõmbedeformatsioon.* Rakendame sirgele varvale *AB* telje suunas jõud *P*, mis on suuruselt võrdsed ja vastassuunalised (joon. 307 *a*).

Need jõud venitavad varba. Võime ühe varva otsa liikumatult kinnitada ja teisele otsale rakendada jõudu (joon. 307 *b*). Tulemus on sama mis esimeselgi juhul.



Joon. 307. Jõudude toimel varb venib.



Joon. 308. Venitamisel muutuvad ruudukujulised osakesed ristkülikukujulisteks.

Mida suurem on varvale rakendatud jõud P, seda suurem on varva venimine.

Joonestame kummiribale ruudustiku (joon. 308 *a*) ja venitame teda nii, nagu näidatud joonisel 308 *b*. Me paneme tähele, et üheaegselt pikenemisega riba aheneb. See katse näitab, et pikivenitamisel keha pikkus suureneb, kuid vähenevad ristlõike mõõtmed.

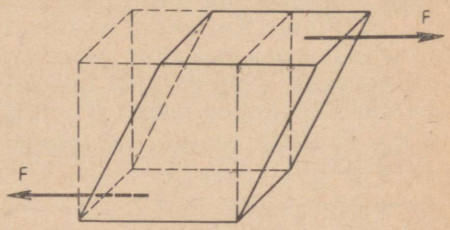
Tõmbedeformatsiooniga on tegemist trosside, köite, sildade ja tõsteseadeldiste kettide, vagunite ühenduste, ehituskonstruktsioonide talade jne. juures.

Kui varvale AB mõjuvad vastassuunalised jõud (joon. 309), siis ta surutakse kokku. Ta pikkus seejuures väheneb, kuid ristlõike mõõtmed suurenevad.

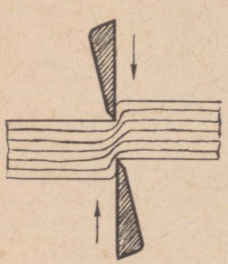
Pole raske näha, et survedeformatsioon on vastupidine tõmbedeformatsioonile.

Survedeformatsiooniga on tegemist sammaste, postide, seinte, maja vundamentide ja ehituskonstruktsioonide kandmikkude jt. juures.

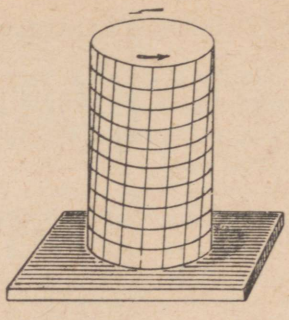
Joon. 309. Jõudude toimel surutakse varb kokku.



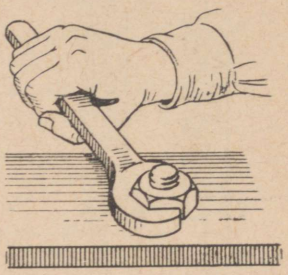
Joon. 310. Nihe.



Joon. 311. Lõige.



Joon. 312. Väände juures keha kihid pöörduvad üksteise suhtes.



Joon. 313. Väände näide.

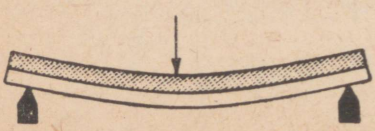
2. *Nihe.* Kehale võivad mõjuda jõud, mis püüavad ühte keha osa nihutada teise keha osa suhtes, nii nagu see on näidatud joonisel 310. Deformatsiooni nimetatakse sel juhul n i h k e k s. Nihkedeformatsioonist annab kujutluse raamatulehtede nihkumine, kui nihutada lauale asetatud raamatu ülemist kaant paralleelselt alumise suhtes, kusjuures alumine jääb paigale. Kõik raamatulehed nihkuvad üksteise suhtes.

Kui plokile mõjuvad võrdsed ja suunalt vastupidised jõud, mis nihutavad ühte ploki osa teise suhtes, nagu on näidatud joonisel 311, siis nende jõudude küllaldase suuruse juures saame lõike. Seda nähtust võib tähele panna lõikamisel kääridega.

Nihkedeformatsiooniga on tegemist näiteks metallosade ühenduspoltide ja neetide juures.

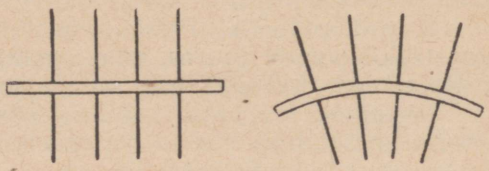
3. *Vääne.* Kui varvale, mille üks ots on kinnitatud, mõjub jõupaar, mis asetseb varva telje suhtes ristiseisvas tasapinnas, siis saadakse deformatsioon, mida nimetatakse v ä ä n d e k s. Väände puhul jäävad keha üksikud kihid omavahel paralleelseteks, kuid üksteise suhtes pööratuks (joon. 312). Seda liiki deformatsioon tekib näiteks mutrite kinnikeeramisel (joon. 313), samuti on sellega tegemist masinavõllide, -telgede jt. juures.

4. *Paine.* Kui varva üks ots on kinni, aga teisele mõjub koormus, siis varb paindub. Varva sirgjooneline telg muutub kõverjooneliseks. Teljega risti tekkinud suurimat paindumist (kõrvalekaldumist) nimetatakse l ä b i p a i n d u m i s e k s (painde kõrgus). Paindub samuti latt (varb), kui ta toetub mõlemale otsale (joon. 314).



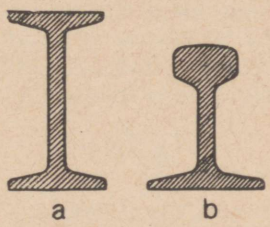
Joon. 314. Lati nõgus pool surutakse paindel kokku ja kumer pool venitatakse välja.

Kui painutatavale latile tõmmata paralleelsed jooned, siis paindumisel need jooned ei jää paralleelseteks. Lati nõgusal poolel jooned lähenevad, kuid kumeral poolel pikenevad. See on näitlikult kujutatud joonisel 315. Äärmiste kihtide vahele jääb kiht, mis muutis ainult oma kuju, kuid mille pikkus on jäänud muutumatuks. Seda kihti nimetatakse neutraalseks kihiks.



Joon. 315. Joonte asetus näitab, et painutatava keha üks pool on välja venitatud ja teine pool kokku surutud.

Neutraalse kihi läheduses aine peaaegu ei deformeeru. Sellepärast asendatakse täisvarvad õõnsate torudega, taladele antakse T või I kuju (joon. 316). Joonisel 316 on näidatud rööpa läbilõige (rongi raskuse mõjul rööbas saab paindedeformatsiooni). I-kujuline tala kujutab endast tõeliselt ristkülikukujulise ristlõikega tala, millest on eemaldatud osa keskmist kihti, mis, nagu me nägime, ei deformeerunud. Sellepärast niisuguste materjalide kasutamine ehitustes annab suurt säästu, ilma et seejuures halveneksid ehituslikud omadused.



Joon. 316. I-raua (vasakpoolne, joon. *a*) ja rööpa (parempoolne, joon. *b*) läbilõige.

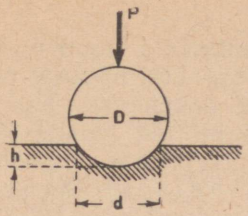
Kasutades täisvarbade asemel torusid, me ainult ei hoia kokku materjali, vaid teeme sellega paljud seadised ja masinad kergemaks.

Loomade luud, nagu teada, on torulise ehitusega, mis vähendab nende kaalu.

Praktikas ettetulevate juhtumite enamiku juures osutub deformatsioon mitme põhilise deformatsiooni üheaegseks kombinatsiooniks.

Võib näidata, et mistahes liiki deformatsiooni võib seletada ühega kahest lihtsamast: tõmbe- (või surve-) ja nihkedeformatsiooniga. Tõmbedeformatsiooni puhul mõjuvad kehale jõud, mis on risti ristlõikega, kuna nihkedeformatsiooni puhul mõjuvad jõud ristlõike puutujat mööda.

180 a. Kõvadus. *Materjali kõvaduse all mõeldakse võimet vastu panna kõvema keha sissetungimisele.*



Joon. 316 *a*.

Kõvadust tuleb arvestada materjali kasutamisel igasuguste konstruktsioonide juures, kuid samuti lõikeinstrumentide — puuride, terade, freeside jne. valmistamisel.

Metallide kõvaduse määramiseks on olemas mitu meetodit. Üheks levinumaks viisiks on karastatud terasest kuulikese surumine proovitavasse metalli.

Kui suruda jõuga P uuritavasse metalli karastatud teraskuulike, mille diameeter on D, nagu näidatud joonisel 316 *a*, siis tungib kuulike metallisse teatud sügavusele h ja jätab sinna jälje ümmarguse lohu kujul diameetriga d.

Kõvadust iseloomustavat suurust tähistatakse H_B-ga ja arvutatakse järgmise valemi abil:

$$H_B = \frac{P}{S} \frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}.$$

P on kuulikesele mõjuv koormus kG-des ja lohu pindala mm^2-tes.

Kõvadust proovitakse sagedasti valmistoodete juures. Mida õhem on ese, seda väiksema diameetriga võetakse kuulike ja seda väiksema jõuga seda surutakse. Järgnevas tabelis antakse suurused, mis iseloomustavad mõnede metallide kõvadust.

Materjal	Kõvadus $\frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$
Teras	150—300
Kõva teras	kuni 850
Malm	130—300
Alumiinium, valtsitud	45
Vask	60
Valge metall (kuullaagrite jaoks)	20—28

Kristalliliste kehade kõvadus on suurel määral sõltuv nende pinna seisundist. Kristallide pinnal on tavaliselt väikesed praod, millede suurendamine vähendab kristalli kõvadust. Uurimistega on kindlaks tehtud, et kristallide niisutamisel mõnede ainete lahustega satuvad viimased nendesse pragudesse ja soodustavad kristalli purunemist, s. o. vähendavad tema kõvadust. Seda kristalli kõvaduse vähenemise nähtust kasutatakse puurimistöödel.

180 b. Hooke'i seadus. Kõikide §-s 180 vaadeldud deformatsiooni liikide juures võib rakendada inglise teadlase Hooke'i (loe huuk) (1635—1703) poolt avastatud üldist seadust.

Hooke'i seadust formuleeritakse järgmiselt:

Elastsuse piirides on deformatsiooni suurus võrdeline teda tekitava jõuga.

Nii on varva venimine või lühenemine seda suurem, mida suurem on tõmme või surve. Lati painde suurus on võrdeline latile asetatud koormusega, nihke nurk on võrdeline kehale mõjuva jõuga jne.

Vaatleme lähemalt Hooke'i seaduse rakendamist tõmbedeformatsioonile.

Joonisel 316 *b* on kujutatud vertikaalselt ülesriputatud traat, mille vaba otsa külge asetatakse koormus *P*.

Olgu traadi esialgne pikkus l_0 ja pikkus pärast deformatsiooni — l.

Suurust $l - l_0$ nimetatakse traadi absoluutseks pikenemiseks tõmbe puhul. Antud koormuse juures on absoluutne pikenemine sõltuv traadi esialgsest pikkusest. Mida suurem on pikkus, seda suurem on ka absoluutne pikenemine. Seega ei saa absoluutne pikenemine olla aine deformatsiooni mõõduks. Deformatsiooni mõõduks võetakse traadi esialgse pikkuse ühe pikkusühiku pikenemine, s. o. $\frac{l - l_0}{l_0}$. Seda suurust nimetatakse suhteliseks (relatiivseks) pikenemiseks.

Tähistame traadi ristlõike pindala tähega *S*. Jagades koormuse *P* traadi ristlõike pindalaga *S*, saame pinge suuruse, mida tähistame tähega σ.

Seega $\sigma = \frac{P}{S}$. (1)

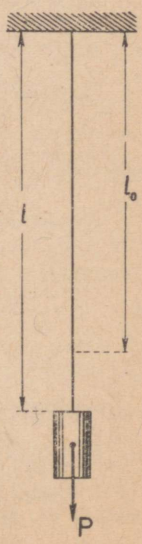
Hooke'i seadus tõmbedeformatsiooni jaoks kirjutatakse nii: *suhteline pikenemine on elastsuse piirides võrdeline pingega, s. o.*

$$\frac{l - l_0}{l_0} = \alpha\sigma. \quad (2)$$

Suurust α nimetatakse venimise koefitsiendiks.

Kui $\sigma = 1 \frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$, siis $\alpha = \frac{l - l_0}{l_0}$, s. o.

venimise koefitsient on arvuliselt võrdne suhtelise pikenemisega, kui pinge on võrdne ühega.



Joon. 316 *b*. Hooke'i seaduse juurde.

Asetame valemis (2) σ asemele võrdusest (1) võetud avaldise:

$$\frac{l - l_0}{l_0} = \alpha \frac{P}{S} \quad \text{või} \quad l - l_0 = \alpha \frac{Pl_0}{S}.$$

Tehnilises kirjanduses on kombeks teha arvutusi mitte venimise koefitsiendi põhjal, vaid suuruse E põhjal, kus $E = \frac{1}{\alpha}$. Seda suurust nimetatakse e l a s t s u s m o o d u l i k s.

Missugune füüsikaline tähendus on sellel suurusel? Vaatleme konkreetset näidet.

5 m pikkusega ja 2 mm^2 ristlõikega traat pikeneb 5 mm võrra, kui koormus on 40 kG. Määrata traadi venimise koefitsient ja elastsusmoodul.

Valemi $l - l_0 = \frac{\alpha P l_0}{S}$ põhjal leiame:

$$5 \text{ mm} = \alpha \frac{40 \text{ kG} \cdot 5000 \text{ mm}}{2 \text{ mm}^2}; \quad \alpha = \frac{5 \text{ mm} \cdot 2 \text{ mm}^2}{40 \text{ kG} \cdot 5000 \text{ mm}} = \frac{1 \text{ kG}}{20\,000 \text{ mm}^2}.$$

Selle näite lahendamisega leidsime, et 1 mm^2 ristlõikega traadi pikkus suureneb 1 kG suuruse koormuse mõjul $\frac{1}{20\,000}$ esialgsest pikkusest. Kui aga koormus võtta $20\,000 \frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$, siis traadi pikkus suureneks kahekordseks. Tähendab, *elastsusmoodul näitab pinget, mida tuleb rakendada traadile, et venitada teda kaks korda pikemaks.*

Praktiliselt on selline koormus võimatu, kuna kõik materjalid, peale kummi, katkevad ammu enne sellist pikenemist.

Mõnede materjalide elastsusmoodulid on toodud järgnevas tabelis.

Materjalid	$E\left(\frac{\text{kG}}{\text{cm}^2}\right)$
Teras	$2{,}0—2{,}2 \cdot 10^6$
Vask	10^6
Malm	$0{,}75—1{,}6 \cdot 10^6$
Alumiinium	$0{,}7 \cdot 10^7$
Plii	$1{,}7 \cdot 10^6$
Puit	10^5

Harjutus 70.

1. Silindrilist terasest varba ($d = 2$ cm), mille pikkus on 16 m, venitatakse jõuga 3,6 T. Leida selle varva pikenemine ja pinge.
2. Terastraat venib 2 mm võrra, kui temale mõjub jõud 32 kG. Arvutada venitava jõu töö.

181. Tugevus. Tugevuse varu. Tugevus on esimene nõue igale konstruktsioonile või tootele. *Materjali tugevuseks nimetatakse tema omadust vastu panna väliste jõudude toimele ja mitte puruneda.*

Pinget, mille juures deformeeritav materjal puruneb, nimetatakse tugevuse piiriks.

Mõnede materjalide tugevuse piirid on antud järgnevas tabelis.

Materjal	Tugevuse piir $\left(\frac{kG}{cm^2}\right)$	
	tõmbel	survel
Teras (0,14% süsinikku)	5000	4000
Teras (instrumendi, 0,96% süsinikku)	9500	6700
Terastraat	8000	—
Malm	1000—2200	3700—8800
Vask	2400	4200
Plii	130—220	—
Tamm	700	700
Kuusk	700	200
Tellis	20	60

Konstruktsioonide detailide murdumiste ja purunemiste vältimiseks ei tohi neid koormata nii, et pinge oleks võrdne või lähedane tugevuse piirile.

Praktiliselt võetakse lubatav pinge nii, et ta moodustaks tugevuse piirist vaid mingi murdosa.

Arvu, mis näitab, mitu korda tugevuse piir on suurem lubatavast pingest, nimetatakse tugevuse varuks ehk ohutuse koefitsiendiks.

Tugevuse varu määravad erilised riiklikud asutused; nad kasutavad selle tähtsa ülesande lahendamiseks nii tehnilisi kui majandusteaduslikke andmeid. Terase jaoks näiteks võetakse tugevuse varuks keskmiselt 2,5—4, raua jaoks 4—5, malmi jaoks 6—8, puidu jaoks 8—10.

Tugevuse varu võetakse sõltuvalt konstruktsiooni liigist ja koormuse iseloomust.

Püsivate koormuste juures on tugevuse varu väiksem kui muutlike koormuste juures ja eriti suur peab ta olema seal, kus on tegemist löökidega.

Harjutus 71.

1. Kaks traati, välja arvatud pikkus, on täiesti ühesugused. Ühe pikkus on 150 cm ja teise oma 300 cm. Esimene traat katkeb 12 kG koormuse juures. Kui suurt jõudu on tarvis teise traadi katkitõmbamiseks?

2. Traadi ristlõige on 0,00258 cm^2. Traat katkeb 22,7 kG jõu mõjul. Leida selle traadi tugevuse piir.

3. Kui suurt jõudu on tarvis mänguriista keele ($d = 0{,}1$ cm) katkitõmbamiseks, kui selle keele materjali tugevuse piir on 80 $\frac{kG}{mm^2}$?

4. Terasriba, mille laius on 160 mm ja paksus 12 mm, venitatakse jõuga $F = 20$ T. Kui suur on seejuures tugevuse varu, kui selle terase tugevuse piir, millest riba on valmistatud, on 4200 $\frac{kG}{cm^2}$? Elastsuspiir on 1800 $\frac{kG}{cm^2}$.

Kui suur on kõige väiksem tugevuse varu, mille puhul pinge ei ületa elastsuspiiri?

181 a. Metallide omaduste tähtsus nende töötlemisel ja kasutamisel. Metallid on võrreldes teiste materjalidega suurema vastupidavusega, sellepärast tehakse masinate, mehhanismide ja konstruktsioonide koormatavad osad harilikult metallidest.

Lõikeinstrumentide ja ka teiste instrumentide valmistamisel kasutatakse spetsiaalseid instrumenditeraseid. Mõõteriistad näiteks valmistatakse terase erisortidest, mis sisaldavad lisanditena kroomi, niklit, molübdeeni ja mangaani. Niisuguse koostisega teras on pärast karastamist eriti tugev.

Laialdaselt rakendatakse masinaehituses materjalide elastsust. Masina töötamisel on masina osad mitmesuguste koormuste mõju all, mille tõttu nad deformeeruvad. On selge, et need deformatsioonid ei saa olla plastilised, muidu oleks masina töö takistatud: ühed masina osad lüheneksid, teised pikeneksid, kolmandad kõverduksid jne. Lõppude lõpuks masin jääks seisma.

Metallide plastilisi omadusi kasutatakse laialdaselt nende töötlemisel survega, nagu valtsimisel, tõmbamisel, stantsimisel, sepistamisel jne.

S e p i s t a m i s e k s nimetatakse metalli töötlemist survega, mille tulemusena muutub nii metalli väline kuju kui ka struktuur.

On olemas kahte liiki sepistamist: vaba sepistamine ja sepistamine stantsidega.

Detailide s t a n t s i m i n e toimub harilikult terasstantside abil mehhaaniliste või hüdrauliliste presside ja vasarate jõul.

Metallileht paigutatakse näiteks vormi kahe poole vahele. Üks poolest on stants ja teine matriits (joon. 317 *a*). Hüdrauliline või mõni teine spetsiaalne press surub stantsile.

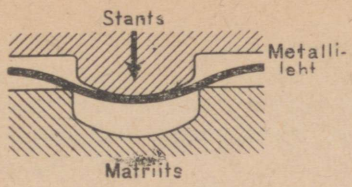
Metallileht paindub ja plastilise deformatsiooni tõttu võtab vajaliku kuju.

Stantsida saab mitmesuguseid materjale: terast, valgevaske, alumiiniumi, plastmassi, pappi jt. Stantsimisega valmistatakse toidu- ja keedunõusid, auto- ja lennukikere osi, kellamehhanismide detaile jt.

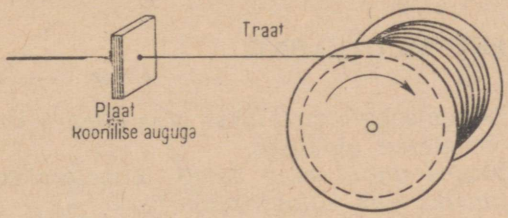
T õ m b a m i s e k s nimetatakse sellist survega töötlemist, kus töödeldav metall tõmmatakse läbi rea järjest vähenevate avauste. Avaused (silmad) on tehtud metallplaatidesse (tõmbetahvlitesse), nad on koonusekujulised ja nende seinad on kõvast terasest.

Tõmbamisega valmistatakse mitu sorti traati, väikese diameetriga torusid, mitmesuguste profiilidega ja täpsete mõõtmetega vitsmaterjale jt.

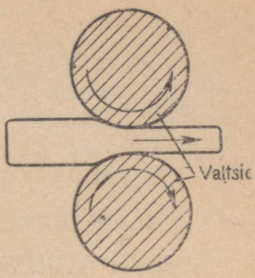
Joonisel 317 *b* on kujutatud tõmbamise skeem: traat tõmmatakse läbi plaadis oleva koonilise ava.



Joon. 317 *a*. Stantsimise skeem.



Joon. 317 *b*. Tõmbamise skeem



Joon. 317 *c*. Valtsimise skeem.

Vajaliku profiiliga metalli saamiseks kasutatakse valtsimist. Valtsimise teel saadakse teraskangidest ja samuti värvilistest metallidest ja sulamitest metallilehti, sordi- ja profiilmetalle jt.

Valtsimise tulemusena saadakse kas valmistooteid (rööpad, talad jt.) või pooltooteid edaspidiseks lõplikuks töötlemiseks sepistamise, stantsimise, tõmbamise või lõikamise teel.

Valtsimise protsess seisab selles, et kuumendatud toormetalli tükk lastakse pöörlevate valtside (võllide) vahelt läbi (joon. 317 *c*). Seejuures muutub metallitüki kuju, ristlõige ja pikkus kuni vajaliku määrani.

Kõrge temperatuurini kuumendatud metall on harilikult väga plastiline. Temperatuuri langemisega väheneb metalli plastilisus ja ta muutub raskelt deformeeritavaks. Sellepärast valtsitakse metallid ja nende sulamid kõrge temperatuuri juures. Külmalt valtsitakse ainult õhukesi esemeid, nagu metallilinte, vedrulehti jt.

Väga väärtuslikuks ehitusmaterjaliks on puit, millel on väike erikaal ja suur tugevus. Puitehituste puuduseks on nende lühiealisus ja paljudel juhtudel kohmakus.

Viimastel aastatel on leidnud mitmekesist rakendust kunstlikud plastmassid. Nende valmistamiseks kasutatakse mitmesuguseid vaikusid. Nii näiteks valmistatakse purunematut klaasi — pleksiklaasi vaigust, mille valmistamiseks kasutatakse atsetooni, metüülpiiritust ja sinihapet.

Toodete valmistamine plastmassist toimub peaasjalikult pressimise teel, kuid kasutatakse samuti ka valu.

Plastmassi tõmbetugevus on 300—600 $\frac{kG}{mm^2}$, survetugevus aga 2—3 korda suurem. Üksikasjalikumaid andmeid plastmassidest vaata õpiku lõpus toodud lisast.

XVII PEATÜKK.

AINE AGREGAATOLEKU MUUTUMINE.

182. Kehade sulamine. Sulamiseks nimetatakse aine ülemineku protsessi tahkest olekust vedelasse olekusse.

Temperatuuri, mille juures antud aine sulab, nimetatakse selle aine sulamistemperatuuriks ehk sulamispunktiks.

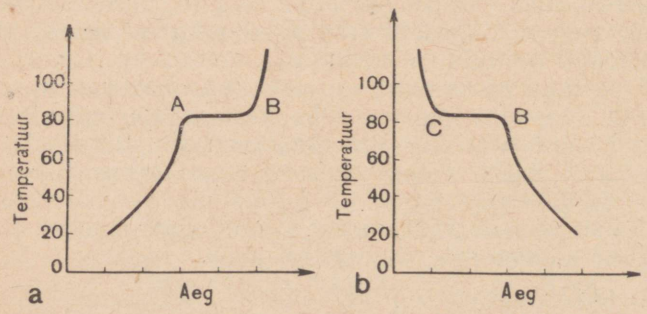
Kristallilistel ainetel, nagu näiteks raual, vasel, hõbedal, elavhõbedal ja jääl, on täiesti kindel sulamistemperatuur.

Kui soojendada mingit kristallilist keha, siis võib tähele panna, et temperatuur tõuseb ainult sulamise algmomendini. Sulamise ajal temperatuur ei tõuse. **Kristallilise keha sulamise ajal, s. o. ajal, kus ta esineb nii tahkes kui vedelas olekus, jääb segu temperatuur muutumatuks.**

Pärast seda, kui terve keha on üle läinud vedelasse olekusse, tõstab edasine soojendamine vedeliku temperatuuri. Joonisel 318 *a* on näidatud naftaliini sulamise graafik. Naftaliini sulamisprotsessile vastab kõvera osa *AB*. Naftaliini tahkestumisprotsessi graafik on kujutatud joonisel 318 *b*. Tahkestumisprotsessile vastab lõik *CB*.

Joonisel 318 on näha, et aine tahkestumine toimub samal temperatuuril, mille juures see aine sulab. Sellise järelduse võime teha mistahes kristallilise keha kohta.

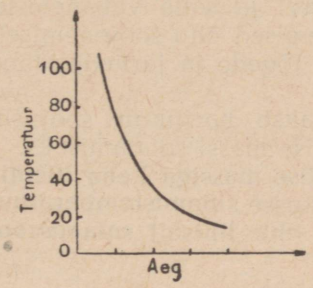
Tahked kristallilised kehad sulavad ja tahkestuvad ühel ja samal, igale ainele omasel kindlal temperatuuril.



Joon. 318. Naftaliini sulamise (*a*) ja tahkestumise (*b*) graafikud.

Teisiti on lugu amorfsete ainetega (näiteks tõrv, vaha, kampol, klaas jt.). Soojenemisel muutuvad need järk-järgult pehmemaks, nende temperatuur muutub pidevalt. Amorfsete kehade tahkestumisel aga nende temperatuur langeb samuti pidevalt (joon. 319).

Järelikult *amorfsetel kehadel ei ole kindlat sulamis- ega tahkestumistemperatuuri.*



Joon. 319. Jahtuva tõrva temperatuuri graafik.

Mõnede ainete sulamis- ja tahkestumistemperatuurid.

Aine nimetus	Sulamis- ja tahkestumis-temperatuur (C kraadides)	Aine nimetus	Sulamis- ja tahkestumis-temperatuur (C kraadides)
Süsi	3800	Magneesium	650
Volfram	3370	Tsink	419
Plaatina	1774	Plii	327
Raud (puhas)	1530	Vismut	271
Malm (valge)	1200	Inglistina	232
Malm (hall)	1130	Kaalium	63,5
Vask	1083	Vesi (jää)	0
Kuld	1063	Elavhõbe	— 38,8
Valgevask	1000	Piiritus (etüül)	—114
Hõbe	961	Hapnik	—218,6
Pronks	900	Vesinik	—257,1
Alumiinium	658	Heelium	—272,1

Kristalliliste kehade sulamist võib seletada molekulaar-kineetilise teooria põhjal. Me juba rääkisime (vt. § 147), et temperatuuri tõusmisel kasvab aineosakeste kaootilise liikumise intensiivsus. Selle tulemuseks on nende jõudude nõrgenemine, mis seovad tahke keha osakesi ja põhjustavad selle teatud kindla struktuuri. Lähenemisel sulamistemperatuurile need jõud niivõrd nõrgenevad, et tahke keha struktuur rikutakse, laguneb kristallide ruumvõre — toimub aine üleminek vedelasse olekusse.

183. Sulamissoojus. Sulamisel toimub kristallilise keha ruumvõre lammutamine, milleks kulub teatud hulk välisallika energiat. Selle tõttu suureneb sulamise protsessis keha siseenergia.

Soojushulka, mis on vajalik keha üleminekuks tahkest olekust

vedelasse olekusse sulamistemperatuuril, nimetatakse selle keha sulamissoojuseks.

Tahkestumise protsessis, ümberpöördult, väheneb keha siseenergia; osa sellest eraldub, see antakse ümbritsevatele kehadele.

Soojushulk, mis keha on tarvitanud sulamisel, on võrdne soojushulgaga, mille keha annab ära tahkestumisel. See fakt on energia jäävuse ja muundumise seaduse üheks väljenduseks.

Energia neeldumisega jää sulamisel ja selle vabanemisega vee tahkestumisel on seletatavad hilinemised õhu soojenemisel ja külmenemisel, mida võib tähele panna jõgede ja järvede läheduses.

Aine sulamissoojust iseloomustatakse harilikult soojushulgaga, mis on vajalik antud aine ühikulise massi sulatamiseks.

Soojushulka, mis on vajalik ühikulise massiga keha üleminekuks tahkest olekust vedelasse olekusse sulamistemperatuuril, nimetatakse sulamise erisoojuseks ehk lihtsalt sulamissoojuseks.

Sulamissoojus antakse $\frac{\text{cal}}{\text{g}}$-des või $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$-des, *SI*-süsteemis aga $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$-des; 1 cal = 4,1868 J või 1 kcal = 4186,8 J.

Raskestisulavate kehade sulamissoojuse määramine osutub raskeks eksperimentaalseks ülesandeks. Kergestisulavate ainete sulamissoojust võib määrata kalorimeetri abil.

Valame kalorimeetrisse m_1 grammi vett, mille temperatuur on $t_1°$; tähistame vee erisoojuse tähega c_1. Olgu kalorimeetri mass m_2 grammi ja tema erisoojus c_2. Paneme kalorimeetrisse m grammi jääd temperatuuriga 0°. Segades vett, ootame, kuni kogu jää on sulanud, ja märgime ära segu lõpptemperatuuri $\Theta°$ (kreeka täht «teeta»). Nendest andmetest võib määrata jää sulamissoojuse. Tähistame selle λ-ga.

Soojushulk, mille jää saab veeldudes 0° *C* veeks:

$Q = \lambda m$

Soojushulk, mille jääst tekkinud vesi saab soojenedes 0° *C*-st kuni $\Theta°$-ni:

$Q_1 = c_1 m\,(\Theta - 0) = mc_1\Theta$

Soojushulk, mille andis katse algul kalorimeetris olnud vesi:

$Q_2 = c_1 m_1\,(t_1 - \Theta)$

Soojushulk, mille andis kalorimeetri sisemine nõu:

$Q_3 = c_2 m_2\,(t_1 - \Theta)$

$$Q + Q_1 = Q_2 + Q_3$$

$$\lambda m + mc_1\Theta = c_1 m_1\,(t_1 - \Theta) + c_2 m_2\,(t_1 - \Theta);$$

$$\lambda = \frac{c_1 m_1\,(t_1 - \Theta) + c_2 m_2\,(t_1 - \Theta) - c_1 m\Theta}{m}.$$

Katsetest selgub, et jää sulamissoojus on 80 $\frac{\text{cal}}{\text{g}}$, *SI*-süsteemis vastavalt $80 \cdot 4186{,}8\,\frac{\text{J}}{\text{kg}} \approx 335 \cdot 10^3\,\frac{\text{J}}{\text{kg}}$.

Mõnede ainete sulamissoojused.

Aine nimetus	Sulamissoojus kcal/kg	Aine nimetus	Sulamissoojus kcal/kg
Alumiinium	92,4	Plaatina	27
Jää	80	Malm	23
Nikkel	65	Inglistina	14
Raud	66	Plii	6,3
Vask	42	Elavhõbe	2,8

184. Keha ruumala muutumine sulamisel ja tahkestumisel. Katsed ja kogemused näitavad, et sulamisel keha ruumala muutub. Ainete enamiku juures ruumala sulamisel suureneb ja tahkestumisel väheneb. Kuid on olemas aineid, mille ruumala sulamisel väheneb ja tahkestumisel suureneb. Selliseks aineks on näiteks jää, mille ruumala sulamisel väheneb ligikaudu 10% (jää tihedus 0° juures on ligikaudu 0,9 ja vee oma 1). Nagu teada, on sellel jää omadusel looduses ja tehnikas väga suur tähtsus. Selle tõttu, et jääl on veega võrreldes väiksem tihedus, ujub jää vee peal. Olles halb soojusejuht, kaitseb jää tema all olevat vett jäätumiseni jahenemisest. Sellepärast kalad ja teised veeloomad ei hukku külma tõttu, mis oleks vältimatu, kui vesi külmuks põhjani.

Veevärgi torusid tuleb kaitsta külma eest, kuna jää võtab enda alla suurema ruumala ja torud võivad lõhkeda.

Malmil on sama omadus mis jäälgi. Sula malm tahkestumisel paisub ja täidab kõik vormi osad. Sellepärast sobib malm hästi valamiseks.

Rõhu muutudes muutub ka kehade sulamistemperatuur. Nendel ainetel, millede ruumala sulamisel suureneb, tõuseb sulamistemperatuur rõhu suurenedes; ainetel, nagu vesi ja malm, millede ruumala sulamisel väheneb, langeb rõhu kasvades sulamistemperatuur.

Suurte rõhkude, tuhandete atmosfääride juures muutuvad järsult ainete paljud omadused.

Spetsiaalselt konstrueeritud presside abil saab avaldada paljudele ainetele mitmekümne tuhande ja isegi saja tuhande atmosfääri suurust rõhku. Nende hiiglasuurte rõhkude all ilmnesid mõnede ainete ebatavalised omadused. Nii näiteks tahkestub kuum vesi, kui teda suruda kokku $^3/_4$-ni sellest ruumalast, mis tal on normaalse rõhu juures. Vask voolab kõrge rõhu all nagu sula või, vesinik aga läbib vabalt terasplaadi paksusega kuni 5 cm.

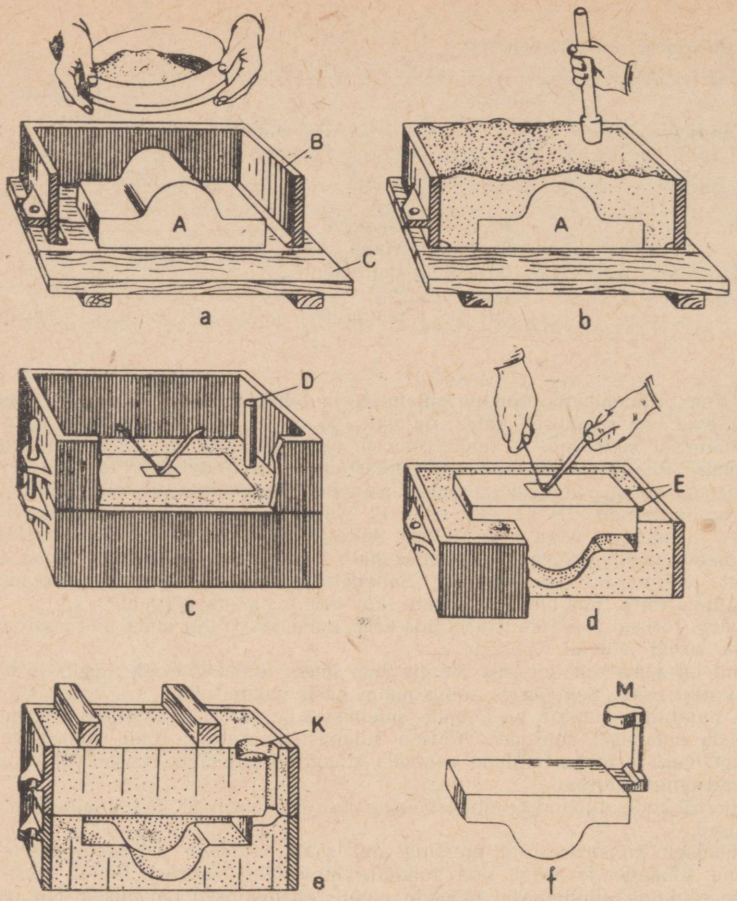
185. Metallivalu (valamine). Metalli omadusel sulada soojenemisel ja tahkestuda jahtumisel põhjeneb metallivalu.

Valukojas saadakse mitmesuguseid detaile sel teel, et täidetakse sula metalliga spetsiaalsed vormid, kus metall jahtudes tahkestub.

Valatud detaile kasutatakse laialt tööpinkides, masinates ja mehhanismides, kus nad moodustavad 50 kuni 85% seadise kaalust.

Valamise teel valmistatakse kõige mitmesugusema kujuga ja suurusega detaile. Keeruka kujuga detailide ainukeseks tootmisviisiks ongi valu.

Mingi detaili valamiseks valmistatakse esialgu selle detaili puust või metallist mudel.



Joon. 320. Detaili valamise staadiumid.

Mudeli *A* kuju vastab joonisel 320 valmisvalu kujule. Kuna kõik metallid jahtumisel vähendavad oma joonmõõtmeid, tehakse mudel kahanemise võrra suurem. Metallide ja sulamite juures on kahanemine 1—2,5%.

Detaili mudel *A* asetatakse niinimetatud mudeli aluskilbile *C* (joon. 320 *a*) ja kaetakse vormimiskastiga *B*. Vormimiskastid on põhjata kasti kujulised ja valmistatud malmist, terasest või alumiiniumi sulameist. Sõltuvalt valu kujust võivad vormimiskastid olla täisnurksed, ümmargused või fassongilised.

Vormimiskast täidetakse vormimisseguga, mis koosneb liivast, savist ja teistest ainetest. Koostisosade protsendiline suhe sõltub valu liigist. Vormimissegu peab olema plastiline, tulekindel ja gaasi läbilaskev.

Pärast seda kui mudel on asetatud kilbile ja kaetud vormimiskastiga, täidetakse vormimiskast vormimisseguga ja tambitakse tihedalt kinni (joon. 320 *b*). Üleliigne vormimissegu pärast kinnitampimist rehitsetakse joonlauaga vormimiskastist ära. Siis pööratakse vormimiskast ümber, asetatakse temale teine (ülemine) vormimiskast ja seatakse kohale osa *D* (joon. 320 *c*). Selle ülesanne on moodustada avaus, mille kaudu vorm täidetakse metalliga. Teine vormimiskast täidetakse vormimisseguga ja tambitakse samuti kinni nagu esimenegi. Siis võetakse välja keha *D*, eemaldatakse ülemine vormimiskast ja lõigatakse kanalid *E*, mis ühendavad *D* vormi õõnsusega.

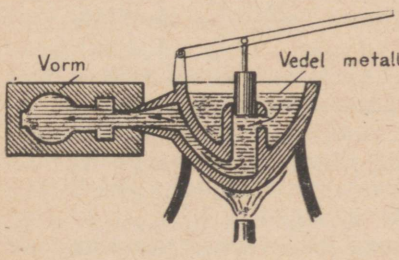
Pärast seda võetakse mudel vormist välja (joon. 320 *d*). Siis kaetakse vormi alumine pool ülemisega (joon. 320 *e*). Ülemine vormimiskast kinnitatakse alumise külge, vormile asetatakse koormus ja avause *K* kaudu valatakse vormi metall. Joonisel 320 *f* on näidatud valatis valamisnagaga *M*, mis hiljem ära raiutakse.

Vormi tugevuse tõstmiseks kuivatatakse teda enne metalliga täitmist õhu käes või spetsiaalsetes kuivatusahjudes.

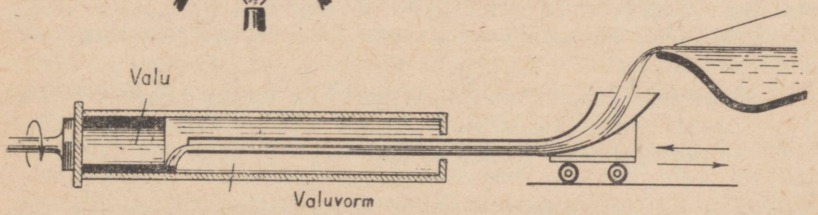
Joonisel 321 on näidatud surve all tehtavat valu. Sulametall pumbatakse spetsiaalsete masinate abil metallvormidesse (terasvormidesse) 5- kuni 60-atmosfäärilise rõhu all. Metall täidab seejuures hästi vormi kõigis tema üksikosades. Valamist rõhu all kasutatakse massilisel värviliste metallide sulamitega valamisel, kui nende sulamistemperatuurid on madalad.

Joonisel 322 on kujutatud skemaatiliselt tsentrifugaalvalu.

Tsentrifugaalvalu juures pöörleb kiiresti vedela metalliga täidetud vorm; seejuures täidab metall tihedalt kõik vormi kumerused ja nõod. Kuna pöörlemisel tekkiv jõud kihistab aine tiheduse järgi, siis metallis olevad gaasid kui kergemad tulevad välja seestpoolt. See vabastab valu kahjulikkudest mullidest.



Joon. 321. Surve all tehtav valu.



Joon. 322. Tsentrifugaalvalu.

186. Sulamid ja nende kasutamine tehnikas. Sulametalle võib üksteisega segada. Pärast tahkestumist saadakse s u l a m. Sulameid kasutatakse laialt tehnikas. Kõigile on hästi tuntud teras, mis on raua ja süsiniku sulam.

Sulamite füüsikalised omadused erinevad nende komponentide füüsikalistest omadustest. Sulam on tavaliselt kõvem ja vastupidavam kui komponendid.

Terase erisordid koosnevad rauast, süsinikust ja mõne haruldase metalli (kroom, nikkel, vanaadium, molübdeen) lisandist.

Ühed sulamid on väga vastupidavad, teised väga kõvad või erilise elastsusega. Roostevaba teras on keemiliselt väga vastupidav. Ta ei tekita keemilisi reaktsioone isegi kokkupuutumisel hapetega.

Vastupidavate sulamite hulka kuuluvad ka alumiiniumi sulamid teiste metallidega. Eriliselt vastupidav on duralumiinium, mis koosneb 94% alumiiniumist, 5% vasest, 0,5% magneesiumist ja 0,5% mangaanist. Tema sulamistemperatuur on 650° *C*. Duralumiinumi erikaal on kolm korda väiksem terase erikaalust, kuid tõmbetugevus niisama suur kui parematel terasesortidel. Selletaoliste omadustega on ka koltšugalumiinium. Neid sulameid kasutatakse seal, kus on tarvis nii kergust kui ka vastupidavust, näiteks autode ja lennukite osade juures.

Alumiiniumi ja tema sulamite kasutamine laevakerede ja laeva jõumasinate tähtsamate osade juures võimaldab märgatavalt vähendada laeva kaalu, mille tõttu saab tõsta laeva tonnaaži. Iga aastaga laieneb alumiiniumi ja tema sulamite kasutamine ka mitmesugustes teistes tööstusharudes.

Sulamite sulamistemperatuur on tavaliselt väiksem peamiste koostisosade sulamistemperatuurist.

Võib koostada õige madala sulamistemperatuuriga sulameid. Nii sulab sulam, mis koosneb kahest osast vismutist (t_{sul} = = 271° *C*), ühest osast inglistinast (t_{sul} = 232° *C*) ja ühest osast pliist, juba 95° *C* juures.

Niisugusest sulamist valmistatud teelusikas sulab keevas vees. Sellistest sulamitest valmistatakse kaitsekorgid aurukateldes. Nii näiteks korgid kuumenevad kiiresti ja sulavad katlas, kui veepind langeb alla lubatud taseme ja korgid jäävad veest välja. Korkide sulamisel pääseb aur katlast küttekoldesse, kustutab seal tule ja sellega kõrvaldub katla lõhkemise hädaoht.

Kergesti sulavaid sulameid kasutatakse samuti paljudes tulekaitseseadeldistes.

Praktikas laialdaselt kasutatav jootetina koosneb kahest osast pliist ja ühest osast inglistinast. Tema sulamistemperatuur on 180° *C*, s. o. tunduvalt väiksem kui inglistina ja plii sulamistemperatuurid.

Kergesti sulavat sulamit, mida nimetatakse b a b i i d i k s, kasutatakse laagrite valamisel. Babiidist on valatud näiteks autode

ja traktorite võllide laagrid. Kui mingil põhjusel osutub määrimine puudulikuks, siis võlli ja laagri vahelise hõõrde tõttu tekib kuumenemine ning põleb läbi babiidist laager, kuid võll jääb terveks.

Harjutus 72.

1. Kui palju on vaja soojust 10 kg jää sulatamiseks 0° *C* juures?
2. Missugust soojushulka vajatakse 150 kg jää, mille temperatuur on —8° *C*, muutmiseks 0° *C*-seks veeks?
3. Arvutada soojushulk, mis on vajalik 20 kg jää, mille temperatuur on —4° *C*, muutmiseks 100-kraadiseks veeks.
4. Purgis on 2 kg vett temperatuuriga 18° *C*. Kui palju kaloreid annab vesi jahtuvale segule, millesse on lastud purk, kui vesi purgis muutub jääks temperatuuriga 0° *C*?
5. Vasksesse kalorimeetrisse, mille kaal on 200 g, on valatud 100 g vett temperatuuriga 16° *C*. Vette lasti 9,3 g 0°-list jääd, mis täielikult ära sulas. Vee lõpptemperatuur pärast seda kujunes 9° *C*-seks. Leida nende andmete põhjal jää sulamissoojus.
6. Missugune soojushulk on vajalik 1 kg raua sulatamiseks, kui raua lähtetemperatuur on 20° *C*?

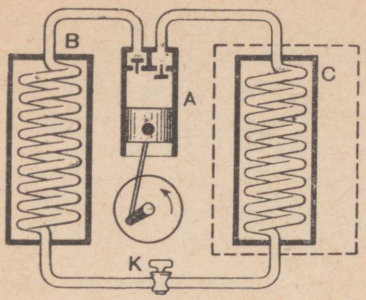
187. Aurumine. Vedeliku molekulid on alalises liikumises. Nende kineetilise energia keskmine suurus vastab vedeliku temperatuurile. Korrapäratult liikudes põrkavad molekulid üksteisega kokku, selle tagajärjel osa nendest omandab keskmisest suurema kineetilise energia. Saades energiat juurde ja olles vedeliku pinna läheduses, võivad niisugused molekulid vedelikust välja lennata. Vedelikust väljalennanud molekulide kogumit nimetatakse antud vedeliku a u r u k s, kuid protsessi ennast, mille jooksul aine läheb vedelast olekust gaasilisse, nimetatakse a u r u t e k k i m i s e k s.

Auru tekkimist vedeliku lahtiselt pinnalt mistahes temperatuuri juures nimetatakse aurumiseks.

Auruvad mitte üksi vedelikud, vaid ka tahked kehad, näiteks naftaliin ja kamper. Aurub ka jää. Tahkete kehade aurumist nimetatakse s u b l i m a t s i o o n i k s (lendumiseks).

188. Jahtumine aurumisel. Auru tekkimisel teevad vedeliku molekulid tööd, ületades pinnakihis kohesioonjõude. See töö toimub molekulide kineetilise energia arvel. Kuna vedelikust lenduvad välja suurema kiirusega molekulid, siis vedelikku jäänud molekulide keskmine kiirus väheneb. *Kui vedelik ei saa energiat väljastpoolt juurde, siis toimub aurumine vedeliku siseenergia arvel ja vedeliku temperatuur langeb.* Vedeliku jahenemist aurumisel võib kergesti tähele panna, kui mähime termomeetri kuulikese marlisse või vatisse ja niisutame seda eetriga.

Kiiresti aurustuv eeter võtab termomeetri kuulikeselt ära osa siseenergiat, mille tagajärjel selle temperatuur märgatavalt langeb. Kui valada puust alusele õhuke kiht vett ja asetada sinna klaas eetriga, siis, tekitades eetri pinnal tuult, aurub eeter kii-



Joon. 322 *a*. Kompressioon-jahutusaparaadi ehituse skeem.

resti ning temperatuur langeb nii palju, et klaas külmub aluse külge.

Jahenemist vedeliku aurumisel kasutatakse laialt tegelikus elus. Kiiresti riknevate ainete transportimisel aurustatakse vagunite jahutamiseks vedelat ammoniaaki ja süsihappegaasi. Külmetusseadistes aurustatakse vedelat ammoniaaki spetsiaalsetes spiraaltorudes, mis läbivad soolalahust ja jahutavad seda alla 0° *C*. Soolalahusesse asetatakse veega täidetud terasplekist vormid. Nendesse tekibki jää.

Tänapäeval on igapäevases elus laialdast kasutamist leidnud elektrilised jahutusaparaadid (külmutuskapid). Vaatleme kompressioon-jahutusaparaadi ehituse printsiipi (joon. 322 *a*). Jahutusseade koosneb kolmest peaosast: kompressorist *A*, kondensaatorist *B* ja aurustajast *C*.

Spiraaltorus-kondensaatoris komprimeeritakse (surutakse kokku) mingit ainet, mis kergesti läheb üle gaasilisse olekusse ja ümberpöördult. Selliste ainetena kasutatakse ammoniaaki, difluordikloormetaani (CF_2Cl_2), vääveldioksiidi jt.

Komprimeerimisel ammoniaak veeldub. Samal ajal tekitab kompressor aurustajas hõrenduse. Läbi ventiili *K* läheb sinna vedel ammoniaak ja aurustub kiiresti. Aurustumisega kaasub energia neeldumine spiraaltoru seintelt, kokkupuutuvalt õhult ja hiljem külmutuskambrisse asetatud ainetelt. Selle tagajärjel külmutuskambris temperatuur langeb ja sinna asetatud ained jahenevad. Kompressor töötab elektrimootoriga.

Soojades maades hoitakse vett tavaliselt poorsetes savianumates. Pooridest läbiimbunud vesi aurustub, mille tagajärjel anumasse jäänud vesi jääb külmaks.

189. Küllastav aur. Vedeliku oma soojusliikumise ja õhu liikumise tõttu hajuvad vedelikust väljalennanud molekulid alatasa ümbritsevasse ruumi. Selle tagajärjel toimub aurumine vedeliku vabalt pinnalt seni, kuni kogu vedelik on aurunud.

Kujutleme nüüd, et vedelik on kinnises anumas. Sellises anumas üheaegselt aurumisega tekib ka vastupidine protsess — auru muundumine vedelikuks. Lähenedes soojusliikumise tagajärjel vedeliku pinnale, tuleb osa auru molekule vedelikku tagasi. Siiski on esialgu vedelikust lahkuvate molekulide arv suurem kui vedelikku tagasitulevate molekulide arv. Sellepärast suureneb auru tihedus anumas pidevalt. Auru tiheduse suurenemisega

suureneb ka nende molekulide arv, mis tulevad vedelikku tagasi. Lõpuks saabub niisugune moment, millest alates vedelikust väljalendavate molekulide arv ajaühikus osutub võrdseks tagasitulevate molekulide arvuga. Sellest momendist peale on vedeliku peal oleva auru molekulide arv püsiv. Saabub vedeliku ja auru molekulide vahel niinimetatud dünaamiline (liikuv) tasakaal. *Auru, mis on oma vedelikuga dünaamilises tasakaalus, nimetatakse küllastavaks auruks.*

190. Küllastava auru rõhumine. Vedelikku sisaldavas kinnises anumas tekib, nagu me teame, vedeliku ja auru vahel liikuv tasakaal. Temperatuuri tõusmisel suureneb nende molekulide arv, millel on küllaldaselt energiat selleks, et vedelikust välja lennata. Vedeliku aurustumise kiirus seejuures kasvab, auru ja vedeliku vaheline tasakaal rikutakse ja auru hulk vedeliku peal suureneb. See toob endaga kaasa küllastava auru tiheduse ja rõhu suurenemise.

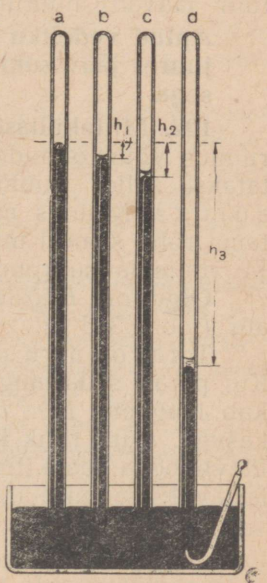
Seega **küllastava auru rõhk kasvab temperatuuri tõusmisel.** Ühesuguse temperatuuri juures sõltub küllastavate aurude rõhk vedelikust. Seda sõltuvust võib näidata järgmise katsega. Elavhõbeda anumasse asetatakse mitu elavhõbedaga täidetud baromeetritoru (joon. 323).

Toru *a* on baromeetriks. Torusse *b* viiakse pipeti abil vett, millest üks osa kiiresti aurub «Torricelli tühikus», kuna teine osa jääb vedelikuna elavhõbeda peale (selle tunnus, et elavhõbeda peal on vee küllastav aur). Torusse *c* lastakse piiritust ja torusse *d* eetrit. Kuna elavhõbeda küllastava auru rõhumine «Toricelli tühikus» on tühine, siis baromeetri elavhõbedasamba ja teiste torude sammaste kõrguste vahe näitab antud vedeliku küllastava auru rõhku.

Nagu näitab katse, on suurim rõhk eetri aurul, sellest väiksem piirituse aurul ja veel väiksem veeaurul.

Nende ainete küllastavate aurude rõhud 20° C juures avalduvad järgmistes arvudes.

Vesi	$h_1 = 17{,}5$ mm Hg
Piiritus	$h_2 = 44{,}5$ mm Hg
Eeter	$h_3 = 437$ mm Hg



Joon. 323. Vee, piirituse ja eetri küllastavate aurude rõhkude mõõtmise riist.

191. Küllastava auru rõhu ja tiheduse sõltumatus ruumalast. Valame sügavasse anumasse *A* elavhõbedat ja asetame sinna pika, elavhõbedaga täidetud toru *B*. Joonisel 324 on kujutatud selle riista ülemine osa kolmes asendis.

Laseme torru *B* niipalju eetrit, et osa sellest aurustuks ja teine osa jääks vedelikuna elavhõbeda pinnale. Vedela eetri peal olevas ruumis on küllastav aur, mille rõhk $H—h$, kus H on õhurõhk ja h on elavhõbedasamba kõrgus torus.[1] Riista temperatuur hoitakse kogu katse jooksul muutumatuna.

Tõstame nüüd toru *B* üles. Seega suurendame auru ruumala. Auru tihedus esimesel momendil väheneb. Kuid samal ajal rikutakse auru ja vedeliku vahelist liikuvat tasakaalu. Vedelikku tagasitulevate auru molekulide arv saab väiksemaks väljalendavate molekulide arvust. Vedelik aurustub niikaua, kui auru tihedus on muutunud endiseks. Elavhõbedasamba kõrgus jääb samuti endiseks. Seega ei muutu eetri aurude rõhk ruumala muutudes. Eetri hulk elavhõbeda peal aga väheneb (joon. 324 *b*).

Surume nüüd toru anumasse; sellega me vähendame auru all olevat ruumala, mistõttu algul auru tihedus suureneb ja elavhõbedasammas veidi langeb. Auru ja vedeliku vaheline liikuv tasakaal rikutakse, mille tagajärjel osa aurust muutub vedelikuks. Vedela eetri sambake elavhõbeda peal suureneb, kuid elavhõbedasamba kõrgus muutub uuesti endiseks, s. o. eetri aurude rõhk ei ole muutunud (joon. 324 *c*).

Küllastava auru rõhk ja tihedus ei muutu ei ruumala vähendamisel ega suurendamisel, kui ainult vedeliku ja auru temperatuur jäävad muutumatuks.

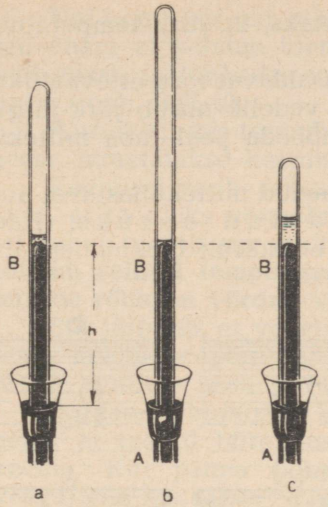
Antud vedeliku küllastava auru rõhk on antud temperatuuri juures jääv suurus; ta muutub ainult temperatuuri muutumisega.

192. Mitteküllastav aur. Kui mingi vedeliku auru sisaldavas ruumis võib toimuda selle vedeliku edasine aurumine, siis nimetatakse selles ruumis olevat auru *mitteküllastavaks auruks*. Muutes mitteküllastava auru ruumala, me näeme, et tema rõhk samuti muutub: ruumala vähendamisel rõhk suureneb ja ruumala suurendamisel rõhk väheneb.

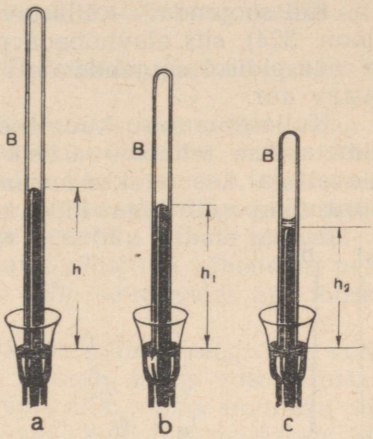
Olgu toru *B* tõstetud nii kõrgele, et temas oleks mitteküllastav aur (joon. 325 *a*).

Torus on auru rõhk võrdne $H—h$, kus H on atmosfäärirõhk. Kui pärast seda langetada toru, siis elavhõbeda nivoo temas hakkab langema: $h_1 < h$ (joon. 324 *b*), see aga näitab, et auru rõhk kasvab. Auru rõhk kasvab seni, kuni aur on saanud küllastavaks. Elavhõbeda peale ilmub seejuures vedelik (joon. 325 *c*). Auru küllastavaks saamise momendist alates jääb tema rõhk konstantseks

[1] Vedela eetri sambakese raskuse võib jätta arvestamata, kuna ta on, võrreldes elavhõbedasamba raskusega, väga väike.



Joon. 324. Toru kolmes erinevas asendis jääb elavhõbeda nivoo ühekõrgusele.



Joon. 325 *a*, *b*, *c*. Mitteküllastava auru üleminek küllastavaks auruks.

ja on võrdne vahega $H—h_2$. See on antud temperatuuri juures auru suurim rõhk.

Antud temperatuuri juures on aurul suurim rõhk siis, kui ta muutub küllastavaks.

Langetades veelgi toru, me saame lõppude lõpuks elavhõbeda peale vedeliku, mille ruumala isegi väga suurte rõhkude all väheneb üsna vähe.

Mitteküllastava auru üleminekut vedelikuks tema ruumala vähenemise teel jääval temperatuuril kujutab graafiliselt kõverjoon *ABCD* (joon. 326). Kõvera osa *AB* vastab mitteküllastavale aurule, punkt *B* küllastusolekule, joon *BC* — auru kondenseerumisele vedelikuks ja *CD* — vedelikule. Kõverjoont *ABCD* nimetatakse auru ja vedeliku isotermiks.

Mitteküllastavat auru võib viia küllastusastmeni mitte ainult ruumala vähendamise, vaid ka temperatuuri alandamise teel. Kui näiteks valada torule *B* (joon. 325 *a*) väljastpoolt eetrit, siis jahutab eetri aurumine teda, mille tagajärjel mitteküllastav aur saab küllastavaks ja osa aurust muutub vedelaks (joon. 325 *c*).

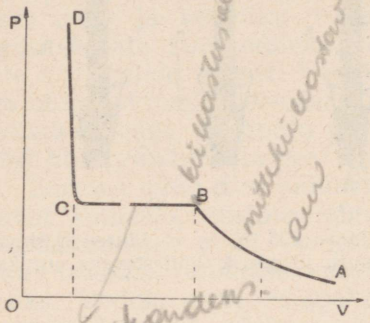
Selle auru omadusega on seletatavad sooja tuppa toodud külmade esemete «higistamine», udu ja kaste tekkimine jne. Seega saadakse mitteküllastava auru üleminek küllastavaks kahel viisil: 1) temperatuuri alandamisega, 2) rõhu suurendamisega (ruumala vähendamisega).

Ümberpöördult, küllastava auru üleminek mitteküllastavaks saadakse: 1) rõhu vähendamisega (ruumala suurendamisega),

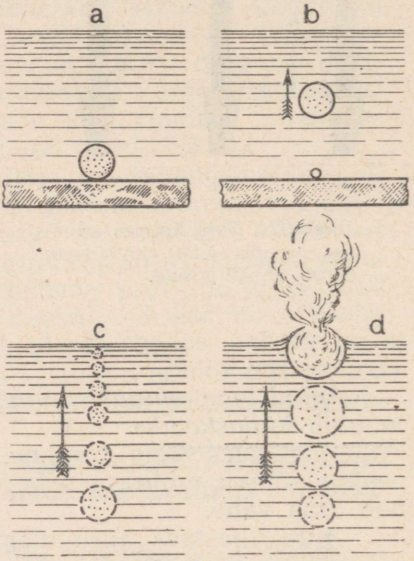
ilma et seejuures temperatuuri muudetaks, 2) auru temperatuuri tõstmisega.

Kui soojendada küllastavat auru sisaldavat toru ettevaatlikult (joon. 324), siis elavhõbeda peal olev vedelik aurub järk-järgult ja edaspidisel soojendamisel on elavhõbeda peal juba mitteküllastav aur.

Küllastava auru kuumendamisel saadud mitteküllastavat auru nimetatakse tehnikas ülekuumendatud auruks. Käesoleval ajal kasutatakse aurumasinates eranditult ülekuumendatud auru temperatuuriga 150° kuni 550° C.



Joon. 326. Graafik mitteküllastava auru üleminekust vedelikuks.



Joon. 327. *a* — õhumullikese kasvamine temasse aurunud vedeliku tagajärjel; *b* — mullikese lahtikiskumine ja järgneva idu; *c* — mullikese tõusmine; *d* — vedeliku keemine.

193. Keemine. Soojendame vett kolvis ja jälgime seejuures vee temperatuuri ja seda, mis seal toimub.

Kõige enne märkame väikeste gaasimullikeste ilmumist anuma seintele. Nende mullikeste ilmumine on seletatav absorbeerunud (neeldunud) õhu eraldumisega. Kuna igasse mullikesse toimub ka vee aurumine, siis sisaldavad mullikesed peale õhu veel vee küllastavat auru.

Vedeliku edasisel soojendamisel suurenevad ja paljunevad mullikesed. Joonisel 327 on kujutatud ühe mulli kasvamise üksteisele järgnevad staadiumid. Saavutanud teatud suuruse (joon. 327 *a*), kisub mullike end lahti (joon. 327 *b*) nõu seinast.

Tõusvad mullikesed, sattudes ülemistesse külmematesse kihtidesse, vähenevad mõõtmete poolest, kuna nendes olevad aurud kondenseeruvad ja järele jääb vaid väike hulk õhku, mis tõusebki pinnale (joon. 327 *c*).

Kui kogu vesi on juba küllaldaselt kuumenenud, siis mullikesed enam ei kahane ülemistes kihtides, vaid tõustes nad paisuvad edasi, ja lõhkedes vedeliku pinnal, vabastavad mullis oleva auru (joon. 327 *d*).

Aurumist, mis toimub üheaegselt vedeliku pinnalt ja vedeliku seest, nimetatakse keemiseks.

Keemisel peab arusaadavalt küllastava auru rõhk olema nii suur, et ta oleks võimeline ületama atmosfäärilist rõhku. Ainult sel juhul tungib aur mullikesest välja. See tähendab, **et keemine toimub sellisel temperatuuril, mille juures vedeliku küllastavate aurude rõhk on võrdne välisrõhuga vedeliku vabale pinnale.**

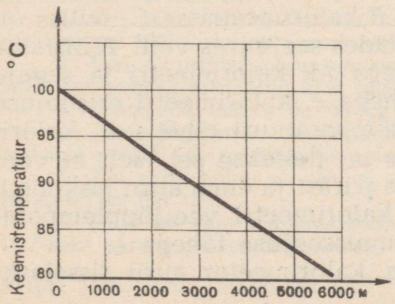
Siit järgneb, et vedelikule mõjuva välisrõhu vähenedes peaks tema keemistemperatuur alanema, rõhu suurenedes aga tõusma. Katse kinnitab seda järeldust.

Asetame õhupumba kupli alla klaasi külma veega. Me võime näha, et teatud hõrenduse juures hakkab külm vesi tormakalt keema. Kui panna õhupumba kupli alla väike anumake tilga veega, siis hakkab vesi esialgu keema, kuid hiljem jäätub. Mispärast? Aurumisele ja keemisele kulub vee siseenergiat; selle tagajärjel veetilga temperatuur langeb 0° *C*-ni ja vesi jäätub.

Nagu teada, väheneb õhurõhk kõrguse suurenemisega merepinna suhtes. Järelikult peaks kõrgemale tõustes vedeliku keemistemperatuur langema. Seda kinnitavad ka katsed ja kogemused. Joonisel 328 on graafiliselt näidatud vee keemistemperatuuri muutumine sõltuvalt kõrgusest merepinnalt.

Keemistemperatuur sõltub vedelikust. Nii keeb elavhõbe näiteks atmosfäärilise rõhu korral 357° *C* juures, petrooleum 170—260° *C* (sõltuvalt sordist) juures, piiritus 78° *C* juures, eeter 35° *C* juures, vedel ammoniaak — 33,4° *C* juures.

Antud vedeliku keemistemperatuur ei sõltu üksnes välisrõhust, vaid ka vedelikus sisalduvatest lisanditest. Üldreeglina kehtib see, et lahustunud tahke aine olemasolu vedelikus tõstab keemistemperatuuri. Nii näiteks keeb vesi, mis sisaldab 12% keedusoola, 102° *C* juures. Kui aga tõsta lahuse kontsentratsiooni 40%-ni, siis keemistemperatuur tõuseb 108° *C*.



Joon. 328. Graafik vee keemistemperatuuri langemise kohta kõrguse suurenemisel merepinnast.

194. Aurumissoojus. Soojushulka, mis on vaja anda vedelikule selleks, et teatud temperatuuri juures muuta ühikulise massiga vedelikuhulka auruks, nimetatakse aurumissoojuseks.

Aurumissoojus antakse $\frac{\text{cal}}{\text{g}}$-des ja $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$-des, *SI*-süsteemis $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$-des. Selles süsteemis on vee aurumissoojus

$$L = 539 \cdot 4186{,}8 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \approx 2258 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}}.$$

Järgmises tabelis antakse mõnede vedelikkude aurumissoojused keemistemperatuuri ja normaalrõhu juures:

Aine	Aurumissoojus $\frac{\text{cal}}{\text{g}}$	Aine	Aurumissoojus $\frac{\text{cal}}{\text{g}}$
Vesi	539	Väävelsüsinik	84
Ammoniaak	327	Eeter	84
Piiritus	204	Tärpentin	70
Bensiin	95	Elavhõbe	69

Ühe ja sama vedeliku aurumissoojus on erinevatel temperatuuridel erinev.

Seda on näha järgmisest vee kohta käivast tabelist:

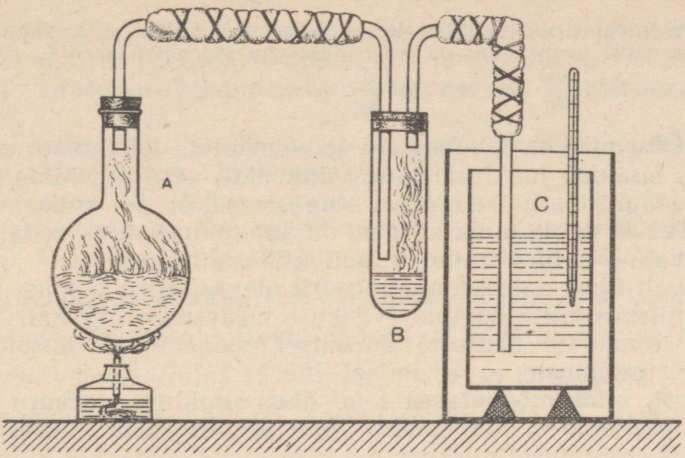
Temperatuur	0°	50°	100°	150°	200°	250°	300°	350°	374°
Aurumissoojus $\frac{\text{cal}}{\text{g}}$	595	568	539	506	468	408	330	210	0

Tabelist on näha, et aurumissoojus väheneb temperatuuri kasvamisega.

Aurumissoojus vabaneb uuesti, kui aur kondenseerub vedelikuks. Sellele on rajatud aurumissoojuse katseline määramine. Seadis selle katse jaoks on kujutatud joonisel 329.

Kolvist *A* läheb aur läbi kolvi *B* kalorimeetrisse *C*, milles on vesi. Seal ta kondenseerub, soojendades seejuures vett. Tähistame vee massi enne auru laskmist tähega M, kalorimeetri ja segaja massi tähega m_1, vee erisoojuse tähega c, kalorimeetri erisoojuse tähega c_1, kalorimeetri ja vee algtemperatuuri tähega t_1, kalorimeetrisse lastud auru massi tähega m_2 (leitakse sel teel, et võetakse kalorimeetri vee kaalude vahe pärast ja enne auru laskmist), vee keemistemperatuuri tähega t_2, kalorimeetri vee lõpptemperatuuri tähega Θ ja otsitava vee aurumissoojuse tähega L.

Soojushulk, mille saab vesi ja kalorimeeter auru sisselaskmisel:



Joon. 329. Vee aurumissoojuse määramise seadis.

$$Q = cM(\Theta - t_1) + c_1 m_1(\Theta - t_1). \quad (1)$$

Aur annab kondenseerumisel vedelikuks soojushulga m_2L. Selle vedeliku edaspidisel jahenemisel kondenseerumistemperatuurist kuni lõpptemperatuurini eraldub soojushulk: $cm_2(t_2 - \Theta)$.

Kokku eraldub soojust:

$$Q = Lm_2 + cm_2(t_2 - \Theta). \quad (2)$$

Võrrutades võrduste (1) ja (2) paremad pooled, saame soojusliku tasakaalu võrrandi

$$cM(\Theta - t_1) + c_1 m_1(\Theta - t_1) = Lm_2 + cm_2(t_2 - \Theta).$$

Siit saame valemi L arvutamiseks:

$$L = \frac{1}{m^2}[cM(\Theta - t_1) + c_1 m_1(\Theta - t_1) - cm_2(t_2 - \Theta)].$$

Harjutus 73.

1. Kui palju on vaja soojust, et muuta 1 kg 0° C-list vett auruks, mille temperatuur on 100° C?
2. Kui palju soojust eraldub, kui kondenseerub 100 g veeauru, mille temperatuur on 100° C, ja kui aurust tekkinud vett jahutatakse 20° C-ni?
3. Vee aurustumissoojus on suurem eetri aurustumissoojusest. Miks jahutab eeter temaga niisutatud käsi tugevamini kui vesi samadel tingimustel?
4. Anumasse, milles on 30 kg 0° C-list vett, juhitakse 1,85 kg 100° C-list veeauru. Selle tagajärjel tõuseb anumas vee temperatuur 37° C-ni. Leida nende andmete põhjal vee aurustumissoojus.
5. Kui palju kulub soojust, et muuta 1 kg 0° C-list jääd auruks, mille temperatuur on 100° C?
6. Palju on vaja kulutada soojust selleks, et muuta 5 kg —10° C-list jääd 100°-seks auruks ja soojendada see 150° C-ni normaalrõhu juures? Veeauru erisoojus jääva rõhu juures on $0{,}49\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}}$ või $2051{,}5\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{deg}}$.

7. Mitu kilogrammi kivisütt on tarvis ära põletada selleks, et muuta auruks 100 kg jääd, mille temperatuur on 0° C? Kasutegur põlemisel on 70%. Kivisöe küttevääртus on $7000 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$ või $29{,}3 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$.

195. Õhu niiskus. Veekogude ja taimkatete lakkamatu aurumise tõttu sisaldab meid ümbritsev õhk alati veeauru. Mida rohkem on veeauru teatud ruumalas, seda ligemal on aur küllastamisolekule. Teiselt poolt, mida kõrgem on õhu temperatuur, seda rohkem on vaja veeauru antud ruumi küllastamiseks.

Sõltuvalt õhus antud temperatuuril olevast auru hulgast võib olla õhu niiskus mitmesugune. Niiskuse määramisel on suur tähtsus õhus toimuvate nähtuste uurimisel, mõnedel tootmisaladel, tervishoiu tingimuste arvestamisel jne.

Suurust, mida mõõdetakse 1 m³ õhus sisalduva veeauru hulgaga grammides, nimetatakse õhu absoluutseks niiskuseks.[1]

Teades absoluutset niiskust, me ei saa veel öelda, kui kuiv või niiske on õhk. On vajalik seejuures arvestada veel õhu temperatuuri. Kui temperatuur on madal, siis võib antud veeauru hulk õhus olla lähedal küllastamisele, s. t. õhk on niiske. Kõrgema temperatuuri juures on sama veeauru hulk kaugel küllastamisest, s. t. õhk on kuiv.

Õhu niiskuse astme üle otsustatakse selle järgi, kui ligidal või kaugel on õhus olev veeaur küllastamisolekust. Sellepärast võetakse tarvitusele õhu relatiivse (suhtelise) niiskuse mõiste.

Õhu relatiivseks niiskuseks nimetatakse absoluutse niiskuse suhet selle veeauru hulgaga, mis antud temperatuuril seda ruumalaühikut küllastaks. Veeauru molekulid käituvad samuti nagu gaasi molekulidki, sellepärast on auru kohta kehtiv sama tiheduse ja rõhu vaheline sõltuvus, mis oli kindlaks tehtud § 163. Selle põhjal võime relatiivset niiskust defineerida kui õhus oleva veeauru rõhu suhet selle veeauru rõhuga, mis samal temperatuuril õhku küllastaks.

Kui D_0 on õhu küllastamiseks vajalik auru hulk ja D — tegelik õhus olev auru hulk, siis antud temperatuuril relatiivne niiskus $f = \frac{D}{D_0}$.

Järelikult selleks, et määrata õhu relatiivset niiskust, on vaja absoluutne niiskus jagada selle auru hulgaga, mis antud temperatuuril 1 m³ õhku küllastaks.

Kuna suurus D_0 on alati suurem kui D, siis relatiivne niiskus on alati lihtmurd. Relatiivne niiskus antakse sagedasti protsentides:

$$f = \frac{D}{D_0} \cdot 100\%.$$

Eluruumide normaalseks niiskuseks loetakse 60—70%.

[1] Meteoroloogias nimetatakse tavaliselt absoluutseks niiskuseks õhus sisalduva veeauru rõhku, mis on mõõdetud elavhõbedasamba millimeetrites.

196. Õhu niiskuse määramise viisid. Kui jahutada niisket õhku, siis saab teatud temperatuuri juures veeaur õhku küllastavaks. Edaspidisel jahutamisel hakkab aur kastena kondenseeruma.

Temperatuuri, mille juures õhus olev veeaur muutub küllastavaks, nimetatakse kastepunktiks.

Teades õhu temperatuuri ja määranud kastepunkti, võime kergesti arvutada õhu relatiivse niiskuse. Kui näiteks kastepunkt on 8° *C* ja õhu temperatuur on 15° *C*, siis lk. 374 toodud tabeli järgi leiame küllastava veeauru hulga 8° *C* juures; saame 8,3 $\frac{g}{m^3}$, mis ongi õhu absoluutseks niiskuseks. Määrates sama tabeli abil küllastava auru hulga 15° *C* juures (see on 12,8 $\frac{g}{m^3}$ ja jagades sellega absoluutset niiskust, saame õhu relatiivse niiskuse. Antud juhul:

$$f = \frac{8{,}3}{12{,}8} \cdot 100\% \approx 64\%.$$

197. Juushügromeeter. Riistu, mille abil määratakse õhu niiskust, nimetatakse hügromeetriteks. Nende ehitus võib olla mitmesugune.

Joonisel 330 on kujutatud juushügromeetri ehituse skeem. Rasvavabaks tehtud inimese juus muudab oma pikkust niiskuse muutudes: pikeneb niiskuse suurenedes ja lüheneb niiskuse vähenedes.

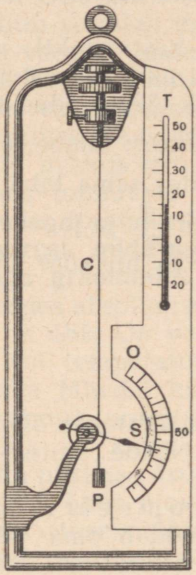
Kui selline juus keerata ümber kerge ploki, üks ots kinnitada metallraami külge ja teise otsa riputada väike raskus *P*, siis hakkab juukse pikkuse muutudes ploki külge kinnitatud osuti *S* liikuma.

Gradueerinud skaala, võime selle riistaga vahetult mõõta relatiivset niiskust. Juushügromeetrit kasutatakse neil juhtudel, kui niiskuse määramisel pole vaja suurt täpsust.

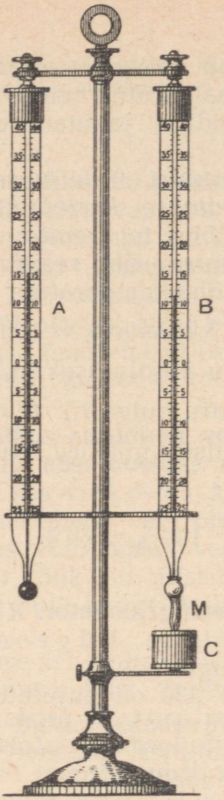
198. Augusti psühhromeeter[1]. See riist koosneb kahest ühesugusest termomeetrist *A* ja *B* (joon. 331). Termomeetri *B* kuulike mähitakse marlisse *M*, mille üks ots ulatub anumas *C* olevasse vette. Vesi tõuseb anumast marlit mööda üles, mille tõttu teise termomeetri kuulike koos marliga on alati niiske. Teine termomeeter, mille kuulike on kuiv, näitab õhu temperatuuri.

Kui õhk on veeaurust küllastatud, siis näitavad mõlemad termomeetrid ühte ja sama temperatuuri. Siis on mõlemad termomeetrid ühesugustes tingimustes. Kui aga õhk ei ole auruga küllastatud, siis aurustub niiske termomeetri juures olev vesi ja temperatuur selle tõttu langeb. Temperatuuri langemine kestab

[1] Psühhromeeter — kreeka sõnadest *psühhros* — külm, *metreo* — mõõdan.



Joon. 330. Juushügrometeer.



Joon. 331. Augusti psühhrometeer.

niikaua, kui aurustumisest tingitud siseenergia vähenemine pole tasakaalustunud ümbrusest tuleva energia juurdevooluga.

Seega tekib tavalistes tingimustes kuiva ja märja termomeetri näitude psühhromeetriline vahe. Mida suurem on psühhromeetriline vahe, seda kuivem peab olema õhk ja, ümberpöördult, mida väiksem on vahe, seda suurem on õhu relatiivne niiskus.

Teooria alusel, mida me siin ei käsitle, koostatakse spetsiaalsed psühhromeetrilised tabelid. Nende tabelite abil võib kuiva ja märja termomeetri näitude järgi kiiresti määrata õhu relatiivset niiskust.

Augusti psühhromeetrit kasutatakse tavaliselt seal, kus õhu niiskust on tarvis määrata eriti suure täpsusega.

Troposfääris toimuvate muutuste uurimisel ja ilmade ennustamisel meteoroloogias on õhu niiskuse määramisel eriliselt tähtis osa.

Harjutus 74.

1. Õhu absoluutne niiskus on 10 $\frac{g}{m^3}$. Leida relatiivne niiskus, kui temperatuur on: 12°, 18° ja 24° C. Kasutada raamatu lõpus antud tabelit.

2. Toa temperatuur on 16° C ja relatiivne niiskus $f = 60\%$. Missuguse temperatuurini tuleb jahutada läikivat metalleset, et tema pinnale ilmuks kaste?

3. Kuiv termomeeter näitab 20° C ja märg 15,5° C. Leida õhu relatiivne niiskus, kasutades raamatu lõpus antud tabelit.

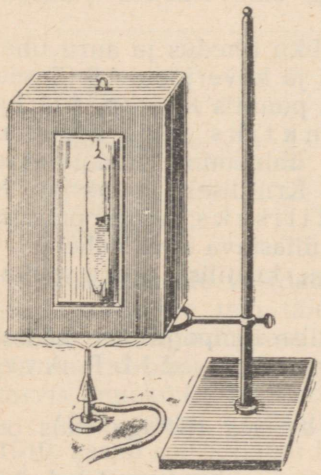
4. 10° C-lise temperatuuri juures on õhu relatiivne niiskus 80%. Kuidas muutub relatiivne niiskus, kui tõsta temperatuuri 20° C-ni?

5. Anumas on õhk temperatuuriga $t = 15°$ C; õhu relatiivne niiskus $f = 63\%$. Kui õhk kuivatati ära kloorkaltsiumiga, siis anuma kaal vähenes 3,243 g võrra. Leida anuma ruumala.

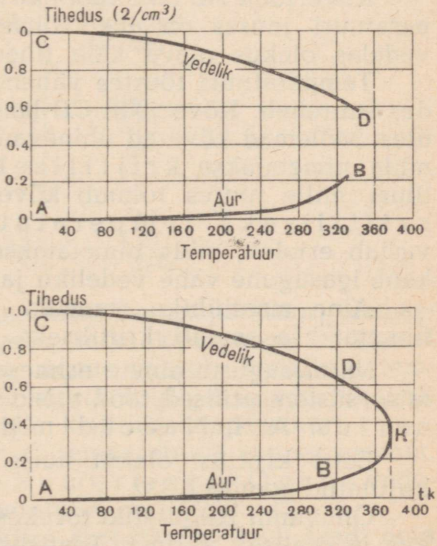
199. Kriitiline temperatuur. Juba ammu tekkis mõte, et suurendades rõhku ja samal ajal alandades temperatuuri, võib viia tavalised gaasid nagu küllastavad aurudki küllastava auru olekuni ja siis muuta nad vedelaks.

Sel teel muutis inglise teadlane Faraday rea gaase, nagu ammoniaak, süsihappegaas, kloor jt., vedelaks. Kuid rida teisi gaase, nagu hapnik, lämmastik, vesinik, süsinikhapend, lämmastikhapend ja metaan, ei muutunud vedelaks isegi siis, kui rõhk oli 3000 atmosfääri ja temperatuur —110° C. Oli tarvis selgitada selle nähtuse põhjust.

Gaaside veeldamise probleemiga tegeles ka suur vene teadlane D. I. Mendelejev. Sel ajal, kui tema eelkäijad oma aru-



Joon. 332. Kriitilise temperatuuri uurimise riist.



Joon. 333. Vee ja selle soojendamisel tiheduse muutumise graafik.

teludes gaaside veeldamise üle lähtusid selle protsessi sarnasusest mitteküllastava auru vedelikuks muutmise protsessiga, juhtis Mendelejev tähelepanu vastupidise protsessi — vedeliku aurustumise — tingimustele.

Uurides neid tingimusi, tuli Mendelejev järeldusele, et igal ainel on olemas temperatuur, mille juures kaob vahe selle aine vedela ja gaasilise oleku vahel. Seda temperatuuri nimetas Mendelejev absoluutse keemise temperatuuriks. Hiljem hakati seda nimetama kriitiliseks temperatuuriks.

Mis temperatuur see on? Et vastata sellele küsimusele, teeme järgmise katse.

Paigutame õhuvanni kinnijoodetud torukese, mille ruumala ühe osa võtab enda alla vedelik ja teise osa küllastav aur (joon. 332), ja hakkame teda soojendama. Soojendamisel hakkavad muutuma vedeliku ja auru tihedused. Ehitame vedeliku ja auru tiheduste muutumise graafiku. Selleks kanname abstsisstelje temperatuuri ja ordinaatteljele vedeliku ja auru tihedused (joon. 333 *a*).

Kuna vedelik soojenedes paisub, siis kõverjoon *CD*, mis näitab vedeliku tiheduse muutumist temperatuuri muutudes, langeb, mis osutab tiheduse vähenemisele temperatuuri kasvades.

Kuna temperatuuri tõustes vedelik aurustub, siis auru tihedus kasvab. Auru tiheduse kasvamine on graafikul kujutatud kõverjoonega *AB*.

Kõverjoon *AB* on allpool kõverjoont *CD*, kuna iga antud temperatuuri juures on aurutaolises olekus aine tihedus väiksem vedelas olekus oleva aine tihedusest.

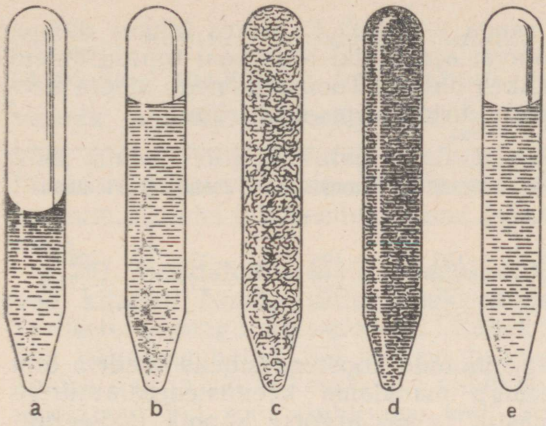
Temperatuuri tõustes väheneb vedeliku tihedus ja auru tihedus suureneb. Kõverjoon *CD* langeb alla ja kõverjoon *AB* tõuseb üles. Mõlemad kõverad ühinevad mingis punktis *K* (joon. 333 *b*), mida nimetatakse kriitiliseks punktiks, kuna temperatuuri, mille juures toimub kõverjoonte ühinemine, nimetatakse kriitiliseks temperatuuriks. Kriitilisele punktile *K* vastab eriolek, mida nimetatakse kriitiliseks; selles punktis kaob igasugune vahe vedeliku ja tema küllastava auru vahel.

Aine massiühiku ruumala ja rõhku kriitilise oleku puhul nimetatakse samuti kriitiliseks.

Mitmesuguste ainete esimesed kriitilise temperatuuri määramise süstemaatilised tööd viisid läbi vene teadlased M. P. Avenarius, A. I. Nadeždin jt.

Eetri kriitilist olekut uuris Avenarius riistaga, mis on kujutatud joonisel 332.

Õhuvanni paigutatud torukeses oli eeter osaliselt vedelas olekus ja osaliselt auruna. Toatemperatuuril on need mõlemad olekud teravalt eraldatud vedeliku nõgusa meniskiga (eeter märgab klaasi) (joon. 334 *a*). Torukese soojendamisel hakkab nõgus eral-



Joon. 334. Katse eetri kriitilise olekuga.

dusjoon järk-järgult sirgenema (joon. 334 *b*) ja kaob järsku eetri kriitilise temperatuuri juures, mis on 194° *C*. Selle ja kõrgema temperatuuri juures on eeter homogeenses olekus (joon. 334 *c*). Jahutades pärast seda järk-järgult torukest, võime vaadelda eetri kriitilist olekut (joon. 334 *d*) (torukese sisu tumeneb) ja selle järel ka piiri tekkimist, mis eraldab vedeliku aurust (joon. 334 *e*).

Järgmises tabelis antakse mõnede ainete kriitilised temperatuurid ja kriitilised rõhud.

Aine	Kriitiline temperatuur °C	Kriitiline rõhk atmosfäärides
Vesi	374	218
Piiritus	243	63
Eeter	194	35
Süsihappegaas . .	31	73
Hapnik	—119	50
Lämmastik	—147	33,5
Vesinik	—240	12,8
Heelium	—268	2,25

200. Gaaside veeldamine. Aine kriitilise temperatuuri olemasolu avastamine tegi täiesti selgeks, miks kaua aega ei läinud korda mõningaid gaase veeldada; nende gaaside kriitilised temperatuurid olid väga madalad. Et muuta neid gaase vedelaks, oli tarvis ennekõike jahutada neid alla kriitilist temperatuuri.

1883. aastal veeldati —244° *C* temperatuuri juures vesinik. 1910. aastal sai hollandi teadlane Kamerlingh-Onnes vedelat heeliumi, mille keemistemperatuur on —269° *C*.

Jahutades veeldatud gaase kiire aurustamise teel, saadi neid tahkes olekus. 1913. aastal sai Kamerlingh-Onnes tahke vesiniku, tema sulamistemperatuuriks osutus —257,1° *C*.

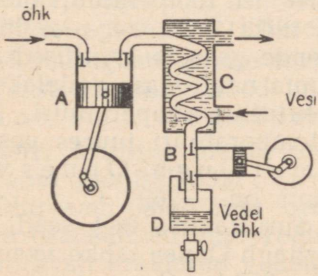
Järgnevalt õnnestus saada —271,9° C juures tahkes olekus heeliumi. Seega on käesoleval ajal kõiki Maa peal tuntud aineid saadud nii vedelas kui tahkes olekus. Toome mõnede ainete keemis- ja tahkestumistemperatuurid normaalsel rõhul.

Aine	Kloor	Hapnik	Lämmastik	Vesinik	Heelium
Keemistemperatuur	—33,8	—183	—195	—253	—269
Tahkestumistemperatuur	—102	—219	—210	—257	—271,9

Vedelat õhku on kerge jaotada koostegaasideks. Vedela õhu aurustamisel auruvad esialgu madalama keemistemperatuuriga koostisosad: neoon, lämmastik ja siis argoon, hapnik jt. Seejuures saadud gaase kasutatakse laialt tehnikas. Hapnikku kasutatakse näiteks koos atsetüleeniga (või vesinikuga) keevitamisel ja metallide lõikamisel. Hapnikku kasutatakse samuti ka kõrgahjude juures. Argoon ja neoon lähevad elektrilampide täiteks; lämmastik — ammoniaagi saamiseks jne. Sellepärast ongi nii tähtis saada tööstuslikult vedelat õhku. Tööstuslike vedela õhu masinate ehitus põhineb õhu jahenemisel paisumisel. Vedela õhu masina ehituse skeem on kujutatud joonisel 335. Õhk imetakse väljast kompressorisse *A* ja surutakse kolviga mitmekümne atmosfäärini kokku. Spiraaltorus *C* kompressoriga kokkusurutud õhk jahutatakse vee abil; järgnevalt ta satub detandrisse (laiendisse) *B*, kus paisudes ja seejuures tööd tehes gaas jaheneb alla kriitilise temperatuuri. Detandri kolvi tagasikäigul kondenseerub gaas vedelikuks ja koguneb anumasse *D*.

Nõukogude teadlane P. L. Kapitsa asendas edasi-tagasi liikuva kolviga silindri suruõhuga pöörleva turbiiniga (turbodetandriga). See seadis osutus palju kordi tootlikumaks ja ökonoomsemaks kui teist süsteemi masinad.

Kasutades masinas jahutajana keeva õhku, saadakse vedelat vesinikku. See osutub kõige kergemaks vedelikuks, tihedusega



Joon. 335. Vedela õhu valmistamise masina ehituse skeem.

$0{,}07\frac{g}{cm^3}$. Aurustades vedelat vesinikku madala rõhu all, võime saada veel madalamat temperatuuri. —257° C juures muutub vesinik tahkeks tihedusega $0{,}08\frac{g}{cm^3}$. Selle temperatuuri juures on kõik ained, välja arvatud heelium, vedelas või tahkes olekus. Pärast rohkearvulisi katseid õnnestus lõpuks muuta vedelaks ka heelium. Selleks tuli heeliumi enne jahutada keeva vedela vesinikuga.

201. Veeldatud gaaside omadused. Veeldatud gaasid aurustuvad kiiresti. Nende säilitamiseks konstrueeris Dewar kahekordsete seintega klaaspudelid. Kahekordsete seinte vahelt on õhk välja pumbatud. Sel teel on peaaegu täielikult kõrvaldatud anuma sisu ja välise keskkonna vaheline soojuse vahetus nii konvektsiooni kui soojusjuhtivuse teel. Soojuskiirguse vähendamiseks hõbetatakse seinte vastamisi asetsevad küljed. Dewari anuma ühte tüüpi võime näha termoses, mida kasutatakse sooja toidu hoidmiseks.

Gaaside veeldumistemperatuuri juures tahkestub suur osa aineid. Nii näiteks valades vedela õhuga üle spetsiaalses vormis oleva elavhõbeda, võime saada läikiva elavhõbedast vasarakese, millega võib laua sisse lüüa naelakesi. Pistes katseklaasi piirituse vedelasse õhku, võime saada tahkestunud piirituse. Piirituse külmumistemperatuur on —114° C.

Paljude ainete füüsikalised omadused gaaside veeldumistemperatuuri juures muutuvad märgatavalt. Nii näiteks elavhõbe ja tsink muutuvad taotavaks, pehme plii muutub elastseks nagu teras, pliist valmistatud kell heliseb. Mõned kehad, mis tavalise temperatuuri juures on elastsed, muutuvad jahutatuna vedelas gaasis rabedaks nagu klaas. Nii näiteks saab murda kummit pärast jahutamist vedelas õhus; kummipall puruneb kukkudes kildudeks.

Selle tõttu, et vedelas õhus on palju hapnikku, soodustab ta tugevasti põlemist. Vedela õhuga niisutatud vatitükk plahvatab nagu püssirohi. Vedela õhuga immutatud söepulber kujutab endast ainet, mis oma lõhkejõu poolest ei jää maha dünamiidist.

XVIII PEATÜKK.

SOOJUSJÕUMASINAD.

202. Gaasi paisumise töö. Vaatame, kuidas arvutada lihtsamatel juhtudel tööd, mida teeb gaas paisumisel.

Kujutleme, et silindris kolvi all on mingi gaas. Olgu kolvi pindala S ja gaasi rõhk p (joon. 336 *a*). Jõud, millega gaas rõhub kolbi, määratakse valemi $F = pS$ abil. Kui soojendada jääva rõhu juures gaasi, siis ta paisub ja kolb nihkub kaugusele h.

Gaas teeb seejuures tööd $A = pSh$. Kuid $Sh = V_2 - V_1$ on gaasi ruumala juurdekasv, järelikult $A = p(V_2 - V_1)$, s. o. *gaasi töö isobaarilisel paisumisel on võrdne gaasi rõhu ja ruumala juurdekasvu korrutisega.*

Graafiliselt kujutab gaasi tööd ristküliku *ABCD* pindala, kus aluseks on $V_2 - V_1$ ja kõrguseks p (joon. 336 *b*).

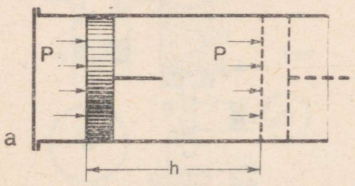
203. Soojusjõumasin. Soojusjõumasina töötamise vajalikud tingimused. *Soojusjõumasinaks nimetatakse masinat, mis teeb mehhaanilist tööd kütuse põlemisel saadud energia arvel.*

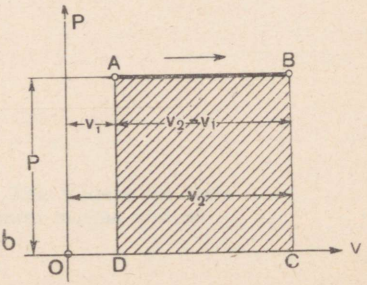
Ainet, mis soojusjõumasinas tööd teeb, nimetatakse t ö ö t a v a k s k e h a k s või t ö ö t a v a k s a i n e k s.

Aurumasinas on töötavaks aineks aur, kuid sisepõlemismootoris — gaas.

On olemas kahte liiki soojusjõumasinaid: sisepõlemismootorid ja aurumasinad. Kuidas nad on ehitatud, seda vaatleme edaspidi, kuid praegu vaatleme üldisi tingimusi, mis on vajalikud selleks, et põleva kütuse energiat muundada masinate ja mehhanismide tööks. Neid tingimusi me selgitame aurujõumasina näitel.

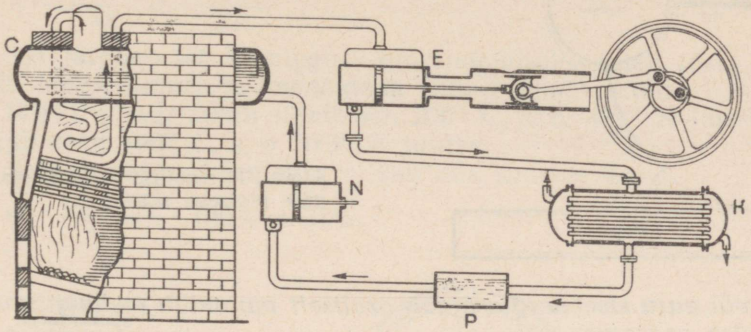
Aurujõumasina ehituse skeem on kujutatud joonisel 337. Aurujõumasina üheks osaks on katel *C* koos küttekoldega (katelde





Joon. 336. Töö gaasi isobaarilise paisumise juures.

ehitust vaata § 206). Katlas tekib aur, mis toru kaudu juhitakse aurumasina silindrisse *E*. Siin aur paisub ja, pannes kolvi liikuma, teeb tööd. Kolviga on ühendatud kangide süsteem, mille abil kolvi kulgev liikumine muundatakse hooratta pöörlemiseks, mis paneb liikuma tööpinkide, põllutöömasinate, elektrivoolugeneraatorite jt. töötavad osad.



Joon. 337. Aurumasina skeem.

Töötanud aur tõugatakse erilisse seadeldisse *K*, mida nimetatakse kondensaatoriks, kus ta, läbides voolava vee poolt jahutatavad torud, annab ära osa oma siseenergiast ja muundub veeks. See vesi juhitakse esialgu toitepaaki *P*, kus ta puhastatakse ja sealt pumba *N* abil juhitakse uuesti katlasse.

Seega on aurujõumasina peamisteks osadeks soojendi (katel küttekoldega), silinder töötava ainega (auruga) ja jahuti.

Praktika on näidanud, et mistahes soojusjõumasin saab töötada ainult kõigi nende osade olemasolu korral.

Soojusjõumasinate töötamise iseärasus seisab selles, et osa soojendilt saadud energiast annab töötav aine tingimata jahutile.

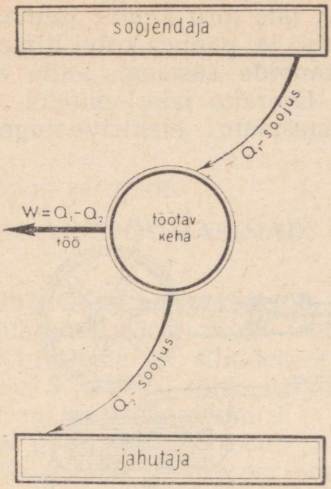
Saagu töötav keha soojendilt soojushulga Q_1 kalorit. Osa sellest soojushulgast muundus masinas mehhaaniliseks energiaks, kuid ülejäänud osa, olgu see Q_2 kalorit, läheb töötavalt kehalt jahutisse. See protsess on skemaatiliselt kujutatud joonisel 338: töö toimub vaid vahe $Q_1 - Q_2$ arvel.

Igas soojusjõumasinas muundub ainult üks osa soojendilt töötavale kehale antud soojusest mehhaaniliseks energiaks. Teise osa kütteaine energiast neelab tingimata jahuti.

Selles seisab soojusjõumasina töötamise tähtsaim iseärasus.

§ 154 tegime kindlaks, et liikuvate kehade mehhaaniline energia kõikides muundustes läheb täielikult üle siseenergiaks.

Teisiti on lugu siis, kui, ümberpöördult, keha siseenergia muundub mehhaaniliseks energiaks. Praktika näitab, et näiteks



Joon. 338. Soojuse tööks muundumise protsessi skeem.

gaasi või auru siseenergia ainult osaliselt muundub mehhanismide liikumise energiaks.

Selle põhjusest pole raske aru saada, kui meenutada, et keha siseenergia koosneb kaootilise liikumise olekus olevate aatomite ja molekulide kineetilisest ja potentsiaalsest energiast. Mis tähendaks näiteks teatud auruhulga siseenergia muundumine kolvi liikumise kineetiliseks energiaks? Paljud miljardid korrapäratult siia-sinna tormavaid molekule peaksid üksmeelselt lendama vastu kolbi ja andma ära kogu kineetilise energia.

Ka siis, kui niisugune protsess oleks võimalik, säiliks ikkagi osa auru siseenergiast molekulide vastastikuse mõju potentsiaalse energia kujul.

Seega ei saa kehade siseenergia täielikult üle minna mehhanismide liikumise mehhaaniliseks energiaks. Sellel asjaolul on tohutu suur praktiline tähtsus, kuna *see on seotud masinate kasuteguri tõstmise probleemiga.*

204. Soojusjõumasinate kasutegur. Soojusjõumasinate ehitamisel tuleb kõigepealt silmas pidada seda, et tööks muunduks võimalikult palju soojust, s. o., et minimaalse kütuse kuluga saaks maksimaalse hulga tööd. Siis on masin ökonoomne. Teades soojendi poolt töötavale kehale antud soojushulka Q ja tööks muundunud soojushulka $Q_1 - Q_2$, võime hinnata selle muundumise protsessi ökonoomsuse astet.

Masina poolt tööks muundatud soojushulga suhet selle soojushulgaga, mis on soojendilt saadud, nimetatakse soojusmasina kasuteguriks.

Kasutegurit tähistatakse tavaliselt tähega η (kreeka «eeta»).

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Uurides aurumasinates soojusenergia arvel töö saamise tingimusi, tegi S. Carnot 1824. aastal kindlaks, et igas reaalses soojusjõumasinas on kasutegur alati väiksem kui $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$, kus T_1 on soojendi absoluutne temperatuur ja T_2 on jahuti absoluutne temperatuur.

Seega võime kirjutada:

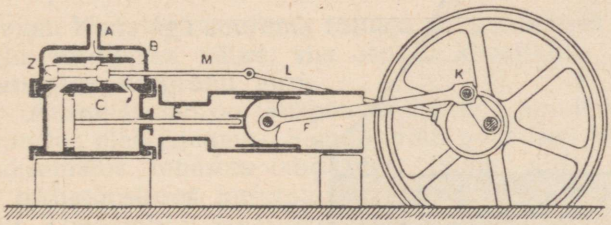
$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} < \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Siit järgneb, et kasuteguri suurendamiseks tuleb tõsta soojendi temperatuuri ja madaldada jahuti temperatuuri.

Näide. Aur läheb silindrisse 200° *C*, s. õ. 473° *K* juures ja lahkub sealt 100° *C*, s. o. 373° *K* juures.

Sellise masina kasutegur ei saa olla suurem kui

$$\eta = \frac{473 - 373}{473} \cdot 100\% \approx 21\%.$$



Joon. 339.

205. Aurumasin. Aurumasinates muundub auru energia vahetult kolvi liikumise energiaks.

Joonisel 339 on kujutatud ühesilindrilise masina skeem. Aurukatlast satub aur toru *A* kaudu siibrikarpi *B*, sealt aga töötavasse silindrisse *C* vaheldumisi kord ühest, kord teisest otsast. Auru jaotamine toimub siibri *Z* abil.[1]

Joonisel 339 läheb aur silindri parempoolsesse ossa ja surub kolvi vasakule, vasakul pool kolbi olev tarvitatud aur surutakse kolvi alt väljalasketoru kaudu välja (joonisel seda toru pole näidatud). Sellele järgnevalt läheb aur silindri vasakpoolsesse ossa ja tõukab kolvi paremale.

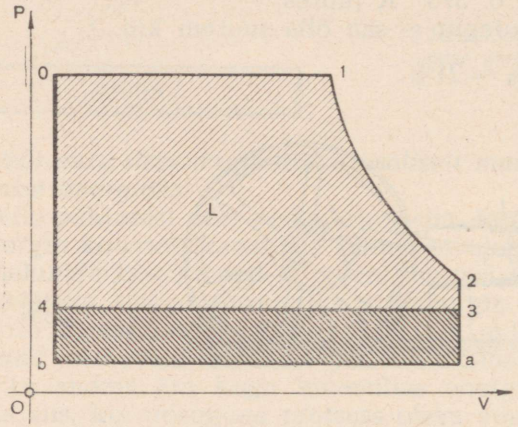
Soojusjõumasinate kasutegur, nagu me hiljem näeme, on üldiselt madal.

Varva *E*, kepsu *F* ja vända *K* abil muudetakse kolvi edasitagasi liikumine võlli ja hooratta pöörlevaks liikumiseks. Hooratas omakorda annab liikumise kangide *L* ja *M* kaudu siibrile, mis laseb auru vaheldumisi kord vasakult, kord paremalt silindrisse.

[1] On olemas aurumasinaid, milles auru jaotamine ei toimu mitte siibri, vaid spetsiaalsete klappide abil.

Masina töötamise diagramm on kujutatud joonisel 340. Joon *0—1* kujutab auru sisselaskmist jääva rõhu all. Punktis *1* toimub auru äralõikamine (auru silindrisse pääsemine katkeb). Sellele järgneb paisumine kõverjoont *1—2* mööda. Enne auru väljalaskmist mõõdab auru rõhku silindris punkti *2* ordinaat, kuna aga kanali väljalasketoruga ühendamise momendil ta langeb kohe rõhuni, mida kujutab joonisel punkti *3* ordinaat. Väljalase toimub jääva rõhu juures (joon *3—4*). Värske auru sisselaskmisel tõuseb rõhk punktist *4* esialgse väärtuseni.

Rõhk auru väljalaskmisel sõltub selle keskkonna rõhust, millesse aur lastakse. Kui aur lastakse õhku, siis on see rõhk ilmselt lähedane atmosfäärilisele rõhule.



Joon. 340.

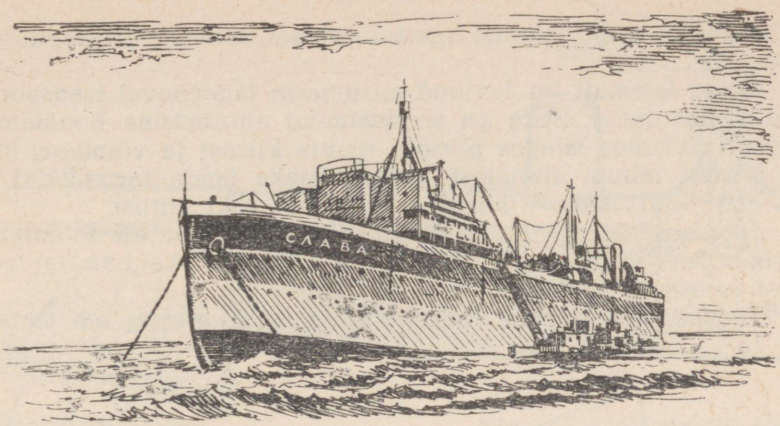
Mida väiksem on auru rõhk väljalaskmisel, seda suuremat tööd teeb aur kolvi liigutamisel silindris.

Sellepärast ei lasta aurumasinate äratöötanud auru mitte alati õhku, vaid erilisse nõusse, mida nimetatakse kondensaatoriks. Kondensaatori ülesanne on jahutada temasse juhitud auru ja muuta see veeks, mis sealt ära pumbatakse. Seetõttu on kondensaatoris madalam rõhk.

Juhul kui aurumasin töötab kondensaatoriga, siis auru väljalaskmist kujutab diagrammil joon *ab*, mis on madalamal joonest *3—4* (joon. 340). Viirutatud pindala *L* kujutab auru kasuliku töö suurust ühe tsükli jooksul.

0—1—2—a—b—0 pindala on suurem pindalast *0—1—2—3—4—0*; järelikult auru kondenseerumisega töötav masin teeb ühe ja sama auruhulga juures rohkem kasulikku tööd kui masin, millel kondenseerumist ei ole.

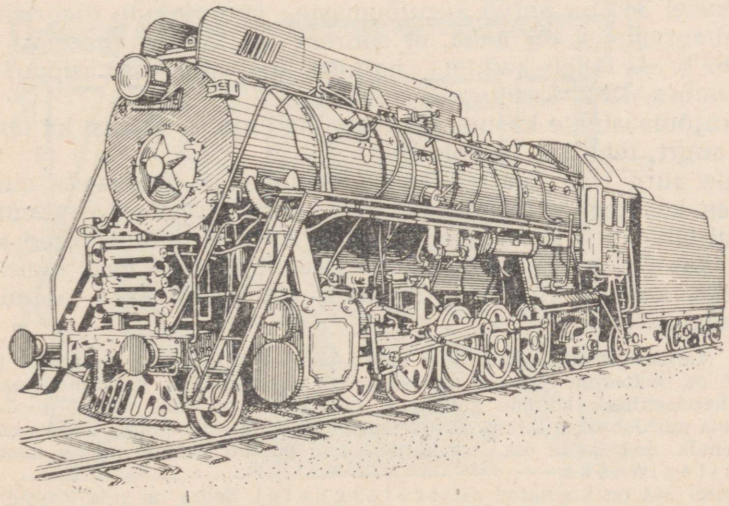
Masina võimsuse tõstmine kondensaatori abil pole mitte ainuke tee. Diagrammis (joon. 340) on näha, et esialgse joone, s. o. joone *0—1* tõstmine kõrgemale põhjustab masina võimsuse suure-



Joon. 341. Vaalapüügi baas «Slava».

nemist. Kuna aga suurema rõhuga auru saamiseks on energia lisakulu võrdlemisi väike, siis osutub kasulikuks rakendada aurumasinates kõrgrõhu auru.

Aurumasinad on tänapäeval säilinud ainult mõnes väiksemas vanemas elektrijaamas. Samuti võib neid veel näha peaasjalikult väiksemates tehastes-vabrikutes. Põllu- ning metsamajanduses ja turbatööstuses kasutatakse aurumasinate eriliiki — lokomobiili. Lokomobiili iseärasus seisab selles, et temas on ühendatud aurukatel ja aurumasin. Lokomobiilis kasutatakse kohalikke



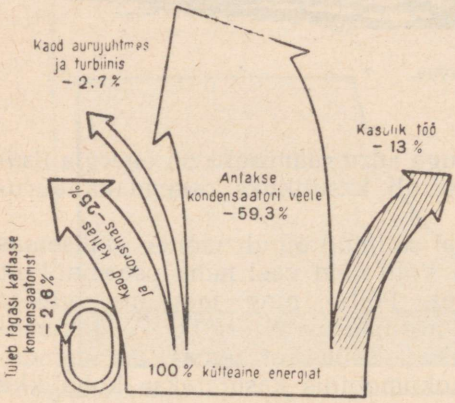
Joon. 342. Kaubarongi vedur seeriast «Л».

kütuste liike, nagu turvast, metsatööstuse jäätmeid ja stepirajoonides õlgi.

Kõige laiemalt on levinud aurumasin tänapäeval transpordis (vedur, aurulaev). Seda on soodustanud aurumasina hooldamise lihtsus, võimalus laiades piirides muuta kiirust ja võimalus kaunis lihtsalt muuta liikumist vastupidiseks (anda tagasikäik), ja mis eriti väärtuslik — kasutada mistahes liiki kütust.

Joonisel 342 on kujutatud üks kõige võimsamatest nõukogude Oktoobrirevolutsiooni-nimelise Luganski tehase kaubarongiveduritest seeriast «Л».

Tänapäeva parimate aurumasinate kasutegur ei ole suurem kui 15%.



Joon. 343. Diagramm energiakulu kohta aurujõumasinas.

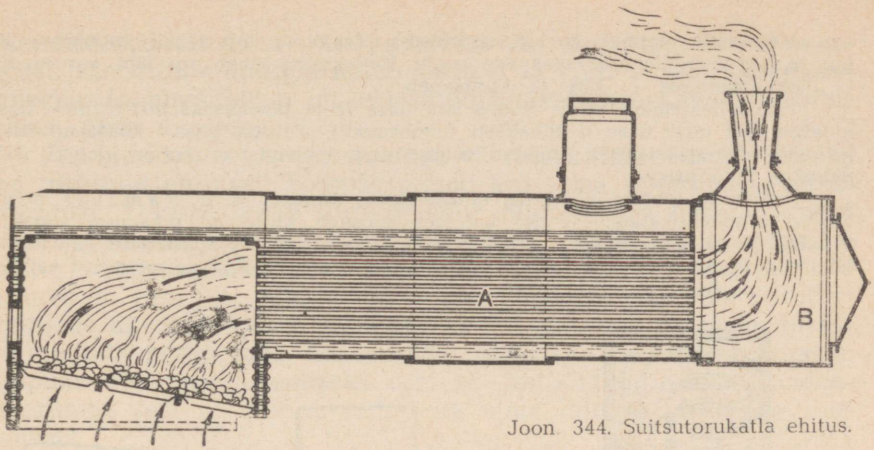
Joonisel 343 on antud aurujõumasina energiakulu diagramm. Sellest diagrammist on näha, et suurem osa kütuse energiast — umbes 87% — läheb kaduma, hajudes ümbritsevasse ruumi, ja ainult umbes 13% kasutatakse tööks.

Aurujõumasinate kasuteguri tõstmine kujutab endast ka tänapäeval suurt tehnilist probleemi.

Peale auru rõhu suurendamist kasutatakse tänapäeva aurumasinates kasuteguri tõstmiseks mitmekordset auru paisutamist. Sel juhul läheb aur ühest masina silindrist teise. Äratöötanud aur lastakse kas õhku või kondensaatorisse. Kondensaatoris muutub aur veeks, kust ta juhitakse katlasse või kasutatakse ruumide kütteseadeldistes.

206. Aurukatlad. Aurujõumasina üheks põhiliseks osaks on aurukatel. Igal aurukatlal on küttekolle kütuse põletamiseks, kütteruum ja vee- ning aururuumiga hermeetiliselt kinnine katlakere. Igal katlal on oma kindel tootmisvõime, mida mõõdab ühes tunnis teatud temperatuuri ja rõhu juures auruks muudetav veehulk. Seda katla osa, mis kütmise ajal puutub kokku leegiga, nimetatakse *küttepinnaks*.

Joonisel 344 on kujutatud *suitsutorukatel*. Selles on rida torusid *A*, mida mööda põlemisproduktid lähevad suitsukarpi *B*, kust nad satuvad korst-

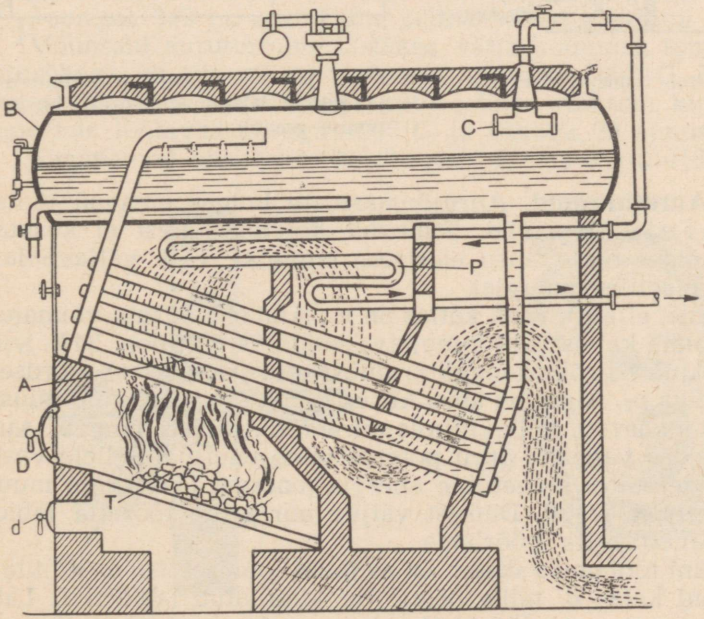


Joon. 344. Suitsutorukatla ehitus.

nasse. Niisuguseid katlaid kasutatakse lokomobiilidel ja veduritel. Rohkearvulised suitsutorud annavad väga suure küttepinna, mille tõttu saab hästi kasutada kütuse põlemisel saadud energiat. Sellistes kateldes on vesi suitsutorude vahel.

Võib ehitada katlaid ka teisiti: lasta vesi torudesse ja leek suunata torude vahele. Niisuguseid katlaid nimetatakse veetorukateldeks.

Joonisel 345 on antud veetoru-aurukatla läbilõige. Tema põhilisteks osadeks on küttekolle *T*, veetorud *A*, katlakere *B*, aururuum *C* ja ülekuumendi *P*.

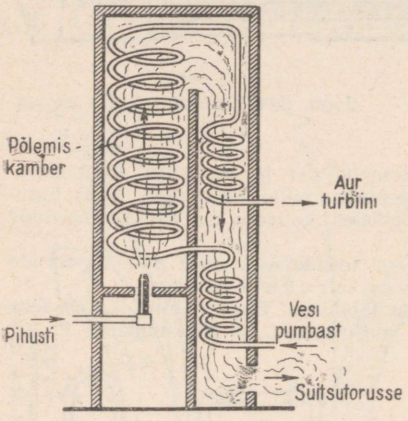


Joon. 345. Veetorukatla ehitus.

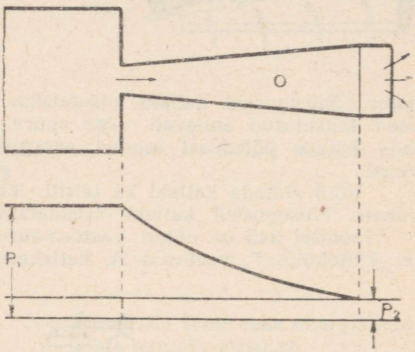
Veetorudes toimub aurustumisprotsess. Tekkinud aur läheb katlakerre *B*, kus ta koguneb ülemisse ossa vee peale. Katlakerest läheb aur läbi aururuumi *C* ülekuumendisse *P*, kus ta kuumeneb.

Kütus heidetakse selles katlas läbi ukse *D* ja põlemiseks tarvisminev õhk antakse läbi teise ukse *d* tuhakasti (tõmbeauku). Tulised gaasid tõusevad üles ja, möödudes spetsiaalselt ehitatud vaheseintest, läbivad tee, mis on joonisel 345 näidatud punktiiriga.

Aurukatla tehnika edasiseks täiustamiseks osutusid A. K. Ramzini poolt loodud otsevoolukatlad. Nendes kateldes koosneb küttepind pikkadest spiraaltorudest. Vesi pumbatakse spiraaltorudesse. Vesi, läbides spiraaltoru, aurustub täielikult, kuumeneb üle vajaliku temperatuuri ja seega väljub spiraaltorust valmis kujul (joon. 346).



Joon. 346. Prof. Ramzini otsevoolukatla skeem.



Joon. 347. Auruturbiini kooniline düüs ja düüsist läbimineva auru rõhu muutumise graafik.

207. Auruturbiinid. Aurujõumasinate hulgas omavad tähtsat kohta auruturbiinid. Erinevalt kolbmasinatest ei kasutata auruturbiinides mitte auru elastsuse energiat, vaid väljavoolava aurujoa kineetilist energiat.

Oletame, et auru rõhk katlas on p_1. Anname aurule võimaluse vabalt voolata katlast läbi mingi ava või düüsi *O* (joon. 347). Seile voolamise juures rõhk langeb ja düüsi otsa juures saab võrdseks mingi rõhuga p_2. Algul on auru kiirus võrdne nulliga, kuid düüsist väljudes ta kasvab, mille juures auru rõhk düüsis langeb. Auru rõhu langedes väheneb auru potentsiaalne energia. Sellele vastavalt suureneb auru kineetiline energia (energia jäävuse ja muundumise seaduse järgi). Düüsist väljuv aur satub tööratta labidatele ja paneb ratta pöörlema.

Turbiini töötamise skeem on esitatud joonisel 348 *a*. Võllile *A* on asetatud ketas *B*, mille pöiale on kinnitatud labidad *L*. Labidate vastas asetsevad düüsid *C*, mis saavad auru katlast. Siin aur paisub ja, väljudes düüsidest suure kiirusega, satub labidatest

moodustatud kanaleisse, kus ta kaotab osa oma kineetilisest energiast. Kineetiline energia läheb ketta *B* ja võlli *A* pöörlemapanemiseks. Joonisel 348 *b* on kujutatud ühekettalise Laval'i turbiini ratas (ilma kestata).

Turbiinidel on aurumasinatega võrreldes rida eeliseid. Esiteks on turbiinid ehituselt kompaktsemad kui sama võimsusega aurumasinad. Teiseks lubab turbiini suur pöörete arv kasutada neid ilma igasuguse hammasratas-ülekandeta vahelduvvoolugeneraatorite pöörlemapanemiseks elektrijaamades, kuna generaatorite juures on vaja just suurt pöörete arvu. Kolmandaks pole auruturbiinides üksikute osade edasi-tagasi liikumist, mida oleks tarvis muundada pöörlevaks liikumiseks, nagu see on aurumasinates. Lõpuks on turbiini eeliseks see, et äratöötanud aurust kondenseerunud vesi on puhas, millel on suur tähtsus aurukatla toitmisel.

Turbiinide kasutegur on märgatavalt kõrgem aurumasinate kasutegurist. Suure võimsusega turbiinide juures tõuseb see kuni 25%-ni.

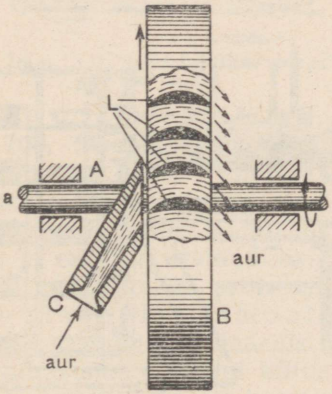
Suuri saavutusi on nõukogude tehnikal auruturbiinide konstrueerimisel ja ehitamisel.

Leningradi Metallitehas hakkas 1930. aastal välja laskma turbiine võimsusega 25 ja 50 tuhat kilovatti ja aururõhuga 28 ja 29 atmosfääri temperatuuril 375° *C* ja 400° *C*. Viimasel ajal ehitab see tehas turbiine võimsusega 100 tuhat kW ja suuremaid.

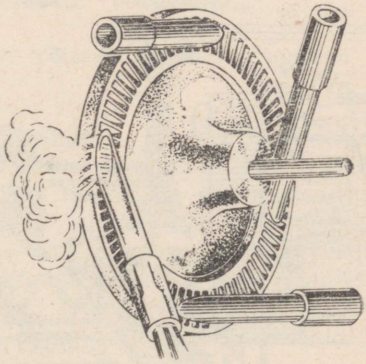
Joonisel 349 on antud ühe sellise võimsa turbiini üldvaade.

Võimsaid auruturbiine lastakse välja kodumaa tehaste poolt aururõhuga 90 atmosfääri ja temperatuuriga 500° *C*. Elektrijaamades on nende turbiinidega kütuse kulu väiksem kui turbiinidega, mis töötavad auruga 400° *C* ja rõhuga 29 atmosfääri.

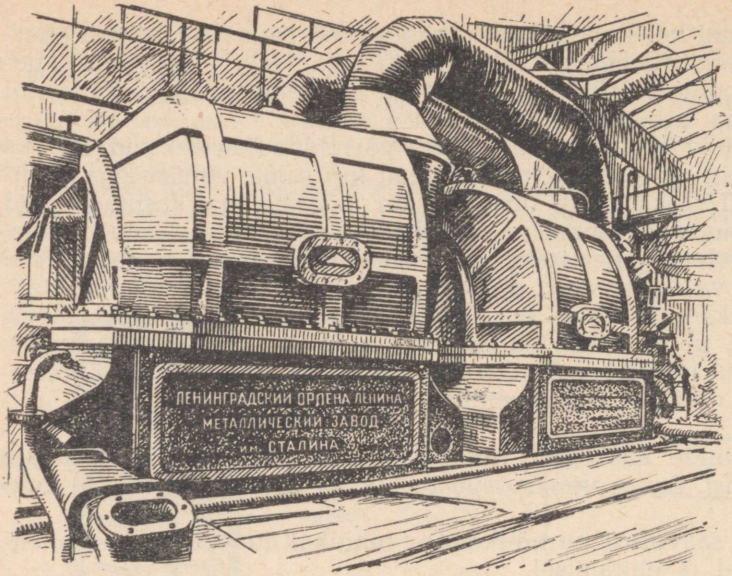
Tänapäeval ehitatakse Nõukogude Liidus auruturbiine võim-



Joon. 348 *a*. Auruturbiini töötamise skeem.



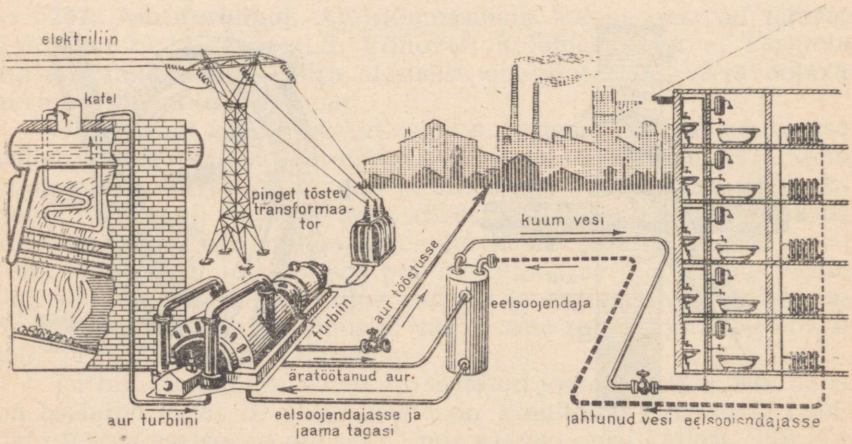
Joon. 348 *b*. Auruturbiini ratas.



Joon. 349. Leningradi Metallitehase poolt valmistatud 100 000 kW võimsusega kõrgrõhuturbiin.

susega kuni 500 000 kW, peagi hakatakse tootma aga veelgi võimsamaid turbiine (800 000—1 500 000 kW).

Aurujõumasinate kasutegur tõuseb märgatavalt, kui turbiinis äratöötanud auru kasutatakse auruvasarate ja presside töölepanemiseks või siis saunades, pesumajades, elumajade kütmiseks jne.

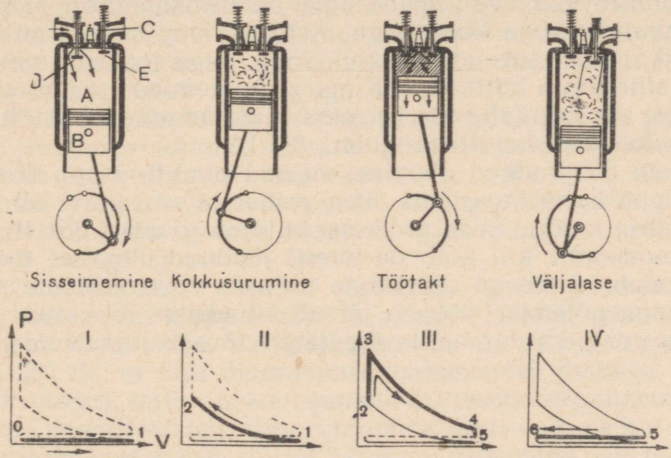


Joon. 350. Aurujõumasinast saadud auru jagamise skeem.

Termofikatsioon — see on elumajade ja tööstusettevõtete tsentraliseeritud varustamine äratöötanud auru energiaga. Nõukogude Liidus omistatakse termofikatsiooni probleemile suurt tähelepanu. Paljudes suurtes soojuselektrijaamades kasutatakse turbiinide äratöötanud auru vee soojendamiseks, mida kasutatakse hoonete kütmiseks.

Joonisel 350 on kujutatud auru energia kasutamise üks võimalikest skeemidest soojuselektritsentraalis. Katla ülekuumendatud aur läheb turbiini *A*, mis paneb pöörlema generaatori rootori. Turbiini äratöötanud aur läheb tööstusse ja osa spetsiaalsesse eelsoojendisse. Eelsoojendis soojendab aur vett, mis läheb kütteks, saunadesse, pesumajadesse ja mitmesugustesse tööstustesse.

Eelsoojendis kondenseerub aur veeks ja juhitakse spetsiaalsete pumpade abil katlasse.



Joon. 351. Neljataktilise bensiinimootori töötamise skeem ja diagramm.

208. Sisepõlemismootor. Aurumasinates ja auruturbiinides kasutatakse kütuse energia muundamisel mehhaaniliseks tööks aurukateldest saadavat veeauru. Peale nende on olemas soojusjõumasinad, mille silindrites toimuvad üheaegselt kütuse põlemise ja energia eraldumise ning ühe osa energia mehhaaniliseks tööks muundumise protsessid. Niisuguseid jõumasinaid nimetatakse sisepõlemismootoriteks. Nendes mootorites kasutatakse vedelat või gaasilist kütust. Enne süütamist aurustatakse või pihustatakse vedel kütus õhus.

Vaatleme esialgu bensiiniga töötava neljataktilise automootori ehitust. Traktoritel, tankidel ja lennukitel kasutatavad mootorid on töötamise printsiibi poolest sarnased automootoriga.

Neljataktilise sisepõlemismootori skeem ja tema töötamise diagramm on kujutatud joonisel 351.

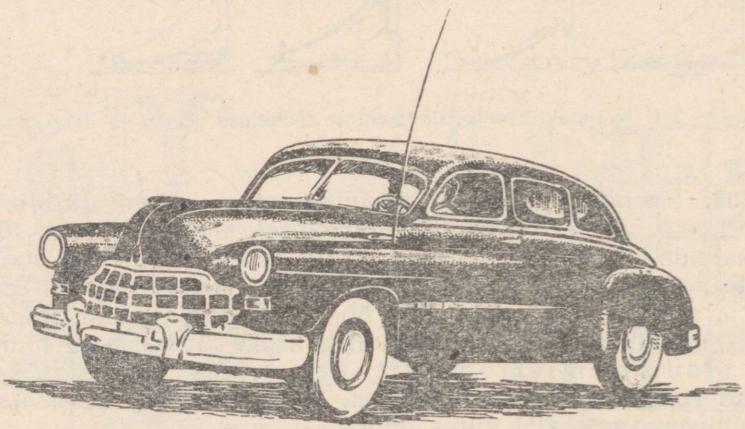
Nagu näha skeemist, võib silindris *A* vabalt liikuda kolb *B*. Silindri ülemises osas on kaks klappi. Klapi (ventiili) *D* kaudu toimub niinimetatud põleva segu (küttesegu) sisselaskmine. Põlev segu koosneb õhust ja vedela või gaasilise kütuse ülipisikestest osakestest. Klapi *E* kaudu eemaldatakse silindrist äratöötanud gaasid. *C* on küünal, mille ülesandeks on süüdata kolvi all olevat küttesegu.

Skeemi all asetseval diagrammil on kujutatud muutused, mis toimuvad töötava gaasiga, kui kolb liigub.

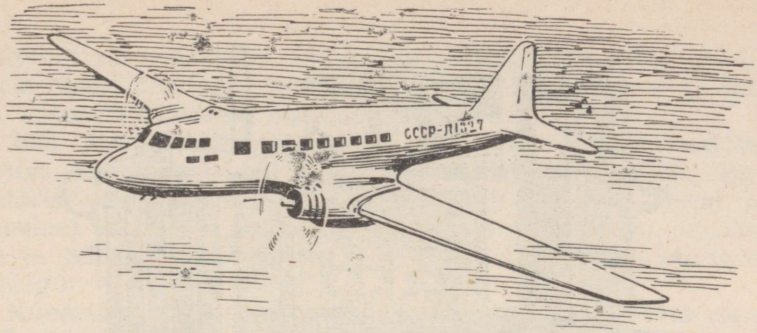
Kolvi äärmisi asendeid nimetatakse surnud punktideks (tehnikas nimetatakse ülemiseks ja alumiseks surnud punktiks). Nendest punktidest alustab kolb edasi-tagasi liikumist. Kaugust ühest surnud punktist teiseni nimetatakse kolvikäiguks. Kolvi liikumisel alla avab spetsiaalne jaotusmehhanism klapi *D*, mis jääb avatuks kogu kolvikäigu ulatuses, s. o. seni, kuni kolb on jõudnud alumise surnud punktini. Selle käigu jooksul imetakse läbi klapi silindrisse küttesegu. Kuna sisseimemine toimub jääva rõhu juures, siis kujutab seda protsessi diagrammil lõik 0—1, mis on paralleelne abstsissteljega (joon. 351 I).

Kui kolb on jõudnud alumisse surnud punkti, klapp *D* suletakse ja algab kolvi tagasikäik üles, mille jooksul kolvi all olev gaas surutakse kokku. Seda protsessi kujutab joonisel 351 II joon 1—2. Sel momendil, kui kolb on uuesti jõudnud ülemisse surnud punkti, toimub küttesegu süütamine (näiteks elektrisädeme abil).

Küttesegu põlemisel tõuseb järsult silindrisse tekkinud põlemissaaduste temperatuur, mille tagajärjel tõuseb järsult ka rõhk.



Joon. 352. Gorki autotehases toodetud kuueistmeline sõiduauto Gaz-12, millel on kuuesilindriline 90 hj mootor.



Joon. 353. Kahemootoriline reisilennuk.

Kogu protsess toimub väga kiiresti, nii et kolb selle aja jooksul ei jõua märgatavalt liikuda. Sellepärast võib seda protsessi lugeda jääva ruumala juures toimuvaks. Joonisel 351 III on see protsess kujutatud sirglõiguga 2—3.

Põlemissaaduste kõrge rõhu toimel hakkab kolb jälle liikuma alla, seejuures toimub silindris põlemissaaduste paisumine (see protsess on kujutatud diagrammil kõveraga 3—4). Kui kolb on jõudnud alumisse surnud punkti, on gaaside rõhk vähenenud. Samal momendil avaneb klapp *E*, mille tagajärjel rõhk silindris langeb veelgi (joon 4—5).

Kolvi liikumise jooksul alumisest surnud punktist ülemisse jääb kogu ajaks klapp *E* lahti ja silindris olevad äratöötanud gaasid heidetakse välja. Väljalaskejoon (5—6), mis on kujutatud joonisel 351 IV, ei ühti diagrammis sisseimemise joonega.

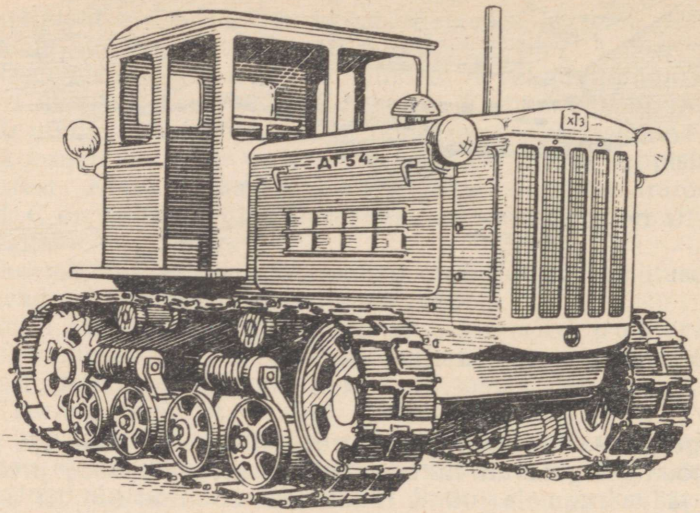
Protsessi, mille jooksul toimub küttesegu sisseimemine, nimetatakse imemiseks (sisselase), järgmist takti — kokkusurveks (komprimeerimiseks); sellele järgneb paisumine või niinimetatud töötakt. Selle takti algul toimub küttesegu järsk süttimine, rõhu järsk tõus ja põlemissaaduste paisumine. Lõpuks on viimane takt — väljalase.

Käsitletud mootoris tehakse nelja takti jooksul ainult üks töötakt. Selle takti jooksul teeb mootor kasulikku tööd. Selliseid mootoreid nimetatakse neljataktilisteks mootoriteks.

Mootori võllile kinnitatakse massiivne hooratas, mis, kogudes töötaktide ajal kineetilist energiat, kulutab seda osaliselt töö tegemiseks väljalaske-, imemis- ja kokkusurvetaktide ajal ja tagab seega mootori käigu sujuvuse.

Võimsuse tõstmiseks tehakse neljataktilised mootorid kahekuni kaheksasilindrilised.

Sisepõlemismootorite rakendusala on väga lai; neid kasutatakse autode (joon. 352), lennukite (joon. 353), traktorite (joon. 354) jt. juures.



Joon. 354. Traktor *ДТ-54*.

Joonisel 355 on antud ühesilindrilise sisepõlemismootori läbilõige.

Mootori põhiliseks osaks on silinder 1, mis on ülevalt kaetud äravõetava kaanega.

Silindri sees liigub kolb 2. Kolb kujutab endast metallist õõneskeha, mille ümber on vetruvad rõngad 3, mis on asetatud kolvi peal olevatesse kanalitesse. Kolvirõngaste ülesanne on mitte läbi lasta kolvi ja silindri seinte vahelt küttesegu põlemisel tekkinud gaase. Kolb on ühendatud kepsuga 4. Kepsu ülesanne on liikumise edasiandmine väntvõllile 5.

Silindri ülemine osa (pea) on ühendatud kahe kanaliga, mis võivad avaneda ja sulguda klappide 6 ja 7 abil. Klapid sulevad kanalid vedrude 8 abil (klapi 7 vedru pole joonisel nähtav). Klappide avamine toimub nukkide 9 abil, mis tõstavad pöörlemisel tõukureid 10.

Nukid on kinnitatud jaotusvõllile (nukkvõllile), mis pannakse pöörlema hammasrataste 11 ja 12 abil. Massiivne hooratas 13 on selleks, et vähendada väntvõlli pöörlemise ebaühtlust ja viia kolvid välja surnud punktidest.

Peale klappide on silindri ülemises osas segu süütamiseks küünal 14.

Küttesegu antakse silindrisse toru 15 kaudu, mis on ühendatud karburaatoriga, ja töötanud gaasid heidetakse silindrist välja toru 18 kaudu. Väntvõlli ja jaotusmehhanismi detailide aluseks ning kaitseks välismõjude vastu on karter 16. Karteri alumine osa on

määrdeõli reservuaariks. Silindri pea ja osa külgmist pinda on kahekordsete seintega. Nende seinte vahelises ruumis 17 ringleb vesi, jahutab silindreid ja moodustab veesärgi.

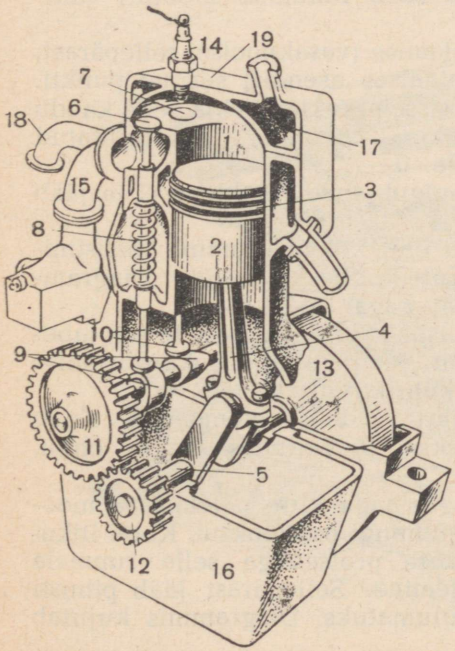
209. Sisepõlemismootor-diisel. Millest sõltub sisepõlemismootori kasutegur? Nii nagu igas soojusjõumasinas, on ka mootoris energiaallikas — soojendaja (selleks on antud juhul kütteaine) ja jahutaja välisõhu näol. Mida suurem on soojendaja ja jahutaja temperatuuride vahe, seda suurem on mootori kasutegur.

Kuna segu põlemisel tekkivate gaaside temperatuur on suur (1600—1800°), siis sisepõlemismootori kasutegur on märksa suurem aurujõumasinate kasuteguritest.

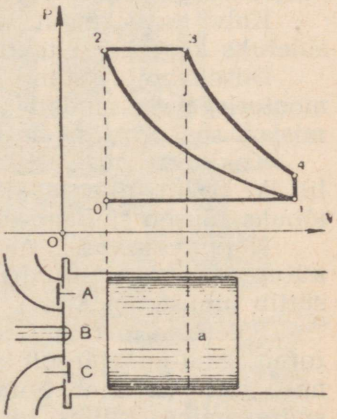
Kuidas veel saab suurendada sisepõlemismootori kasutegurit? Katsed ja arvestused näitavad, et selleks on tarvis segu tugevamalt kokku suruda. Kokkusurumisel küttesegu aga kuumeneb. Kuid automootorite juures ei saa põlevat segu kokku suruda üle 6 at, kuna ta siis enneaegselt süttiks.

Saksa insener Diesel leiutas sisepõlemismootori, mis töötab niisuguse tsükliga, mis võimaldab vältida nimetatud raskusi ja tunduvalt suurendada mootori kasutegurit. Tema leiutatud mootorit nimetatakse diiselmootoriks.

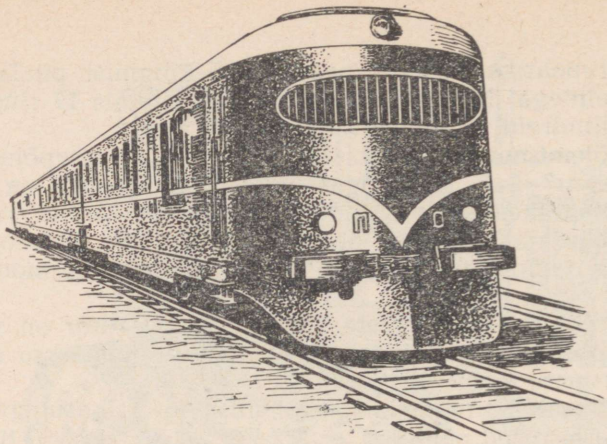
Vaatleme neljataktilise diiselmootori töötamise printsiipi.



Joon. 355. Ühesilindrilise sisepõlemismootori läbilõige.



Joon. 356. Diisli töö skeem ja diagramm.



Joon. 357. Moskva—Leningradi vaheline diiselrong.

Joonisel 356 on kujutatud diisli silinder ja diisli töö diagramm. Silindri peas on kütteklapp *B* (pihusti), sisselaskeklapp *C* ja väljalaskeklapp *A*. Kõiki neid ja ka pihusti toitepumpa paneb liikuma jaotusvõll, mis omakorda saab liikumise mootori väntvõllilt.

Võtame kolvi lähteasendiks ülemise (vasakpoolse, sellepärast, et silinder on kujutatud horisontaalses asendis) surnud punkti. Kolvi liikumisel paremale avaneb sisselaskeklapp *C* ja selle kaudu tuleb sisse õhk. See on esimene takt — imemine; ta on kujutatud diagrammis (joon. 356) isobaariga 0—1.

Kolvi tagasikäigul vasakule sulgub sisselaskeklapp *C* ja jääb suletuks kogu teise takti ajaks.

Diiselmootori silindris toimub õhu kokkusurumine (bensiinimootoris, nagu näidati § 208, suruti kokku küttesegu). Diagrammis on see protsess kujutatud kõveraga 1—2.

Kokkusurumise aste tõuseb diislis suurele kõrgusele (vt. tabelit lk. 352), mille tagajärjel õhu temperatuur kokkusurumise lõpuks tõuseb süütamiseks vajalikule kõrgusele.

Kolvi vasakusse surnud punkti jõudmise momendiga algab kütuse andmine silindrisse pihustist *B*. Sattudes kuuma õhku, süttib pihustatud kütus.

Põlemine ei toimu siin korraga, nagu kiire põlemisega mootoreis, vaid järk-järgult kolvi käigu mingi osa jooksul. Kolvi liikumise tõttu kaasneb kütuse põlemise protsessiga selle ruumala suurenemine, milles toimub põlemine. Sellepärast jääb pihusti töötamise ajal gaaside rõhk muutumatuks. Diagrammis kujutab põlemist joon 2—3.

Seega toimub segu põlemine jääva rõhu juures, kuna kiire

põlemisega mootorites, nagu me nägime, toimub põlemine jääva ruumala juures.

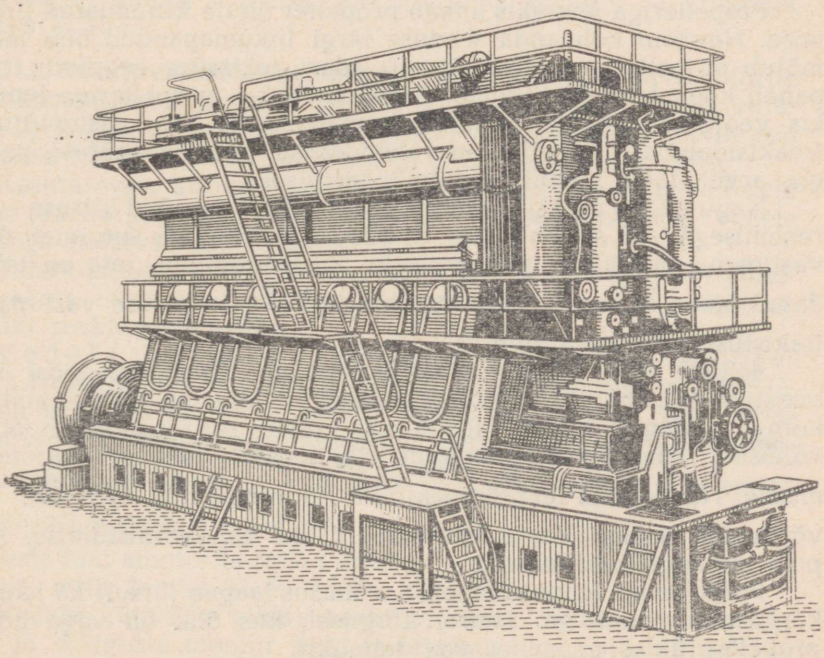
Edasine gaaside paisumine (kõverjoon 3—4) jätkub kolvi alumisse (parempoolsesse) surnud punkti tuleku momendini.

Kui kolb jõuab alumisse (parempoolsesse) surnud punkti, avaneb klapp *A* ja gaaside rõhk langeb kohe (4—1), millele järgnevalt tuleb kolb tagasi vasakusse surnud punkti. Selle käigu kogu ulatuses jääb väljalaskeklapp *A* avatuks; selle kaudu väljuvad äratöötanud gaasid silindrist.

Väljalaskejoon 1—0 on diagrammis lihtsuse pärast pandud ühtima sisseimemise joonega.

Diisel osutus bensiinimootorist ökonoomsemaks. Tema kasutegur on kuni 39%. Ta võib olla märksa suurema võimsusega (kümneid tuhandeid hj). Peale selle võib diisel töötada odavama kütusega — naftaga.

Suure võimsusega diislid leidsid kiiresti rakendamist nii statsionaarsetes seadeldistes kui vee-, raudtee- ja õhutranspordis. Väiksema võimsusega diisleid on hakatud viimasel ajal hea eduga rakendama ka autode, traktorite (joon. 354) ja väiksemate laevade juures. Joonisel 357 on kujutatud diiselmootoriga mootorvedur ja joonisel 358 laeva 3250-hobujõulise diiselmootori üldvaade.



Joon. 358. Laeva diiselmootor võimsusega 3250 hj.

Automootorid on võimsusega 20—300 hj ja pöörete arvuga 1500—2000 pööret minutis veoautode ja 2000—4000 kergesõiduautode juures.

Lennukimootorid konstrueeritakse võimsusega 2000 hj ja isegi suuremad ning pöörete arvuga 1450—3200 $\frac{\text{pööret}}{\text{min.}}$.

Mõnede sisepõlemismootorite iseloomustavad andmed on antud järgmises tabelis:

Mootori tüüp	Surveaste (a ehk kokkusurve määr	Kasutegur %-des	Kütuse kulu g-des $\frac{\text{hj}}{\text{h}}$ kohta
Diisel	13—20	30—39	160—210
Karburaatormootor . . .	5—11	18—24	250—350

210. Reaktiivmootorid. Lennunduse areng läheb põhiliselt lennukite kiiruse ja lennukõrguse suurendamise suunas, mis omakorda suuresti sõltub mootorite täiustamise võimalustest.

Sisepõlemismootorid koos propelleritega ei võimalda enam lennukite kiiruse ja lennukõrguse suurendamist. Põhjus seisab järgmises.

Propelleriga lennukis annab propeller õhule kiirendatud liikumise. Newtoni kolmanda seaduse järgi liikumapandud õhu mass mõjub propellerile ja tõukab teda edasi, tekitades veojõudu, mis paneb kogu lennuki liikuma. Seega saadakse propelleriga lennukis veojõud propelleri poolt liikumapandud õhu vastumõjuna (reaktsioonina). Propeller on vahendajaks, mis teeb kütuse energia arvel tööd lennuki liikumapanemiseks.

Nagu näitas praktika, väheneb propelleri veojõud kiiruse suurenemisega. Asi seisab selles, et kiiruse suurenedes suureneb õhu vastupanu propelleri pöörlemisele; kiiruste puhul, mis on lähedased hääle kiirusele õhus (umbes 1200 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$), on see vastupanu (takistus) juba väga suur.

Sellisel juhul läheb suurem osa mootori kasulikust tööst õhu takistuse ületamiseks. Mootori kasutegur väheneb mitukümmend korda. Lennuki kiiruse tõstmiseks tuleb suurendada mootori võimsust, mis aga paratamatult viib lennuki raskuse suurendamisele. Nii näiteks lennukite kiiruse suurendamine 150—200 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ võrra tõi endaga kaasa lennukite kaalu kahekordistumise. See pole muidugi ökonoomne.

Propelleriga lennuki mootori võimsus langeb järsult ka lennukõrguse kasvamisega. Suurel kõrgusel, kus õhk on väga hõre, propeller üldse enam ei vea lennukit.

Seega ei saa lennata suure kiirusega ja suurtel kõrgustel len-

nukitega, mis on varustatud sisepõlemismootori jõul pöörleva propelleriga.

Nimetatud puudustest osutusid vabaks reaktiivmootorid, mis tänapäeval ikka rohkem ja rohkem tungivad lennundusse ja võimaldavad selle edasiarenemist.

Reaktiivmootoril puudub propeller. Nendes mootorites kütuse energia muundub vahetult liikuva reaktiivaparaadi mehhaaniliseks energiaks. Kehadeks, mis vastastikku teineteist mõjutavad, ei ole enam propeller ja õhk, vaid mootorist väljuv gaasijuga ja lennuk ise.

Kiirenevalt liikuv gaasijuga tekitab reaktiivse jõu, mis mõjub mootorile suunas, mis on vastupidine joa suunaga, s. t. reaktiivne jõud mõjub lennu suunas.

Et gaasijuga saaks mootoris kiirenduse, peab gaasi rõhk mootoris olema suurem ümbritseva keskkonna rõhust. Rõhkude vahe toimel hakkab gaasijuga pidevalt mootorist välja voolama ja tekitama reaktiivset veojõudu. Seda võib saavutada kütuse pideva põletamisega mootoris.

Reaktiivne veojõud tekib mootori ja joa vastastikusest mõjust, mis tekib mootoris endas, sõltumatult ümbritsevast keskkonnast. Järelikult, kui ainult kindlustada kütuse põlemine reaktiivmootoris, siis ta töötab ka kõrgetes hõredates atmosfääri kihtides ja isegi õhuta ruumis, s. t. seal, kus sisepõlemismootor ja propeller töötada ei saa.

211. Reaktiivmootorite põhilised liigid. Kõik reaktiivmootorite liigid koosnevad järgmisest kolmest põhilisest osast: 1) paak kütusega, 2) kambrid, kus see kütus põleb, 3) seadeldised, mille abil juhitakse kütus põlemiskambrisse ja põlemissaadused välja.

Kasutatavast kütusest sõltuvalt liigitatakse reaktiivmootoreid kahte suurde gruppi: tahke kütusega töötavad mootorid, vedela kütusega töötavad mootorid.

Tahke kütusega töötava mootori lihtsaimaks liigiks on püssirohurakett. Püssirohu põlemisel tekivad raketis gaasid, mis tekitavadki reaktiivse veojõu.

Vedela kütusega töötavates reaktiivmootorites (ЖРД) põlevad vedelad kütused (naftasaadused, piiritus jt.). Vedela kütusega töötavaid reaktiivmootoreid kasutati Teise maailmasõja lõpul kaugelennu mürskudel (lennuk-mürskudel). Kaugelennu mürskude kiirus oli kuni 5400 $\frac{km}{h}$, lennukaugus 320 km ja trajektoori kõrgus — 100 km.

Seda liiki mootorite hulka kuulub ka planeetidevahelise raketi mootor, mille leiutas K. E. Tsiolkovski.

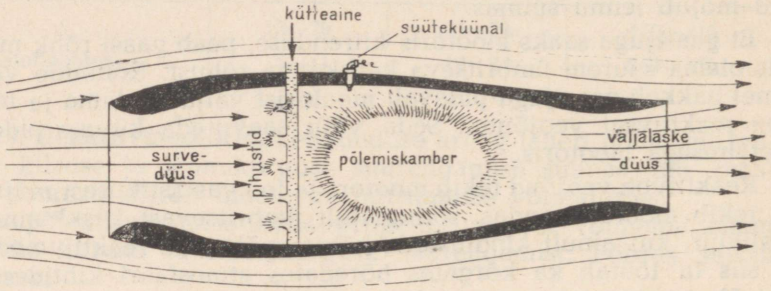
Vedela kütusega töötav reaktiivmootor on suurte lennukiiruste ja -kõrguste mootor, kuid ta tarvitab liiga palju kütust. Nii näiteks tarvitasid Teise maailmasõja ajal Londoni pommitamiseks

kasutatud hitlerlaste lennuk-mürsud 130 kG põlevat segu sekundis, s. o. terve tonni minutis.

Kuna kütuse tagavara on lennukil piiratud, siis vedela kütusega töötava reaktiivlennuki lennukaugus ja -kestus on väikesed. Peale selle peab niisuguses mootoris olema ehitatud spetsiaalne kamber aine jaoks, mis oksüdeeriks kütust, see aga omakorda suurendaks mootori mõõtmeid ja kaalu.

Ökonoomsemaks osutub õhureaktiivmootor. See kasutab kütuse oksüdeerimiseks vahetult õhu hapnikku ja seetõttu langeb ära vajadus oksüdeerija paagi järele.

Joonisel 359 on kujutatud otsevoolulise õhureaktiivmootori skeem. Ta töötab järgmiselt.



Joon. 359. Otsevoolulise õhureaktiivmootori skeem.

Lennuki lendamisel vastutulev õhuvool läbib survedüüsi ja haarab kaasa pihustitest väljapaiskuva kütuse. Tekkinud kütte-segu satub järgnevalt põlemiskambrisse, kus ta süüdatakse süüteküünalde abil.

Kütesegu põlemisel tekkinud gaasid paisatakse tohutu kiirusega väljalaskedüüsi kaudu välja.

Segu põlemisel tekkinud rõhu järsu suurenemise tagajärjel on gaaside kiirus düüsist väljumisel palju suurem mootorisse voolava õhu kiirusest. Liikumishulga jäävuse seaduse järgi (vt. § 54) selle kiiruste vahe arvel tekibki reaktiivne veojõud.

Öeldust järgneb, et otsevooluline õhureaktiivmootor saab töötada ainult siis, kui lennuk liigub. Sellise mootoriga lennuk iseseisvalt õhku tõusta ei suuda. Selleks on tarvis lisamootorit.

Praegusel ajal otsevoolulised õhureaktiivmootorid ei ole veel levinud. Kuid tulevikus avanevad nendele mootoritele siiski laiad perspektiivid, kuna nad osutuvad väga ökonoomseteks suurte lennukiiruste juures (2000—3000 $\frac{km}{h}$).

Laialt kasutatakse praegu lennunduses turbokompressor-õhureaktiivmootoreid, mis kindlustavad nii õhkutõusmise kui lendamise.

Skemaatiliselt on selle mootori ühte liiki kujutatud joonisel 360.

Veojõu tekitamiseks lennuki õhkutõusmisel on vajalik seadeldis, mis kindlustab õhu imemise põlemiskambrisse. Turbokompressor-õhureaktiivmootoris on selliseks seadeldiseks kompressoriga ühendatud gaasiturbiin. Jooniselt on näha, et turbiini ketas on ühisel võllil kompressoriga. Kui turbiin hakkab töötama, siis ta paneb liikuma ka kompressori. Viimane imeb õhku, surub selle kokku ja annab põlemiskambrisse. Edaspidi toimub kõik niisama nagu õhureaktiivmootoris.

Läbides gaasiturbiini, annavad põlemissaadused talle umbes poole oma energiast, nende rõhk ja kiirus mõnevõrra vähenevad. Ülejäänud energia läheb gaaside kiiruse suurendamiseks düüsis. Väljalaskedüüsist paiskub välja võimas gaasijuga, mis tekitabki reaktiivse veojõu.

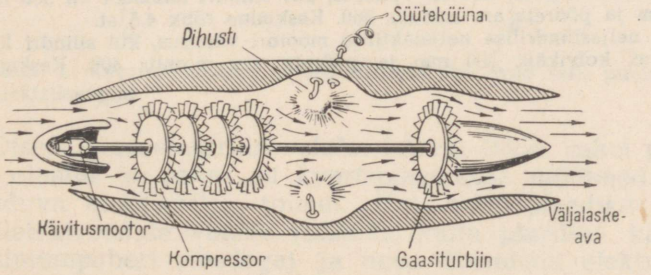
Tänapäeva turboreaktiivmootor on kergem sama võimsusega kolbmootorist umbes viis korda. 900—1000 $\frac{km}{h}$ lennukiiruse juures võib võimsus tõusta kuni 6500—7500 hj.

Siiski jäävad praegusaegsed turboreaktiivmootorid suuresti maha kolbmootoritest ökonoomsuse, töötamise kindluse ja võimsuse poolest startimisel.

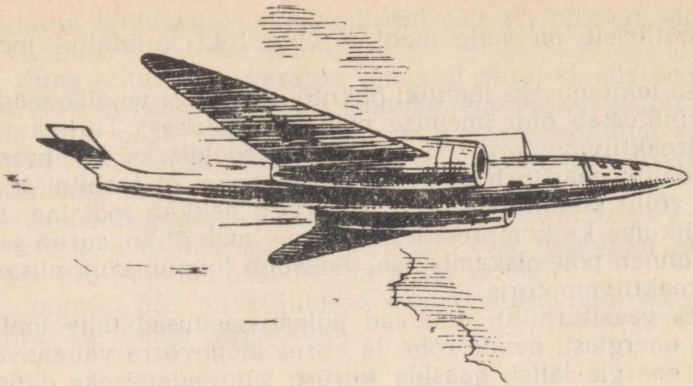
Käesoleval ajal rakendatakse lennuasjanduses samuti turbopropellermootoreid.

Turbopropellermootoris annavad turbiini läbivad gaasid sellele suurema osa oma energiast. Sellepärast saab turbiin märgatavalt suurema võimsuse kui vajab kompressor. Turbiini võimsuse ülejäägiga pannakse pöörlema propeller, mis on põhiliseks veojõu allikaks. Peale selle saadakse turboreaktiivmootoreis täiendavat veojõudu düüsist väljuvate äratöötanud gaaside reaktiivsest toimest.

Tänapäeva tehnika üheks esimeseks ja tähtsamaks ülesandeks on reaktiivmootorite edasine täiustamine.



Joon. 360. Turbokompressormootori skeem.



Joon. 361. Reaktiivlennuk.

Nõukogude Liidu teadlased ja konstruktorid töötavad edukalt selle probleemi kallal.

Joonisel 361 on kujutatud reaktiivmootoriga lennuk.

Harjutus 75.

1. Arvutada auru töö aurumasina silindris järgmistel andmetel: aur tuleb silindrisse 20 at rõhu all; auru äralõikamine toimub kolvikäigu $^1/_4$ pealt; $^3/_4$ käiku liigub kolb auru paisumise arvel. Käigu lõpul on auru rõhk 2 at. Kolvi pindala on 300 cm^2, käigu pikkus on 60 cm. Arvutustes lugeda rõhu langemist auru paisumisel ühtlaseks.
2. Määrata auru töö aurusilindris, kui aur tuleb silindrisse 15 at rõhu all, auru äralõikamine toimub käigu 0,1 pealt ja kolvi edasine liikumine kuni silindri otsani läheb auru paisumisega kuni 1,2 at-ni. Kolvi pindala on 500 cm^2 ja kolvikäigu pikkus 60 cm.
3. Määrata aurumasina teoreetiline võimsus järgmistel andmetel: kolvi läbimõõt on 50 cm, kolvikäigu pikkus 80 cm, auru keskmine rõhk 12 at. Pöörete arv minutis 240.
(Juhis: kui pöörete arv minutis on 240, siis töökäike on 480.)
4. Arvutada neljataktilise ühesilindrilise naftamootori võimsus, kui silindri läbimõõt on 250 mm, kolvikäik 300 mm ja pöörete arv minutis 300. Keskmine rõhk 4 at.
5. Määrata kahetaktilise mootori võimsus, kui silindri läbimõõt on 300 mm, kolvikäik 400 mm ja pöörete arv minutis 360. Keskmine rõhk 4,5 at.
6. Määrata neljasilindrilise neljataktilise mootori võimsus, kui silindri läbimõõt on 200 mm, kolvikäik 300 mm ja pöörete arv minutis 400. Keskmine rõhk 7,5 at.

LISA

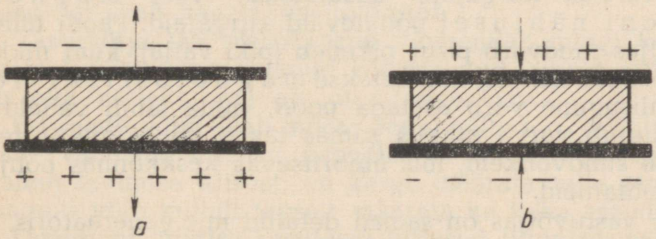
I. ULTRAHELI JA SELLE KASUTAMINE.

§ 1. Ultraheli generaatorid ja vastuvõtjad.

Mehhaanilised võnkumised, millede sagedus ületab kuuldavuse ülemise piiri (20 000 Hz), tekitavad keskkonnas (õhus, vees) pikilainetuse, mida nimetatakse ultraheliks.

Ultraheli generaatoritest on enam levinud kvartskristallist generaatorid. Nende töötamine põhineb piesoelektrilisel[1] nähtusel, mille avastasid vennad Curie'd aastal 1880.

Piesoelektrilise nähtuse olemus on järgmine. Kui kvartskristallist teatud viisil lõigata välja õhuke plaadike ja seda deformeerida, kas venitada või suruda kokku, siis ilmnevad selle pinnal elektrilaengud. Kui püüame plaadi paksust suurendada (joon. 1 *a*), saab plaadikese üks pind positiivse, selle vastaspind aga negatiivse laengu. Plaadikese kokkusurumisel muutuvad laengute märgid vastupidisteks (joon. 1 *b*). Seda nähtust nimetatakse otseseks piesoelektriliseks efektiks.



Joon. 1. Kvartsplaadikese deformeerimisel ilmnevad selle pinnal elektrilaengud.

Otsese piesoelektrilise efekti kõrval tekib vahel pöördefekt, mille olemus on selles, et kvartsplaadikese mõõtmed muutuvad vahelduva elektrivälja toimel. Kui kvartsplaadike paigutada metallelektroodide vahele (näiteks, katta plaadike kahelt poolt alumiiniumpaberi ribadega) ja need ühendada elektripatareiga, siis plaadikese paksus pisut muutub (näiteks plaadike tõmbub

[1] *piezō* — kr. k. rõhun.

kokku). Kui muuta elektroodidevaheline elektriväli endisega võrreldes vastassuunaliseks, siis plaadike paisub. Seda nähtust nimetatakse *elektrostriktsiooniks*.

Mida suurem on vahelduva pinge sagedus, seda suurema sagedusega võngub plaadike. Nii võib saada igasuguse sagedusega ultrahelivõnkeid.

Kaasaegne tehnika võimaldab saada väga suure sagedusega ultrahelivõnkeid. Nõukogude teadlane S. J. Sokolov tekitas ultrahelivõnkeid sagedusega miljard hertsi. See ei ole veel piiriks, mida ei saa ületada.

Kvartsplaadikesele antava pinge tõstmisel suureneb plaadikese võnkeamplituud. Tuleb aga märkida, et plaadikese mõõtmete muutumine ultraheli võnkumistel on väga väike, näiteks pinge rakendamisel 1000 V suureneb või väheneb plaadikese paksus vaid $2 \cdot 10^{-5}$ mm võrra.

Plaadikese pinna võnkeamplituud kasvab tugevasti siis, kui muutliku pinge sagedus ühtib plaadikese pinna elastsete omavõngete sagedusega, s. t. resonantsi korral.

Kui asetada võnkuv kvartsplaadike mingisse keskkonda, näiteks õhku või vette, levivad selles *ultrahelilained*.

Ultrahelilained levivad õhus peaaegu sama suure kiirusega kui häälelained, kuid nad neelduvad tugevasti süsihappegaasis. Kui õhus on tunduv hulk süsihappegaasi, siis ei levi ultrahelilained kaugele. Vees ja tahketes kehades neelduvad ultrahelid vähem kui õhus ning levivad neis küllaltki kaugele.

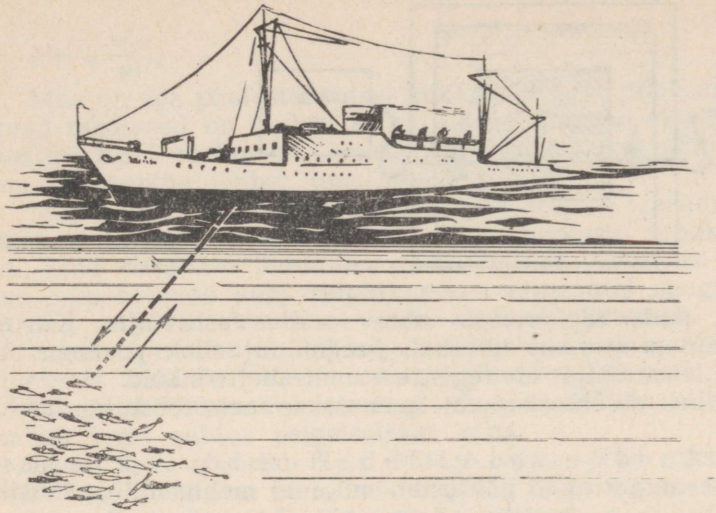
Kasutades ultraheli generaatorites erinevate mõõtmete ja kujuga kvartsplaadikesi, võib saada kitsaid ja väga suure intensiivsusega (võimsusega) ultrahelikiirte kimpe.

Peale kvartsist kiirgajate kasutatakse veel *magnetostriktsiooni nähtusel* põhinevaid kiirgajaid. Pandi tähele, et magnetväljas raudvarb pisut pikeneb (piki välja), kuid nikkelvarb lüheneb. Seda nähtust nimetatakse *magnetostriktsiooniks*. Kui niisugune varb asetada pooli, mida läbib vahelduvvool, siis muutub varva pikkus samas taktis voolu muutustega. Varb sooritab sundvõnkeid, mis ümbritsevas keskkonnas põhjustavad ultrahelilaineid.

Ultraheli vastuvõtjas on samad detailid mis generaatoris. Ta töötamine põhineb otsesel piesoelektrilisel efektil, millest juba oli juttu.

§ 2. Ultraheli kasutamine.

1. *Hüdrolokatsioon*. Ultraheli tähtsaim kasutamisala on hüdrolokatsioon. See põhineb ultrahelilainete peegeldumisel kahe keskkonna piirilt. Hüdrolokatsiooniks nimetatakse vees asuva keha asukoha määramist ultraheli abil. Hüdrolokatsiooni



Joon. 2. Hüdrolokatsiooni kasutamine kalaparvede avastamisel.

leiutas Esimese maailmasõja ajal (1914.—1918. a.) progressiivne prantsuse teadlane Paul Langevin (loe lanžövään).

Hüdrolokatsiooni idee on lihtne (joon. 2). Laeva põhja paigutatud ultraheliallikas (näiteks piesokvartsgeneraator) kiirgab ultrahelilaineid kitsa, paralleelsete kiirte kimbuna. Kiirgamine ei toimu pidevalt, vaid üksikute impulssidena. Paus impulsside vahel ei või olla väiksem ajavahemikust, mille vältel signaal jõuab peegeldava kehani ja sealt tagasi vastuvõtjani.

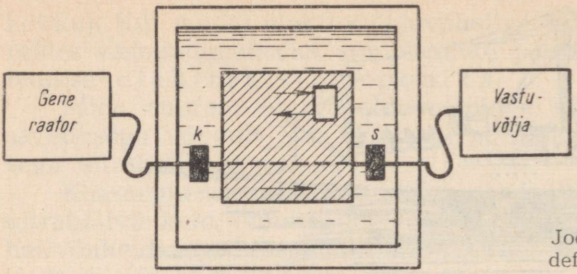
Vastuvõtja (ka piesokvarts) võimendab mingi keha pinnale langenud ja sealt peegldunud või hajunud laineid. Selleks kehaks võib olla näiteks vee all olev allveelaev.

Eri seade võimaldab mõõta aega, mille jooksul ultrahelilained läbisid vahemaa allikast peegeldava pinnani ja tagasi. Teades ultraheli levimise kiirust, on kerge määrata selle pinna kaugust. Niisamuti võib küllalt täpselt määrata ka keha asendi ruumis.

Langevini leiutist kasutasid liitlased (Prantsusmaa, Inglismaa ja Venemaa) edukalt sõjas aastatel 1914—1918 võitluses saksa allveelaevadega.

Kaasaegsed kalapüügilaevad kasutavad hüdrolokatsiooni kalaparvede avastamiseks.

2. Ultraheli defektoskoopia. Tehnikas kasutatakse ultraheli defektoskoopiat, mille leiutas nõukogude teadlane S. J. Sokolov. Ultraheli defektoskoopia ideed selgitab joonis 3. Õlivannis on piesokvartskiirgaja (*K*) ja sond (ultraheli vastuvõtja *S*). Samas vannis on ka uuritav metalltoode. Kui ultraheli teel metallis ei ole pragu, siis jõuab sondini võrdlemisi intensiivne



Joon. 3. Ultraheli kasutamine defektoskoopias.

ultraheli, mida registreerib vastav seade vastuvõtjas. Kui aga metallis on pragu, siis ultraheli peegeldub sellelt peaaegu täielikult ja vastuvõtja ei registreeri ultrahelivõnkeid.

Ultraheli defektoskoopiat kasutatakse meie tööstuses laialdaselt.

3. Mõned teised ultraheli omadused ja kasutamisalad. Ultraheli põhjustab mitmeid mehhaanilisi, füüsikalis-keemilisi ja bioloogilisi efekte. Nii tõuseb anumas võnkuva kvartsplaadikese kohal veepind kühmu. Väga intensiivselt võnkuva kvartsplaadikese kohalt purskub üles veejuga. Kui sellesse veejoasse asetada sõrm, siis tundub, et veejuga põletab. Kui valada katseklaasi kaks tavalistel tingimustel mittesegunevat vedelikku (vesi ja elavhõbe või vesi ja õli) ja asetada see niisugusesse veejoasse, siis moodustub neist kiiresti emulsioon. Seda nähtust kasutatakse emulsioonide valmistamisel.

Ultrahelilainete mõjul eraldub vedelikus lahustunud gaas sellest mullidena, muutub mõnede ainete keemistemperatuur ja sulanud ainete tahkestumise kestus. Suure intensiivsusega ultraheli avaldab mõju kehade kristalliseerumisele. Ultraheli kiirendab mõningaid keemilisi reaktsioone, mõjub hapendavalt jne.

Mõned elusorganismid (väikesed kalad, konnapojad, ripsloomad jt.) surevad ultraheli toimel.

On leitud, et mõnede taimeliikide (kartul, hernes jt.) seemnete mõjutamisel ultraheliga lüheneb taimede kasvuperiood ja tõuseb saagikus.

II. TÄIENDAV ÕPPEMATERJAL TEEMALE «ÜLEMAAILMNE GRAVITATSIOON».

§ 1. Raskusjõu muutumine sõltuvalt koha geograafilisest laiusest ja kõrgusest Maa pinnalt.

Kehade raskuse (nende kaalu) põhjustab neile mõjuv Maa gravitatsioonijõud.

Juhul kui Maa oleks kera ja ta ei pöörleks oma telje ümber, siis raskusjõud Maal oleks võrdne gravitatsioonijõuga:

$$F = \gamma \frac{Mm}{R^2}.$$

Maa on aga poolustelt pisut kokku surutud: poolustele suunduvad raadiused on umbes 21 km võrra lühemad ekvaatori raadiustest. Kuid raskusjõu muutumise olulisemaks põhjuseks on Maa pöörlemine ümber oma telje.

Maa pöörlemisel on erinevatel geograafilistel laiustel olevatel maapinna punktidel erinev joonkiirus: pooluste joonkiirus on null, kuid ekvaatori punktidel on ta suurim. Seepärast on need jõud, mis hoiavad kehi ringliikumises erinevatel geograafilistel laiustel, erinevad. Vaatleme seda küsimust lähemalt.

Joonisel 4 on kujutatud keha, mille mass on m, maakera pinna erinevates kohtades: keskmistel geograafilistel laiustel, poolusel ja ekvaatoril. Vektor F kujutab gravitatsioonijõudu, millega Maa tõmbab tema suhtes paigalseisvat keha.

Kuna keha pöörleb koos Maaga, siis mõjub temale kesktõmbejõud F_k, mis on gravitatsioonijõu F üks komponentidest.

Kesktõmbejõu võib arvutada valemitest

$F_k = m\omega^2 r$ või $F = m\omega^2 R \cos \varphi$,

kus ω — Maa pöörlemise nurkkiirus, r — paralleeli raadius, R — Maa raadius, φ — koha geograafiline laius.

Teist gravitatsioonijõu komponenti, jõudu P, nimetatakse raskusjõuks. Raskusjõu sihti nimetatakse püstsihiks. Nagu jooniselt näha, ei ühti see maakera raadiuse sihiga.

Maakera pinnal asuv vaatleja, kes järelikult võtab osa ta ööpäevasest pöörlemisest, märkab ainult ühe komponendi — raskusjõu P mõju.

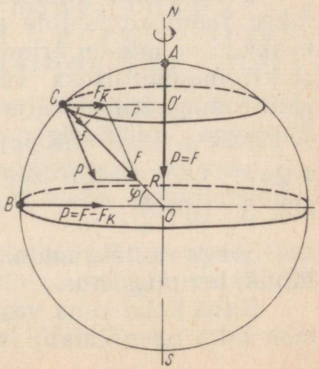
Raskusjõu P mõju ilmneb kahesuguselt: dünaamiliselt — andes kehale kiirenduse ($P = mg$) — ja staatiliselt — põhjustades rõhumist alusele või konksule, mille külge ta on riputatud.

Maa pöörlemisel ta punktide joonkiirus on poolustel võrdne nulliga, järelikult on seal nulliga võrdne ka kesktõmbejõud (F_k). Seepärast on poolustel raskusjõud ja gravitatsioonijõud võrdsed:

$$P_{\text{poolus}} = F = \gamma \frac{Mm}{R^2}.$$

Ekvaatoril on nii kesktõmbejõud F_k kui ka gravitatsioonijõud F suunatud piki raadiust maakera keskpunkti poole. Seepärast on raskusjõud ekvaatoril

$$P_{\text{ekvaator}} = F - F_k = F - m\omega^2 R.$$



Joon. 4. Raskusjõu sõltuvus geograafilisest laiusest.

Kõigil teistel geograafilistel laiustel on raskusjõud gravitatsioonijõust väiksem suuruse (f) võrra, mis on suunatud piki Maa raadiust ja mille põhjustab kesktõmbejõud.

$$P = \gamma \frac{mM}{R^2} - m\omega^2 R \cos^2 \varphi.$$

Valemist $P = mg$ järgneb, et raskuskiirendus g muutub koos koha geograafilise laiuse muutumisega. Poolusel on $g_p = 9{,}83 \frac{m}{s^2}$, ekvaatoril $g_e = 9{,}78 \frac{m}{s^2}$. Raskuskiirendust geograafilisel laiusel 45° ja meretasemel nimetatakse normaalseks. See on $9{,}80665 \frac{m}{s^2}$.

Kõrguse suurenedes Maa pinna suhtes väheneb raskusjõud, mida võib näha gravitatsioonijõu valemist:

$F = \gamma \frac{Mm}{(R+h)^2}$, kus h on kõrgus Maa pinnalt.

§ 2. Gravitatsiooniväli.

Nagu nägime, mõjuvad gravitatsioonijõud ka läbi vahemaa. Kuid gravitatsiooniseadus ei anna vastust küsimusele, kas mõjuvad kehad seejuures teineteisele vahetult või eksisteerib nende vahel materiaalne keskkond, mille kaudu antakse edasi gravitatsiooni mõju.

Avastades gravitatsiooniseaduse, ei pidanud Newton võimalikuks kehade vahetut mõju läbi vahemaa.

Selleks et märgata niisuguse mõju olulist tunnust, vaatleme kahte näidet, kus kehad, olles teineteisest eraldatud mingi vahemaaga, mõjuvad teineteisele materiaalse keskkonna kaudu.

Me võime avada ukse näiteks sel kombel, et me seda käega üldse ei puuduta, vaid tõmbame käepideme külge seotud nöörist. Sel juhul on käe mõju edasiandvaks keskkonnaks *aine*. Mõju edasiandmisel toimub nööris deformatsiooniprotsess ja selleks on vaja aega. Järelikult antakse mõju nööri kaudu uksele mitte silmapilkselt, vaid lõpliku kiirusega.

Teine näide. Maakera kunstlike kaaslaste kanderakette juhitakse raadiosignaalide abil. Ka siin toimub side läbi materiaalse keskkonna, mis on erinev ainest. Seda materiaalse vormi nimetatakse elektromagnetiliseks väljaks. Ka raadiosignaali edasiandmine elektromagnetilise välja poolt ei toimu silmapilkselt, vaid lõpliku kiirusega. Raadiosignaal levib kõige suurema võimaliku kiirusega — valguse kiirusega, mis vaakuumis on ligikaudu $300\,000 \frac{km}{s}$ ehk $3 \cdot 10^{10} \frac{cm}{s}$.

Seega on läbi materiaalse keskkonna edasiantaval mõjul alati lõplik levimiskiirus.

Kuna kahe keha vastastikuse mõju silmapilkne levimine vahemaa taha on võimatu (valguse kiirus on suurim võimalikest kii-

rustest), siis peab ka gravitatsioonijõudude mõju kanduma ühelt kehalt teisele lõpliku kiirusega. Järelikult mõju peab levima materiaalses keskkonnas. Niisuguseks keskkonnaks on gravitatsiooniväli.

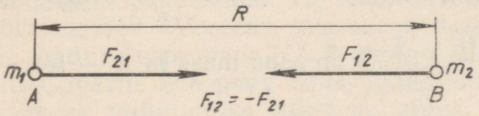
Vaatleme gravitatsioonivälja probleemi lähemalt.

Kujutame endale ette kerapinda raadiusega R, mille keskpunktis asub materiaalne punkt A massiga m_1. Paigutame kuhugi selle kera pinnale teise materiaalse punkti B massiga m_2. Gravitatsiooniseaduse põhjal mõjub kummalegi punktile jõud F, mille suurust väljendab valem:

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{R^2}.$$

On näha, et selle jõu suurus ei muutu, kui vahetada punktide A ja B asukohad.

Kahe materiaalse punkti vastastikust gravitatsiooni võib järgmiselt ette kujutada: punkt B asub punkti A gravitatsioonivälja ja see väli mõjub punktile B jõuga F_{12}. Samal ajal punkt A, asudes punkti B gravitatsioonivälja, avaldab omalt poolt niisama suurt mõju jõu F_{21} näol (joon. 5).



Joon. 5. Tõmbejõud kahe materiaalse punkti vahel.

Tähistame materiaalsete punktide A ja B kiirendused vastavalt tähtedega g_1 ja g_2.

Ülemaailmse gravitatsiooniseaduse ja Newtoni teise seaduse põhjal võib kirjutada:

$$g_1 = \gamma \frac{m_2}{R^2}; \quad g_2 = \gamma \frac{m_1}{R^2}.$$

Need võrdused näitavad, et kiirendus, millega liigub üks materiaalne punkt teise punkti gravitatsioonivälja gravitatsioonijõu mõjul, ei sõltu kiirendatava materiaalse punkti massist.

Seega, kõik kehad, viibides mingi keha gravitatsioonivälja ühekaugusel gravitatsioonitsentrist, liiguvad gravitatsioonijõu mõjul ühesuguse kiirendusega. Teiste sõnadega: $g = \gamma \frac{m}{R^2}$ on muutumatu suurus kõikide kehade puhul, mis asuvad võrdsetel kaugustel gravitatsioonitsentrist. Selle muutumatu suuruse abil võib kvantitatiivselt iseloomustada antud keha gravitatsioonivälja.

Nagu teada, võivad elektriliselt laetud kehad teineteist tõmmata või tõugata. Järelikult võib elektriväljas märgata nii tõmbe- kui ka tõukejõude.

Gravitatsioonivälja mõjuvad ainult tõmbejõud.

Elektrivälja jõudude mõju eest võib varjuda, ümbritsedes end näiteks tiheda metallvõrguga. Kuid tänini ei teata, kuidas varjata end gravitatsioonijõudude eest. Teadlased tegelevad ka selle probleemiga.

§ 3. Maa kunstlikud kaaslased.

Maa kunstlike kaaslaste ja teiste kosmiliste aparaatide väljasaatmisel on tohutu suur teaduslik tähtsus, kuna nende abil saab uurida atmosfääri ülemisi kihte, elektromagnetiliste lainete levimist, kosmilist kiirgust ja teisi kosmose saladusi.

Selleks et tehiskaaslane liiguks ringorbiidil ümber Maa, on vaja anda talle kindla suurusega horisontaalsuunaline kiirus. Kui suur peab olema see kiirus?

Jõud, mis paneb tehiskaaslase tiirlema ümber Maa, on gravitatsioonijõud, millega Maa mõjub tehiskaaslasele. See jõud tingib kaaslase kesktõmbekiirenduse, millega ta püsivalt liigub ringorbiidil ümber Maa.

Seega on gravitatsioonijõud vajalikuks kesktõmbejõuks. Kuna gravitatsioonijõud arvuliselt väga vähe erineb raskusjõust ($mg \approx \gamma \frac{Mm}{R^2}$), siis võime kirjutada: $mg = \frac{mv_1^2}{R}$, millest $v_1 = \sqrt{gR}$ ehk $v_1 \approx \sqrt{\gamma \frac{M}{R}}$, kus M on Maa mass ja R — selle raadius ($R = 6371 \cdot 10^3$ m).

$$v_1 = \sqrt{9{,}81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 6371 \cdot 10^3 \text{ m}} \approx 7910 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 7{,}9 \frac{\text{km}}{\text{s}}.$$

Saadud kiirust nimetatakse tavaliselt e s i m e s e k s k o s m i l i s e k s k i i r u s e k s.

Iga keha, sõltumata ta massist, võib muutuda Maa tehiskaaslaseks, kui talle anda horisontaalsuunaline kiirus, mis on võrdne esimese kosmilise kiirusega.

Maa tehiskaaslase ringkiirus on seda väiksem, mida kõrgemal ta tiirleb. Ringorbiidi jaoks, mille raadius on r, võib kirjutada: $\frac{mv_r^2}{r} = \gamma \frac{M \cdot m}{r^2}$; $v_r = \sqrt{\gamma \frac{M}{r}}$; kus $r = R + h$ ja R on Maa raadius.

Näiteks, kõrgusel 35 800 km on kaaslase kiirus umbes $3 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Sellel orbiidil liikudes on kaaslase tiirlemisperiood $T = 24$ tundi (see on nn. ööpäevane Maa tehiskaaslane). Niisugune kaaslane tiirleb sama nurkkiirusega, millega liigub Maa oma ööpäevasel pöörlemisel. Vaatlejale, kes asub Maal, näib ta liikumatuna.

Kuu orbiidil ($r = 384\,000$ km) on kaaslase ringkiirus umbes $1 \frac{\text{km}}{\text{s}}$.

Kui kaaslase kiirus on suurem ringkiirusest või see on suunatud mingi nurga all kohaliku horisondi suhtes, siis tiirleb kaas-

lane ümber Maa mööda ellipsit. Ellipsi Maale lähim punkt — perigee — asub punktis, millest kaaslane välja lasti, kuid ellipsi kaugeim punkt — apogee, asub diametraalselt perigee vastas.

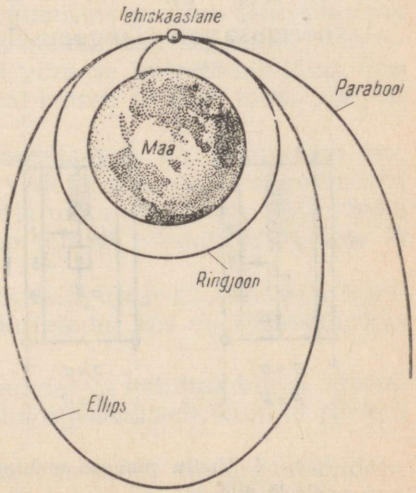
Suurendades kaaslase kiirust kuni $11{,}2\frac{km}{s}$, mida nimetatakse teiseks kosmiliseks kiiruseks, kujuneb kaaslase orbiit sedavõrd väljaveninuks ja apogee nii kaugeks Maast, et nimetatud kiiruse minimaalselgi suurendamisel kaaslane lahkub Maa gravitatsioonivälja mõju piirkonnast. Seejuures ei jää kaaslase orbiit enam kinniseks ja kaaslane lahkub jäädavalt planeetidevahelisse ruumi (joon. 6).

Tehiskaaslaste ja kosmiliste rakettide väljasaatmisel arvestatakse Maa ööpäevast pöörlemist ja aastast tiirlemist. Seejuures püütakse raketikandja lasta liikuma tasapinnas, mis läbib Maa masskeset.

Selleks et anda tehiskaaslasele vajalikku kiirust, on vaja mitmeastmelisi võimsaid rakette. Tehnika kõrge tase Nõukogude Liidus võimaldab selliste rakettide ehitamist.

4. oktoobril 1957. a. lasti Nõukogude Liidus välja maailma esimene tehiskaaslane. 12. aprillil 1961. aastal lasti meil orbiidile kosmoselaev «Vostok» inimesega pardal. Kosmoselaeva piloodiks oli lendur-kosmonaut Nõukogude Liidu kangelane Juri Aleksejevitš Gagarin. See päev läheb jäädavalt ajalukku kui inimese poolt kosmose vallutamise ajajärgu algus, kui nõukogude rahva loomingu aupäev.

J. A. Gagarini kangelastegu kordasid kangelased-kosmonaudid: G. S. Titov, A. G. Nikolajev, P. R. Popovitš, V. F. Bõkovski jt.



Joon. 6. Tehiskaaslaste orbiidid.

Kosmoselaeval «Vostok-6» sooritas juunis 1963. a. kestva kosmoselennu esimene naine maailmas — Nõukogude Liidu kangelane — V. F. Tereškova (praeguse nimega Nikolajeva-Tereškova).

§ 4. Kaaluta olek.

Keha kaaluks nimetatakse jõudu, millega keha Maa külgetõmbe tõttu rõhub rõhtsale liikumata alusele (Maa suhtes) või pingutab nööri, millega ta on üles riputatud. Sellisel juhul on keha kaal võrdne raskusjõuga.

Kuna alus või riputusnöör omakorda mõjuvad kehale, siis on kaaluvuse iseloomulikuks tunnuseks deformatsioon kehas, mis on keha ja aluse või riputusnööri vastastikuse mõju poolt esile kutsutud.

Kehade vabal langemisel puudub neis deformatsioon. Sel juhul on kehad k a a l u t a o l e k u s. Joonisel 7 on kujutatud seadis, mille abil saab jälgida keha kaaluta olekut. Seade koosneb vedrukaalust, millele on riputatud koormus. Kogu seade võib liikuda mööda suunajaid alla või üles.

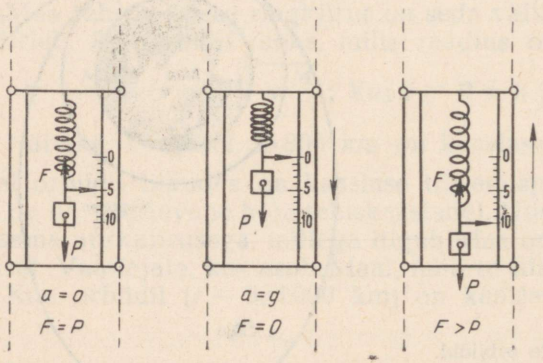
Kui kaal koos koormusega langeb vabalt, siis kaalu osuti püsib nullil, järelikult kaalu vedru ei ole seejuures pingutatud.

Analüüsime seda nähtust, kasutades liikumise seadusi. Eeldame, et kaalu külge riputatud koormus liigub alla kiirendusega a. Newtoni teise seaduse põhjal võime öelda, et talle mõjub jõud, mis on võrdne jõudude P ja F vahega, kus P on raskusjõud ja F — koormusele rakendatud vedru elastsusjõud.

Seega

$m \cdot a = P - F$ või $m \cdot a = m \cdot g - F$, millest
$F = m\,(g - a)$.

Koormuse vabal langemisel on $a = g$. Järelikult $F = m\,(g - g) =$



Joon. 7. Vedru pinguse muutumine koormuse liikumisel vertikaalselt üles ja alla.

= 0, mis näitab, et vedrus (ja koormuses) pole elastseid deformatsioone.

Kaaluta olek ei esine mitte ainult vabal langemisel, vaid mistahes keha vabal viskel, mil temale mõjub ainuüksi raskusjõud. Sel juhul ei mõju keha osakesed alusele või nöörile, mille otsas ta ripub: ta ei saa nende suhtes Maa külgetõmbest põhjustatud kiirendust.

Kui järsu rebimisega panna joonisel 7 kujutatud seade vabalt liikuma üles, siis ka niisugusel liikumisel seisab kaalu osuti nullil. Ka sel juhul kaal ja koormus, liikudes ühesuguse kiirendusega, ei mõju vastastikku teineteisele.

Järelikult, *kui kehadele mõjub ainuüksi raskusjõud, siis nad on kaaluta olekus, mille iseloomulikuks tunnuseks on deformatsiooni ja sisemiste pingete puudumine neis.*

Kaaluta olekut ei tule segada niisuguse keha olekuga, mis on tasakaalustatud jõudude mõju all. Näiteks, kui keha on vedelikus, mille kaal keha ruumala suuruses on võrdne keha kaaluga, siis sel juhul raskusjõud on tasakaalustatud vedeliku üleslükkejõuga. Kuid keha rõhub vedelikule (nii nagu alusele), mille tõttu raskusjõu poolt esile kutsutud pinged ei kao, järelikult ta ei viibi ka kaaluta olekus.

Vaatleme nüüd kehade kaaluta olekut Maa tehiskaaslastel. Tehiskaaslase vabal lennul orbiidil ümber Maa on tal igal hetkel kiirendus. Samasugune kiirendus on ka kõigil temal asuvatel kehadel nii arvestussüsteemis, mis on seotud Maa masskeskmega, kui ka süsteemis, mis on seotud «kinnistähtedega». Selle kiirenduse suuruse määrab neile mõjuv Maa külgetõmbejõud (teiste kosmiliste kehade mõju võib jätta arvestamata, kuna nad on suure kauguse tõttu väga väikesed). Nagu nägime (§ 2), ei sõltu see kiirendus keha massist. Nendes tingimustes puudub tehiskaaslase ja temal asuvate kehade, samuti ka nende osakeste vahel, vastastikune mõju, mille põhjustab Maal viimase külgetõmbejõud. See tähendab, et Maa tehiskaaslase vabal lennul on kõik temal asuvad kehad kaaluta olekus.

Kõik kinnitamata kehad kosmoselaeval, ka kosmonaut ise, heljuvad kosmoselaeva sisemuses; vedelik anumas ei rõhu anuma põhjale ja seintele, seepärast ei voola ta ka ava kaudu välja; niidi otsa riputatud raskus (pendel) püsib sellises asendis, millisesse ta jäeti.

Kosmonaudilt ei nõua vähimatki pingutust käe või jala hoidmine kaldasendis. Ta ei saa ette kujutada, kus on «üleval», kus «all».

Kui anda mingile kehale kosmoselaeva kabiinis kiirus kabiini suhtes, siis liigub see keha ühtlaselt sirgjooneliselt, kuni ta põrkab kokku teiste kehadega.

Et vältida kaaluta oleku kahjulikku mõju elusorganismidele, eeskätt inimese elutegevusele, kavandavad teadlased mitmesugu-

seid võtteid kunstliku «raskuse» loomiseks. Näiteks projekteeritakse selliseid planeetidevahelisi jaamu, mis pöörlevad oma raskuskeskme ümber. Seinte elastsusjõud annab vajaliku kesktõmbekiirenduse ja deformeerib nendega kokkupuutuvaid kehi samuti, nagu see toimus maal.

§ 5. Ülekoormused.

Kui vedrukaalu otsa (joon. 7) riputada koormus ja seda tõsta kiirendatult üles, siis vedru venib rohkem välja ja kaalu näit suureneb.

Kujutame endale ette, et tõustes vertikaalselt liigub kosmoselaev kiirendusega $a = n \cdot g$, kus $n > 1$.

Kosmonaudile mõjub raskusjõud $P = m \cdot g$ ja jõud F. Need jõud mõjuvad ühel ja samal vertikaalsirgel, kuid vastassuunaliselt.

Nende jõudude resultant annab kosmonaudile vertikaalselt üles suunatud kiirenduse a.

$$F - P = m \cdot a \text{ või } F - m \cdot g = m \cdot a,$$

millest $F = m(a + g)$.

Kuid $a = n \cdot g$, järelikult $F = (n + 1)\, m \cdot g$.

Jõud F kutsub esile kosmonaudi kehas ja kõikides laeva osades deformatsioonid, mis on $n + 1$ korda suuremad neist deformatsioonidest, mis tekivad samades kehades Maal paigalseisvas kosmoselaevas.

Kõik näib nii, nagu mõjuks kosmoselaevale ja kõikidele temal asuvatele kehadele $n + 1$ korda suurem Maa külgetõmbejõud (üldjuhul $\frac{a+g}{g}$ korda).

Kui kosmoselaev liigub kiirenevalt vertikaalselt alla kiirendusega $a > 2g$, siis ka sel juhul tekivad laevas ja temal asuvates kehades normaalseist suuremad deformatsioonid (s. t. neist, mida võib täheldada Maa pinnal paigalolevate kehade juures).

Seda on näha võrdusest: $F = m(a - g)$,
milles siis, kui $a > 2g$ $F > mg$.

Kui kiirendusega liikuvates kehades tekivad täiendavad deformatsioonid, öeldakse tavaliselt, et neile mõjub ü l e k o o r m u s.

Ülekoormuse suurust iseloomustatakse liikumise kiirenduse a ja vaba langemise kiirenduse g suhtega:

$$k = \frac{a}{g}.$$

Mitmesuguse suurusega ülekoormusi taluvad peale kosmonautide kõik lendurid ajal, mil lennuk (eriti reaktiivlennuk) kiiresti muudab (kaotab, lisab) kiirust.

Selleks et ülekoormused ei kahjustaks tervist, teevad lendurid pidevalt spetsiaalset treeningut.

Harjutused.

1. Seletage, kuidas on kergem saata orbiidile Maa tehiskaaslast, kas piki ekvaatorit või meridiaani?
2. Miks on ühele ja samale orbiidile keerukam saata rasket Maa tehiskaaslast kui kerget?
3. Kuidas võnguks pendel raketis, mis liigub kiirendusega vertikaalselt üles? Vertikaalselt pikeerivas lennukis?
4. Arvutage Maa tehiskaaslasele mõjuv keskmine kiirendus ja ülekoormus, kui mitmeastmeline rakett andis talle 7 min. 5 sek. jooksul esimese kosmilise kiiruse.
5. Mõnedes planeetidevaheliste jaamade projektides tekitatakse kunstlik «raskus» jaama (millel on õõnsa rõnga kuju) pöörlemisega ümber raskuskeskme. Mitu pööret minutis peab tegema jaam, et kosmonaut massiga 70 kg tunneks selles enda «raskust» samasugusena nagu Maal? Kosmonaudi kaugus pöörlemisteljest on 60 m.
6. Arvutage Maa loodusliku kaaslase Kuu kiirus orbiidil, eeldades, et Kuu orbiit on ringjoon.
7. Mis toimub Maa tehiskaaslases mündiga, kui see panna klaasi, milles on vesi?
8. Kas kaaluta olekus mõjub vedelikku asetatud kehale üleslükkejõud? Teisiti öeldes, kas Arhimedese seadus on rakendatav kaaluta oleku korral?
9. Vedelikuga täidetud anuma alumises osas on auk. Kas anuma vabal langemisel voolab august vedelikku?
10. Ühendatud anuma ühte harusse on valatud vesi, teise elavhõbe. Paigalolekus on vedelikud tasakaalus. Kas muutub vedelikkude tase anuma vabal langemisel?
11. Kas võib ümber Maa tiirleva kosmoselaeva kabiinis mõõta õhurõhku elavhõbedabaromeetriga?

III. TÄIENDAV MATERJAL TEEMALE «TAHKETE KEHADE OMADUSI».

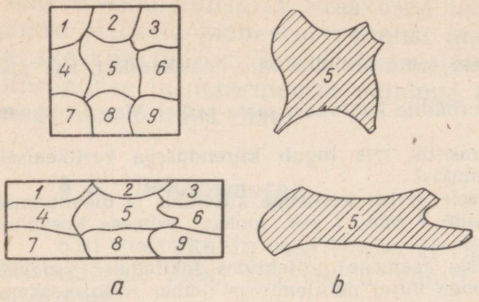
§ 1. Metallide omaduste ja struktuuri muutumine nende mehhaanilisel ja termilisel töötlemisel.

Vaatleme õpitud metallide omaduste praktilist kasutamist.

Metalle töödeldakse kas selleks, et saada vajaliku kuju ja mõõtmetega tooteid, või selleks, et muuta materjali füüsikalis-mehhaanilisi omadusi. Nagu järgnevalt näeme, kaasneb metallide töötlemisega tavaliselt ka ta omaduste osaline muutumine.

Detaili kuju ja mõõtmeid muudetakse kas deformeerimisega plastilises olekus (valtsimine, tagumine, stantsimine, tõmbamine) või laastu võtmisega lõikamise, treimise, hööveldamise või puurimise teel.

Materjali omadusi ja struktuuri saab muuta termilisel töötlemisel — karastamisel, noolutamisel ja lõõmutamisel. Termiline töötlemine seisneb selles, et metall kuumutatakse kõrge temperatuurini ja siis jahutatakse kiiresti (karastamine) või aeglaselt (noolutamine, lõõmutamine). Seejuures muutub metalliterade suurus. Karastamisel ei jõua metalliterakesed kiire jahtumise tõttu kasvada suureks ja saadakse peeneteralise struktuuriga metall, mis on ühtlane ja kõva.



Joon. 8. *a* — metalliterakeste muutumine survel; *b* — ühe terakese deformatsioon.

Metallide töötlemist surve abil kasutatakse ainult nende metallide juures, mis on küllalt plastilised, s. t. niisugused, mis suurte jõudude rakendamisel tunduvalt deformeeruvad, ilma et nad puruneksid.

Tavalistel temperatuuridel saab rõhumise abil töödelda pliid, inglistina, alumiiniumi ja vaske. Külmalt on terase plastilisus selleks operatsiooniks mitteküllaldane. Soojendamisel terase plastilisus suureneb ja kuumas olekus võib teda taguda, valtsida jne.

Kuidas muutub metallide struktuur nende töötlemisel rõhumise teel? Joonisel 8 *a* on näidatud metalliterakeste muutumiste skeem survel (terakesed on tähistatud enne ja pärast operatsiooni ühesuguste numbritega). Joonis 8 *b* kujutab tugevasti suurendatult ühe terakese deformatsiooni. Jooniselt on näha, et põhiliselt on see nihkedeformatsioon. Üksikute terade nihketasapinnad võivad mitte ühte langeda, mille tagajärjel tekib terakeste purunemine ja peenenemine. See muudab materjalide omadusi — kõvadus ja rabedus suurenevad, kuid plastilisus väheneb.

Termilise töötlemise teel võib anda materjalile ta esialgsed omadused. Kirjeldatud metallide omaduste muutumist nende külmtöötlemisel rõhumise teel, millega kaasneb kõvaduse ja rabeduse suurenemine, nimetatakse k a l e s t u s e k s.

Materjalil, mida kalestatakse, suurenevad elastsusomadused (tõuseb voolavuse piir ja kasvab rabedus). Seda võib kontrollida lihtsa katsega. Kui valgevasest plaadile, mille elastsus on tavaliselt võrdlemisi väike, koputada mitu korda väikese vasaraga (pinnida), siis muutub plaat vetruvaks, paneb vastu painutamisele, s. t. muutub elastsemaks.

Tagumine, stantsimine ja tõmbamine kutsuvad esile kalestuse metalli pinnal. Kääridega lõikamine, aukude sissepressimine ja löömine tekitavad kalestuse lõike või augu äärtel. Kuna kalestus suurendab metalli haprust, tuleb aukude ääred (näiteks neetimisel) lihvida, sest rabe metallikiht võib muidu praguneda.

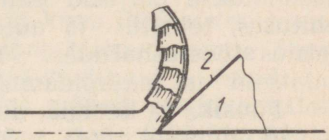
Muutliku suunaga (kord ühes, kord teises suunas) pingete mõjul metallide tugevus aja jooksul väheneb. Seda nähtust tuntakse «m e t a l l i d e v ä s i m u s e» nime all. See esineb kiirekäigulistes masinates, vagunitelgedes ja autovedrudes. Arvatakse,

et selle nähtuse põhjuseks on suurte kristallide kiirendatud kasv, mis viib nn. «väsimuspragude» tekkimisele. Pikkamööda need praod kasvavad ja tungivad sügavale detaili sisemusse. Selle tagajärjel väheneb detaili kasulik ristlõikepindala, jäädes lõpuks nii väikeseks, et detail murdub.

§ 2. Metallide lõiketöötlemine.

Vaatamata suurele metallikaole valmistatakse kõrge täpsusklassiga metalldetaile põhiliselt lõiketöötlemise — treimise, hööveldamise ja puurimise teel.

Joonisel 9 on toodud laastu moodustamise skeem. Lõiketera *1*, liikudes noolega näidatud suunas, muljub ja lõikab eesmise pinnaga *2* lahti osa metalli. Lahtilõigatud kihiga toimub keerukaid surve- ja paindedeformatsioone. Kui pinge lahtilõigatavas kihis ületab metalli tugevuse piiri, moodustub laast. Deformatsioon levib ka metalli sisemusse, mille tagajärjel töödeldav pind lõikamisel kalestub.



Joon. 9. Laastu moodustumine.

Lõikamisega kaasnev soojenemine muudab samuti laastu ja järelejäänud pinnakihi füüsikalis-mehhaanilisi omadusi. Seejuures on vaja uurida temperatuuri tõusu mõju: 1) töödeldavale materjalile ja 2) lõiketera materjalile.

Lõigatava kihi temperatuuri tõusmine suurendab selle plastilisust ja seega soodustab lõikamist.

Temperatuuri tõusmisel lõiketera kõvadus väheneb ja suurtel lõikekiirustel võib ta oma karastatuse kaotada. Mitmesuguste keemiliste elementide (volframi, kroomi jt.) lisamine muudab terase vastupidavaks temperatuuridele mitusada ja isegi tuhat kraadi.

Kaasaegses tehnikas kasutatakse terasest lõiketerade asemel edukalt keraamilisi lõiketeri, mis on valmistatud alumiiniumhapendist (lähteaine — boksiit). Meie treialid-novaatorid, kasutades niisuguseid lõiketeri, on juba töödelnud detaile kiirusega enam kui $3000\frac{m}{min}$ (varem oli see $20—60\frac{m}{min}$).

Plastilised deformatsioonid on seotud keha siseenergia potentsiaalse komponendi osalise muundumisega kineetiliseks, s. t. soojenemisega. Soojust tekib ka lõiketera hõõrdumisest vastu laastu ja toote pinda. Hõõrdumise vähendamiseks ja soojuse eemaldamiseks lõikamise piirkonnast kasutatakse mitmesuguseid määrivaid, jahutavaid vedelikke, näiteks seebilahust. Vedelik, tungides

töödeldava materjali pinnas olevatesse mikroskoopilistesse pragudesse, laiendab neid ja ühtlasi kobestab metalli pinnakihti ning kergendab seega lõikamist.

§ 3. Algteadmisi polümeeride füüsikalistest omadustest. Polümeeride kasutamine.

Oleme korduvalt märkinud, et aine olekute jaotamine tahkeks, vedelaks ja gaasiliseks on tinglik. Eksisteerib palju niisuguseid aineid, millede olek pole määratud. Näiteks, amorfsete kehade juures ilmnevad nii kõvadus kui ka voolavus. Niisuguste ainete hulka, millede olek on määramata, kuuluvad ka polümeerid.

Polümeerid jaotatakse kautšukiteks, kiudaineteks ja plastmassideks.

On olemas loomulikud (loodusliku päritoluga) polümeerid: valgud, tselluloos, tärklis, looduslik kautšuk ja kunstlikud polümeerid: kunstkiud, plastmassid, kunstlik kautšuk.

Ikka rohkem tungivad meie ellu sünteetilised ained. Nendega asendatakse paljusid ehitusmaterjale, neid kasutatakse masinaehituses, tekstiili- ja autotööstuses, elektrotehnikas ja paljudes teistes tööstusharudes. Sünteetilistest ainetest tehakse riideid, jalatseid ja majapidamisriistu.

Füüsika ja keemia, uurides ainete ehitust ja omadusi, võimaldavad inimesel toota väga erinevate omadustega materjale.

Polümeeride imekspandavad omadused on seletatavad nende ehitusega. Kõik nad koosnevad hulgast suurtest molekulidest, mis sisaldavad mitukümmend tuhat aatomit. Polümeeride molekulid on põhiliselt ehitatud süsiniku ja vesiniku aatomitest. Sageli kuulub nende hulka ka kloori, fluori, lämmastiku jt. aatomeid.

Hiiglaslikud polümeeride molekulid on ehitatud reast ühesuguse struktuuriga gruppidest, mida nimetatakse monomeerideks (kreeka keelest *monos* — üks; *poly* — palju). Nende gruppide ühinemisprotsessi nimetatakse polümerisatsiooniks.

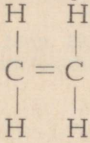
Polümeriseerimise omadus on peamiselt kahel keemilisel elemendil: süsinikul $-\overset{|}{\underset{|}{C}}-$ ja ränil $-\overset{|}{\underset{|}{Si}}-$. Nii süsiniku kui ka räni aatomid võivad omavahel ühinedes moodustada pikki ahelaid

$$-\overset{|}{\underset{|}{C}}-\overset{|}{\underset{|}{C}}-\overset{|}{\underset{|}{C}}-\overset{|}{\underset{|}{C}}-\ldots;-\overset{|}{\underset{|}{Si}}-\overset{|}{\underset{|}{Si}}-\overset{|}{\underset{|}{Si}}-\overset{|}{\underset{|}{Si}}-\ldots$$

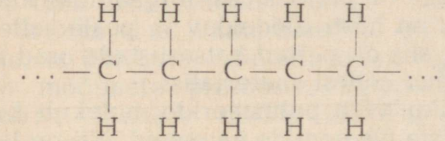
Vastavalt sellele eraldatakse kahte polümeeride gruppi: süsiniku baasil moodustuvad polümeerid ja räni baasil moodustuvad polümeerid.

Et paremini mõista polümeeride füüsikalisi omadusi, jätame vaatlemata üksikasjad, mis kuuluvad polümeeride keemiasse, ning peatume süsinikurea polümeeride ehitusel.

Tuntud keemiline ühend *etüleen* on süsinikurea polümeeride lähteühend. Ta on värvitu gaas, mille molekulid koosnevad kahest süsiniku ja neljast vesiniku aatomist:

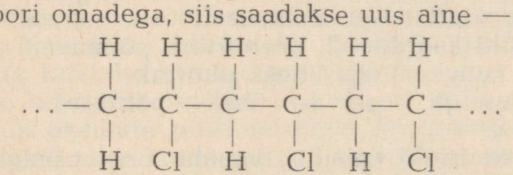


Purustades kahekordse sideme, õnnestub eriliste katalüsaatorite abil ühendada need molekulid pikka ahelasse, milles on mitu tuhat haru:



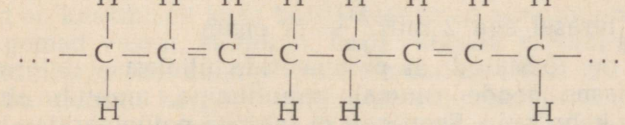
Saadud aine ei ole enam gaas, vaid kõva läbipaistev mass — *polüetüleen.* Polüetüleenist valmistatakse täispuhutavate õhupallide kestasid, pakiümbriseid, painduvaid voolikuid ja muud.

Kui vahetada polüetüleeni ahelas mõned vesiniku aatomid kloori omadega, siis saadakse uus aine — *polüvinüülkloriid:*



Polüvinüülkloriidist tehakse linoleumi, käekotte, veekindlaid vihmamantleid, veetorusid ja isegi kunstlikke veresooni.

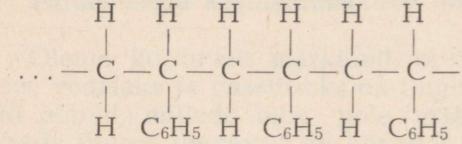
Kautšuki molekulile on iseloomulik veelgi keerulisem ahel:



Looduslik kautšuk tekib mõnede taimede mahlast. Selle avastasid eurooplased esmakordselt XVI sajandil Mehhikos, kust see levis ka Euroopasse. Kohalikud elanikud valmistasid kautšukist elastseid mängupalle ja veekindlaid jalatseid. Jalatsite valmistamisel nad lihtsalt määrisid jalad kleepuva mahlaga ja seejärel suitsutasid neid kannatlikult tulise leegi kohal. Seejuures mahl kõvastus. Tänapäeval on kautšuk üks hinnalisemaid tehnilisi materjale, milleta pole mõeldav autokummide valmistamine. Kautšukit valmistatakse tänapäeval ka kunstlikult. Lähteaineks on pii-

ritus, mida saadakse puidust ja isegi naftast. Esmakordselt esitas kunstliku kautšuki valmistamise viise vene teadlane S. V. Lebedev (1909. a.).

Mõnede vesiniku aatomite asendamine polüetüleenis aatomigruppidega C_6H_5 annab *polüstürooli:*



Polüstürool on väga hea elektriisolatsioonimaterjal ja seetõttu valmistatakse sellest mitmesuguseid elektro- ja raadiotehnikas kasutatavaid detaile.

Veel keerulisema ehitusega on *pleksiklaasi* (orgaanilise klaasi) molekulid. Kuna pleksiklaas on hästi töödeldav ja peale selle ka suurepärane elektriisolaator, siis on paljud katseriistade osad füüsika kabinetis valmistatud just sellest materjalist.

Peale süsiniku ja vesiniku võib polümeeride molekuli koosseisu kuuluda ka mõnede teiste elementide aatomeid. Nii on laialdaselt tuntud materjali — *kaproni* — molekulid ehitatud järgmistest rakukestest:

$$\ldots - NH - (CH_2)_5 - CO - \ldots$$

Pikad polümeeride molekulide ahelad ei asetse sirgelt, nagu see võib näida valemite vaatlemisel. Suhteliselt vaba soojusliikumise tagajärjel molekulid kaarduvad, keerduvad, põimuvad naabermolekulidega ja ka kaugematega üheks puntraks.

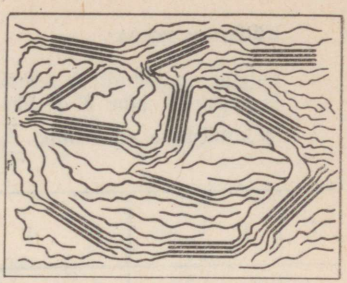
Polümeeride elastsuse ja tugevuse üheks põhjuseks ongi nende molekulide ehitus.

Kõigile on tuntud kautšuki omadus venida oma esialgsest pikkusest mitu korda pikemaks ja pärast välisjõu lakkamist võtta tagasi oma esialgne kuju. Jõud, mis on vaja kautšuki niisuguseks deformeerimiseks, on mitu korda väiksem iga teise materjali deformeerimiseks vajalikust jõust. Kautšuki elastsusmoodul on ligikaudu $10\frac{kG}{cm^2}$, terasel aga 2 milj. $\frac{kG}{cm^2}$ ja enam.

Katsetega on tõestatud, et polümeeride ülielastse deformatsiooniga ei kaasne nende ruumala muutumine, muutub ainult deformeeritava keha kuju. Seepärast ei seletata polümeeride elastsust molekulide «eemalenihkumisega», nagu see on tahkete kehade juures, vaid nende molekulide struktuuri iseärasustega.

Välisjõu toimel sirgenevad kägardunud ja sassiläinud molekulahelad ja võtavad orienteeritud asendi. Pärast välisjõu mõju lakkamist või soojenemisel saavad nad tagasi oma esialgse struktuuri. Näiteks kaotab pleksiklaasist vaas kuumas vees oma kuju ja muutub tasaseks kettaks, millest ta oli välja pressitud.

Looduslikud kiud on kokkukeerutatult ja palmitsetult (niidid, nöörid ja köied) palju tugevamad kui sirgeks venitatult. Sarnaselt



Joon. 10. Polümeeri niidikujuliste molekulide asetuse skeem.

nendega on ka nailoni, kaproni, viskoossiidi ja klaasi kiud erakordselt tugevad. Kapronniit läbimõõduga 1,5 mm kannatab inimese raskust, kuid atsetaatsiidist nööriga, mille läbimõõt on 2 cm, võib üles tõsta kaubavaguni.

Selleks et ei tekiks kunstkiu ehitusest vale ettekujutust, märgime, et üksikute «hiidmolekulide» pikkus jääb siiski mikromaailma mõõtmete piiridesse, moodustades vaid tuhandikke millimeetrist. Pikkade niitide saamist, mis kõlbaksid edaspidiseks põimimiseks, tuleb ette kujutada niisama, nagu lühikeste lambavillakiudude palmitsemist lõngaks.

Pikad ahelmolekulid võivad moodustada ka kolmemõõtmelise struktuuri, kui luuakse side («sillakesed») ahelmolekulide vahel. Siis ei saada enam kiude, vaid kelmeid ja tükke, milledele võib mitmesuguste töötlemisviisidega anda soovitava kuju.

Lineaarse molekulide ehitusega polümeersed ained võivad võtta kristalse struktuuri. Kuid erinevalt amorfsetest ainetest ei levi kristalliseerumine neis kogu ahela pikkuses, vaid piirdub ainult üksikute piirkondadega. Seejuures võib pikk, niidisarnane molekul mitu korda sattuda korrapärasesse (kristalsesse) osakeste asetusse (joon. 10). Ruumilise struktuuriga polümeerid ei moodusta kristalseid piirkondi seepärast, et üksikute ahelate vahelised seosed ei luba neil asetuda korrapäraselt.

Enamikul sünteetilistest materjalidest on väga väike erikaal. Nad on keskmiselt kaks korda kergemad alumiiniumist, 4—6 korda kergemad vasest, mõnel on isegi väiksem erikaal kui korgil. Õhu puhumisega läbi sula polümeermassi saadakse nn. *penoplast*, mis on haruldaselt kerge ja seejuures suurepärane soojusisolatsioonimaterjal. Seda kasutatakse muuseas ka majade ehitamisel Arktika ja Antarktika ekspeditsioonist osavõtjaile.

Lisades polümeeride põhimassile erilisi «lisandeid» võib saada täiesti ebatavaliste omadustega materjale, mis on nii tugevad ja kõvad, et ületavad selles suhtes isegi terase. Nad on korrosiooni- ja tulekindlad raskesti sulavad materjalid, mis ei pehastu ega allu kemikaalide toimele.

Aine struktuuri tundmine ja oskus seda kunstlikult muuta avab polümeeride füüsikale ja keemiale paljutõotavad arenguperspektiivid.

Küllastav veeaur.

Tabelis on antud: 1) temperatuur Celsiuse järgi (t); 2) küllastava auru rõhk jää peal 15° kuni 0° ja vee peal elavhõbedasamba mm-tes (p);

3) küllastava auru hulk $\frac{g}{m^3}$-tes (q).

t	p	q	t	p	q	t	p	q	t	p	q
—15	1,24	1,38	0	4,58	4,84	15	12,79	12,8	40	55,3	51,2
—14	1,36	1,51	1	4,93	5,22	16	13,68	13,6	50	92,5	83,0
—13	1,49	1,65	2	5,29	5,60	17	14,53	14,5	60	149,4	130
—12	1,63	1,80	3	5,69	5,98	18	15,48	15,4	70	233,7	198
—11	1,78	1,96	4	6,10	6,40	19	16,48	16,3	80	355,1	293
—10	1,95	2,14	5	6,54	6,84	20	17,54	17,3	90	525,8	424
— 9	2,13	2,33	6	7,01	7,03	21	18,65	18,3	100	760,0	598
— 8	2,32	2,54	7	7,51	7,8	22	19,83	19,4	110	1075	827
— 7	2,53	2,76	8	8,05	8,3	23	21,07	20,6	120	1489	1123
— 6	2,76	2,99	9	8,61	8,8	24	22,38	21,8	130	2026	1499
— 5	3,01	3,24	10	8,21	9,4	25	23,76	23,0	140	2711	1970
— 4	3,28	3,51	11	9,84	10,0	26	25,21	24,4	160	4636	3259
— 3	3,57	3,81	12	10,52	10,7	27	26,74	25,8	180	7521	5126
— 2	3,88	4,13	13	11,23	11,4	28	28,35	27,2	200	11 661	7763
— 1	4,22	4,47	14	11,99	12,1	29	30,04	28,7	300	87,6 $\frac{kg}{cm^2}$	—
— 0	4,58	4,84	15	12,79	12,8	30	31,82	30,3	360	190,3 „	—

Õhu relatiivse niiskuse (protsentides) psühhromeetriline tabel.

Kuiva termomeetri näidud	Kuiva ja niiske termomeetri näitude vahe										
	0°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
0	100	81	63	45	28	11	—	—	—	—	—
2	100	84	68	51	35	20	—	—	—	—	—
4	100	85	70	56	42	28	14	—	—	—	—
6	100	86	73	60	47	35	23	10	—	—	—
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	—	—
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4	—
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	—
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	50	45	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

4. 3. $1{,}85\frac{km}{h}$.

4-a. 3. 24 cm.

5. 7. 0,5 tundi pärast teise rongi väljumist.

7. 1. ≈ 25 tundi. 2. $25\frac{km}{h}$. 3. $15\frac{km}{h}$; $13\frac{km}{h}$.

11. 1. $\approx 2{,}6$ m; 1,5 m. 2. $400\frac{m}{s}$; 2 km.

12. 1. $\approx 9{,}3\frac{m}{s}$; $\approx 14\frac{m}{s}$; $\approx 17\frac{m}{s}$; $\approx 11{,}9\frac{m}{s}$. 2. $4\frac{m}{s}$; $12\frac{m}{s}$; $8\frac{m}{s}$.

15. 2. $1\frac{m}{s}$. 4. $60\frac{cm}{s}$; $\approx 26{,}7\frac{cm}{s^2}$.

16. 2. $0{,}8\frac{m}{s^2}$. 3. 10 sek.

18. 3. 72 cm. 4. 3 cm. 5. 108 m. 6. 160 sek; 640 m. 7. 330 m. 8. $12\frac{m}{s^2}$.

9. $500\,000\frac{m}{s^2}$; 0,0016 sek.

19. 1. 19,6 m. 2. $\approx 0{,}4$ sek. 3. ≈ 19 m. 4. 14,7 m. 5. $\approx 982\frac{cm}{s^2}$.

20. 1. $12\frac{m}{s}$; $0{,}6\frac{m}{s^2}$. 2. 135 m.

21. 5. 8 sek; 6. 7 sek.

24. 5. $\approx 0{,}36$.

26. 5. ≈ 370 kG. 6. 10 kG.

27. 3. ≈ 167 kG, ≈ 133 kG.

28. 2. 25 cm kaugusel paremast otsast.

29. 8. ≈ 21 cm kaugusel suurema kera keskpunktist. 10. Vaskplaadis $\approx 0{,}27$ riba pikkuse osa kaugusel ühendusjoonest. 11. Kaugusel $\frac{R}{6}$ ketta keskpunktist. 13. 84,15 G. 14. 10 kG. 15. ≈ 970 kG. 16. 10 kG.

30. 2. $14\frac{cm}{s^2}$; 7 m; $0{,}7\frac{m}{s}$; $140\frac{cm}{s}$.

32. 1. a, d, g — õiged. 4. 5000 dyn. 5. 25 g. 6. $19{,}6\frac{cm}{s^2}$. 7. 3000 dyn; 2000 dyn. 8. 90 cm. 9. 200 dyn. 10. 1 820 000 dyn. 11. 128 kG. 12. 50 kG. 13. 12 500 kG. 14. Ei kannata. 16. 14,4 kG; 13,6 kG; 21 kG; 7 kG; 0. 17. 1080 kG.

33. 3. Parem vankrike läbib 0,9 m. 5. a) $20\frac{cm}{s^2}$; b) 20 000 dyn; c) 20 000 dyn; d) vasakule 20 000 dyn, paremale 40 000 dyn. 6. Kiireneval liikumisel: vedurile liikumise suunas 2250 kG, vastu 1250 kG, 1. vagunile liikumise suunas 1000 kG, vastu 600 kG, 2. vagunile liikumise suunas 500 kG, vastu 100 kG. 1-ses haakekohas on pingutusjõud 1000 kG, 2-ses — 500 kG.
Ühtlasel liikumisel:
vedurile liikumise suunas ja liikumisele vastu 450 kG, 1. vagunile liikumise suunas ja liikumisele vastu 200 kG, 2. vagunile liikumise suunas ja liikumisele vastu 100 kG.
7. Esimesele koormale jõuga 120 000 dyn vertikaalselt üles ja jõuga 117 600 dyn alla, teisele koormale jõuga 120 000 dyn vertikaalselt üles ja 122 500 dyn alla. Pingutusjõud niidis on 120 000 dyn. 8. $\frac{1\ cm}{10^{22}\ s^2}$; 3125 aastat.

38. 3. 3300 kGm.

39. 3. ≈ 589 W. 7. ≈ 33 sek.

41. 1. a) 40 000 ergi; b) 40 000 ergi. 3. $375 \cdot 10^8$ ergi. 4. $\approx 37 \cdot 10^9$ ergi. 6. Ei. 7. $6 \cdot 10^8$ dyn. 9. Pärast 3 sek. möödumist $W_k = 5 \cdot 10^7$ ergi; $W_p = 75 \cdot 10^7$ ergi.

43. 1. $S = 120$ m; $V = 50 \frac{m}{s}$. 2. $S_1 \approx 7$ m; $V = 14 \frac{m}{s}$. 3. $\approx 5 \frac{m}{s}$.

4. $\approx 15 \frac{m}{s}$.

45. 3. Suurema massiga kera 4 cm kaugusel teljest ja väiksema massiga kera 8 cm kaugusel. 4. $V \approx 8{,}9 \frac{m}{s}$; $h = 20$ m.

46. 1. $V_{sek} = 0{,}084 \frac{cm}{s}$; $\omega_{sek} = 0{,}105 \frac{1}{s}$; $V_{min} = 0{,}036 \frac{cm}{s}$; $\omega_{min} \approx$

$\approx 0{,}0018 \frac{1}{s}$; $V_{tund} = 0{,}00021 \frac{cm}{s}$; $\omega_{tund} \approx 0{,}00015 \frac{1}{s}$. 2. $10 \frac{m}{s}$. 3. $\omega =$

$= 0{,}00007 \frac{1}{s}$; $V = 320 \frac{m}{s}$.

47. 1. 625 mm; 2. $z_2 = 80$; $n_2 = 50 \frac{pööret}{min}$; 3. 56,52 hj; 4. 176,4 kG.

49. 2. 70 G; 3. 50 Hz; 4. 4 Hz.

50. 1. $\approx 24{,}8$ cm; 2. $\approx 986 \frac{cm}{s^2}$; 3. ≈ 4 cm; 9 cm.

51. 3. 10 cm; 4. 42°50′.

59. 2. 65°; 3. 0,6 l; 4. 25 l; 5. $2 \frac{cal}{cm^2 \text{ min}}$.

60. 1. 8500 cal; 2. 8°; 3. 16,8°; 6. 0,12; 7. 0,09; 8. 650°; 9. 439 kcal.

61. 1. 0,015 kGm; 3. 2 989 000 kGm; 4. $\approx 4{,}7$ kcal; 5. $\approx 0{,}47$ kcal; 6. $\approx 0{,}45$ kg; 7. 165,5 t; 8. 21 cal; 9. 6775 kg.

62. 1. 0,012 m; 3. 0,0000036.

63. 1. 2 l; 2. 200 l; 3. 2,5 at; 4. 2 at; 5. $\approx 1{,}5$.

64. 3. $20 \frac{kG}{cm^2}$; 4. $p = 258$ G; $D = 0{,}01032 \frac{g}{cm^3}$; 5. $0{,}00258 \frac{g}{cm^3}$.

65. 1. 6,82 l; 2. ≈ 649 cm³; 3. 273° C; 4. $\approx 109{,}1$ l.

66. 2. ≈ 777 mm Hg.

68. 2. 5,09 l; 3. $\approx 0{,}51$ at; 4. 2,08 l; 5. 605° K; 6. $D_t = D_0 \frac{p}{p_0(1 + \gamma t)}$.

69. 1. 30,3 cm; 2. $73{,}6 \frac{dyn}{cm}$.

70. 1. 8,7 mm, $11{,}5 \frac{kG}{mm^2}$; 2. 0,032 kGm.

71. 2. $\approx 8800 \frac{kG}{cm^2}$; 3. 62,8 kG; 4. ≈ 4, $\approx 1{,}7$.

72. 3. 800 kcal; 2. 12 600 kcal; 3. 3640 kcal; 4. 196 kcal; 5. $79{,}9 \frac{kcal}{kg}$;

6. 232 kcal.

73. 1. 639 kcal; 2. 61 900 cal; 4. $537 \frac{cal}{g}$; 5. 719 kcal; 6. 3720 kcal; 7. $\approx 14{,}7$ kg.

74. 1. 93,5%; 65%; 45,9%; 2. $\approx 8°$ C; 3. $\approx 75\%$; 4. Väheneb kuni 43,4%; 5. $\approx 0{,}4$ m³.

75. 1. 2385 kGm; 2. 2637 kGm; 3. ≈ 2000 hj; 4. 19,6 hj; 5. 102 hj; 6. 125,6 hj.

SISUKORD.

Sissejuhatus 3
1. Mateeria ja liikumine 3
2. Teadus ja selle tähtsus 4

I osa. MEHHAANIKA.

I peatükk. Ühtlane sirgjooneline liikumine.

3. Mehhaaniline liikumine 7
4. Liikumise ja paigaloleku suhtelisus 8
5. Kõva keha ja punkti liikumine 10
6. Mitmesugused keha liikumiste liigid 12
7. Liikumise kiirus. Kiiruse ühikud 13
8. Kiiruse graafiline kujutamine 15
9. Ühtlase liikumise võrrand 16
10. Ühtlase liikumise tee graafik 17
11. Ühtlase liikumise kiiruse graafik 20
12. Liikumiste liitmine 22
13. Kiirus kui vektor 24
14. Lõikuvate suundadega ühtlaste sirgjooneliste liikumiste liitmine . . 25
15. Kiiruste liitmine 26
16. Kiiruste lahutamine komponentideks 27

II peatükk. Ühtlaselt muutuv sirgjooneline liikumine.

17. Mitteühtlase liikumise keskmine kiirus 29
18. Hetkeline kiirus 30
19. Kiirendus 31
20. Kiirenduse ühikud 33
21. Ühtlaselt kiirenev liikumine 33
22. Ühtlaselt kiireneva liikumise kiirus 35
23. Ühtlaselt kiireneva liikumise kiiruse graafik 37
24. Ühtlaselt kiireneva liikumise tee valemi tuletamine graafilisel meetodil 39
24 *a*. Ühtlaselt kiireneva liikumise keskmine kiirus 40
24 *b*. Ühtlaselt kiireneva liikumise valemid 41
25. Ühtlaselt kiireneval liikumisel üksteisele järgnevatel võrdsetel ajavahemikkudel läbitud teed 41
26. Kehade vaba langemine 44
27. Ühtlaselt aeglustuv liikumine 47
28. Vertikaalselt üles visatud keha liikumine 49

III peatükk. Inerts. Jõud. Jõudude liitmine ja lahutamine.

29. Dünaamika ülesanne 51
30. Newtoni esimene seadus (inertsiseadus) 51
31. Jõud 54
32. Jõud ja kehade deformatsioonid 55
33. Jõudude tasakaal. Jõudude mõõtmine 56

34. Elastsusjõud 60
35. Libisemise hõõre 60
36. Paigaloleku hõõre 62
37. Veeremise hõõre 63
38. Hõõrde tähtsus looduses ja tehnikas 64
39. Jõud kui vektor 66
40. Jõudude liitmine. Resultantjõud 67
41. Jõu lahutamine kaheks komponendiks, mis mõjuvad teineteise suhtes nurgi 70
42 *a*. Kaldpinnal asuva keha tasakaalu tingimused 72
42 *b*. Kaldpinna alusega paralleelselt mõjuv jõud 74
42 *c*. Kiil 75
42 *d*. Kruvi 76
43. Pöörlemistelge omavate kehade tasakaalu tingimused 77
44. Paralleelsete jõudude liitmine 80
44 *a*. Jõu lahutamine kaheks paralleelseks komponendiks 81
45. Raskuskese 82
46. Tasakaalu liigid 83
47. Püsivus 84

IV peatükk. Jõud, mass ja kiirendus.

48. Mass 88
49. Newtoni teine seadus 89
50. Mass — keha inertsi mõõt 92
51. Mehhaaniliste ühikute süsteem 93
52. Ülesannete lahendamise näiteid Newtoni teise seaduse kohta . . . 96

V peatükk. Kehade vastastikune mõju.

53. Newtoni kolmas seadus 100
53 *a*. Veojõud 102
54. Liikumishulk. Liikumishulga säilivuse seadus 106
55. Tagasilöök laskmisel. Reaktiivmootorid 109
56. Ülemaailmne gravitatsiooniseadus 111
57. Kehade mass ja kaal 113
58. Erikaal ja tihedus 115
59. Maa massi ja tiheduse määramine 117

VI peatükk. Mehhaaniline energia.

60. Sissejuhatus 119
61. Töö 119
62. Töö ühikud 121
63. Võimsus 122
64. Võimsuse ühikud 123
65. Tööde võrdsuse seadus 125
66. Tööde võrdsuse seaduse rakendamine kaldpinna juures 126
67. Tööde võrdsuse seaduse rakendamine kruvi juures. Tungraud . . . 127
68. Kruvipress 128
69. Hüdrauliline press 129
70. Lihtmasinate kasutegur 130
71. Energia 130
72. Potentsiaalne energia 131
73. Kineetiline energia 132
74. Langeva keha kogu energia 135
75. Hõõrdejõudude ja keskkonna takistuse ületamise töö 136

76. Kehade põrge 137
77. Mehhaanilise energia muundumine teisteks energia liikideks . . . 140
78. Igavese jõumasina võimatus 141

VII peatükk. Kehade kõverjooneline liikumine. Pöörlev liikumine.

79. Keha liikumine jõu toimel, mis on suunatud kiiruse suhtes nurga all 144
80. Liikumiste sõltumatus. Horisontaalselt visatud keha liikumine . . . 146
81. Kaldu horisondiga visatud keha liikumine 149
82. Ühtlane ringliikumine. Nurkkiirus, pöörlemise periood 151
83. Joonkiirus. Nurkkiiruse ja joonkiiruse vaheline seos 153
84. Kesktõmbekiirendus 153
85. Kesktõmbejõud 155
86. Näiteid kesktõmbejõu toimest 157
87. Newtoni III seadus ühtlase ringjoonelise liikumise juures 162
88. Tsentrifugaalmehhanismid 163
89. Kõva keha pöörlev liikumine 164
90. Tahhomeeter 166
91. Telje ümber pöörlevale tahkele kehale mõjuvad jõud 167
92. Pöörlemise ülekanne jõumasinalt masin-tööriistale 168
93. Rihmülekanne 168
94. Friktsioonülekanne 170
95. Hammasülekanne 171

VIII peatükk. Võnkumised ja lained.

96. Perioodiline liikumine 175
97. Harmooniline võnkumine 175
98. Võnkesagedus ja võnkeamplituud. Võnkeperiood 177
99. Raskusjõu mõjul toimuvad võnkumised 178
100. Matemaatilise pendli võnkumise seadused 180
101. Võnkuva liikumise graafiline üleskirjutus 182
102. Võnkefaas. Faasinihe 183
103. Energia muundumine pendli võnkumisel 185
104. Summutatud võnkumised 186
105. Pendli kasutamine kellades 187
105 *a*. Harmooniliste võnkumiste liitmine 188
106. Sunnitud võnkumised 190
107. Resonants 191
108. Resonantsi tähtsus tehnikas 193
109. Laineline liikumine. Ristlainete tekkimine 193
110. Pikilained 196
111. Lainepikkus ja laine levimiskiirus 198

IX peatükk. Hääl.

112. Hääl 200
113. Häälevõnkumiste lihtsam liik 201
114. Häälte liigitus 202
115. Hääle levimine 202
116. Hääle levimiskiirus 204
117. Muusikalised helid. Tooni kõrgus 205
118. Hääle intensiivsus ja valjus 206
119. Tämber 208
120. Häälelainete peegeldumine 209
121. Seisvad lained 210
122. Seisvate häälelainete vaatlus 211
123. Hääle resonants ja resonaatorid 212
124. Kõrva füüsika 214
125. Heliülesvõte ja reprodutseerimine 215

X peatükk. Vedeliku ja gaasi liikumine.

126. Rõhk. Rõhumine 217
127. Vedeliku liikumine 218
128. Vedeliku statsionaarne voolamine 219
129. Rõhk liikuvas vedelikus ja gaasis 220
130. Vedelikujoa imev toime ja selle praktiline kasutamine 223
131. Vedelikkude ja gaaside sisehõõre 225
132. Keha liikumise takistus vedelikus ja gaasis 226
133. Kehade voolujoonelisus 227
134. Aerodünaamiline üleslüke 229
135. Voolava vee energia kasutamine 231
136. Hüdraulilised jõumasinad 233
137. Tuulejõumasinad 236

II osa. MOLEKULAARFÜÜSIKA JA SOOJUS.

XI peatükk. Aine ehituse molekulaar-kineetilise teooria alused.

138. Molekulaar-kineetilise teooria arenemine 238
139. Browni liikumine 239
140. Difusioon 241
141. Maa atmosfäärist 242
142. Molekulaar-kineetilise teooriaga seletatavad katsed 243
143. Molekulide arv aine ruumalaühikus. Molekulide suurus 244
144. Molekulide liikumise kiirus 245
145. Kokkupõrgete arv ja molekuli vaba tee keskmine pikkus 246
146. Molekulidevaheline vastastikune mõju 247
147. Soojusliikumine. Temperatuur 249

XII peatükk. Soojus ja töö.

148. Molekulide liikumise ja omavahelise mõju energia. Kehade siseenergia 251
149. Keha siseenergia muutumine 251
150. Soojushulga ühik 252
151. Keha soojusmahtuvuse mõiste. Aine erisoojus 253
152. Erisoojuse mõõtmine 254
153. Vaadete arenemine soojuse olemusest 256
154. Soojuse mehhaaniline ekvivalent 257
155. Energia jäävuse ja muundumise seadus 260

XIII peatükk. Tahkete ja vedelate kehade soojuspaisumine.

156. Keha ruumala sõltuvus temperatuurist 263
157. Tahkete kehade joonpaisumine 263
158. Tahkete kehade ruumpaisumine 264
159. Soojuspaisumise arvestamine tehnikas 265
159 a. Termoregulaator 266
160. Vedelikkude soojuspaisumine 267

XIV peatükk. Gaaside omadused.

161. Gaaside rõhumine 269
162. Gaasi ruumala ja rõhu vaheline sõltuvus. Boyle-Mariotte'i seadus . 269
163. Gaasi tiheduse sõltuvus rõhust 272
164. Gaasi ruumala sõltuvus temperatuurist. Gay-Lussac'i seadus . . . 273
165. Gaasi rõhu sõltuvus temperatuurist. Charles'i seadus 275
166. Temperatuuri absoluutne skaala 278
167. Gaasi ruumala, rõhu ja temperatuuri vaheline sõltuvus. Gaasi oleku ühendatud seadus 279

168. Absoluutse nulli mõise füüsikaline sisu 281
169. Gaasi temperatuuri muutumine kiirel paisumisel ja kokkusurumisel . 281
170. Kokkusurutud gaasid. Kompressor 282

XV peatükk. Vedelike omadusi.

171. Molekulaarne liikumine vedelikes 286
172. Pindpinevus 287
173. Pindpinevuskoefitsient 288
174. Märgamine 290
175. Kapillaarsus 292

XVI peatükk. Tahkete kehade omadused.

176. Kristallilised ja amorfsed kehad 295
177. Ruumvõred 297
178. Tahke keha deformatsioon 298
179. Elastsus ja plastilisus 299
180. Deformatsioonide liigid 300
180 *a*. Kõvadus 302
180 *b*. Hooke'i seadus 305
181. Tugevus. Tugevuse varu 307
181 *a*. Metallide omaduste tähtsus nende töötlemisel ja kasutamisel . . . 308

XVII peatükk. Aine agregaatoleku muutumine.

182. Kehade sulamine 310
183. Sulamissoojus 311
184. Keha ruumala muutumine sulamisel ja tahkestumisel 313
185. Metallivalu 313
186. Sulamid ja nende kasutamine tehnikas 316
187. Aurumine 317
188. Jahtumine aurumisel 317
189. Küllastav aur 318
190. Küllastava auru rõhumine 319
191. Küllastava auru, rõhu ja tiheduse sõltumatus ruumalast 320
192. Mitteküllastav aur 320
193. Keemine 322
194. Aurumissoojus 324
195. Õhu niiskus 326
196. Õhu niiskuse määramise viisid 327
197. Juushügromeeter 327
198. Augusti psühhromeeter 327
199. Kriitiline temperatuur 329
200. Gaaside veeldamine 331
201. Veeldatud gaaside omadused 333

XVIII peatükk. Soojusjõumasinad.

202. Töö gaasi paisumisel 334
203. Soojusjõumasin. Soojusjõumasina töötamise vajalikud tingimused . . 334
204. Soojusjõumasinate kasutegur 336
205. Aurumasin 337
206. Aurukatlad 340
207. Auruturbiinid 342
208. Sisepõlemismootor 345
209. Sisepõlemismootor-diisel 349
210. Reaktiivmootorid 352
211. Reaktiivmootorite põhilised liigid 353

Lisa.

I. Ultraheli ja selle kasutamine.

§ 1. Ultraheli generaatorid ja vastuvõtjad 357
§ 2. Ultraheli kasutamine 358

II. Täiendav õppematerjal teemale «Ülemaailmne gravitatsioon».

§ 1. Raskusjõu muutumine sõltuvalt koha geograafilisest laiusest ja kõrgusest Maa pinnalt 360
§ 2. Gravitatsioonivälj 362
§ 3. Maa kunstlikud kaaslased 364
§ 4. Kaaluta olek 366
§ 5. Ülekoormused 368

III. Täiendav materjal teemale «Tahkete kehade omadused».

§ 1. Metallide omaduste ja struktuuri muutmine nende mehhaanilisel ja termilisel töötlemisel 369
§ 2. Metallide lõiketöötlemine 371
§ 3. Algteadmisi polümeeride füüsikalistest omadustest. Polümeeride kasutamine 372

Александр Васильевич Пёрышкин. Вильгельм Вильгельмович Крауклис. КУРС ФИЗИКИ. Учебник для средней школы (часть I). Издание десятое. На эстонском языке. Издательство «Валгус». Таллин, Пярнуское шоссе, 10. Toimetaja E. Randma. Kunstiline toimetaja H. Keigo. Tehniline toimetaja M. Tammes. Korrektorid A. Toomaspoeg ja H. Kessel. Laduda antud 30. XI 1966. Trükkida antud 24. I 1967. Paber 60×90, 1/16. Trükipaber nr. 2 — Kohila Paberivabrik. Trükipoognaid 24. Arvestuspoognaid 25,24. Trükiarv 9000. Tellimise nr. 7833. Trükikoda «Kommunist», Tallinn, Pikk tn. 2. Hind 40 kop.

Trükivigu

Lk.	Rida	On trükitud	Peab olema
277	3. ülalt	$p_t = p(1 + \gamma t)$	$p_t = p_0(1 + \gamma t)$
289	1. alt	$= \sigma \frac{P}{2\pi r}$	$\sigma = \frac{P}{2\pi r}$
352	tabelis 2. veerg 1. rida	Surveaste (a	Surveaste (at)
354	16. alt	Kütesegu	Küttesegu

lk. 178 Jooniste allkirjad on vahetatud.

40 kop.

ARH
A
73429

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00419599 8