I. SOKOLOV

FÜÜSIKA

9.

KLASSILE

RK „PEDAGOOGILINE KIRJANDUS“

TARTU ÜLIKOOLI
RAAMATUKOGU

A - 17355

PROF. I. SOKOLOV

FÜÜSIKA KURSUS

VÕNKUMISED JA LAINED. SOOJUS

ÕPIK KESKKOOLI IX KLASSILE

RK

„PEDAGOOGILINE KIRJANDUS"
TALLINN 1949

I. Võnkumised ja lained.

1. **Harmooniline võnkumine.** Teiste liikumisliikide kõrval esineb sagedasti võnkliikumine.

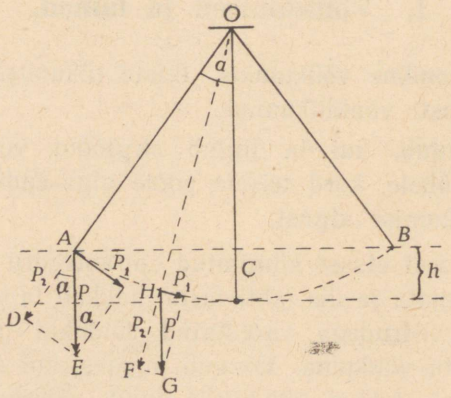
Keha võngub, kui ta liigub sirgjoont või kõverjoont mööda kord ühele, kord teisele poole algasendist, milles ta oli enne võnkumise algust.

Kui ülemisest otsast kinnitatud spiraalvedru alumist otsa pidi alla tõmmata ja siis lahti lasta, hakkab ta võnkuvalt liikuma. Kõik vedrudega varustatud sõidukid hakkavad tee konaruste tõttu võnkuma. Võngub puuoks, kui sellelt lendab ära lind. Tuule toimel võnguvad puud, vabrikute korstnad, järvede ja merede veed. Võnkuvas olekus on kõik helisevad kehad. Võngub ka töötava aurumasina kolb. Kuigi toodud näidetega pole haaratud kõik võimalikud võnkumise liigid, tõestavad nad ometi seda, kuivõrd levinud on selline liikumise liik looduses ja tehnikas.

Suurusi, mis iseloomustavad seda liikumist, võib kõige lihtsamalt tundma õppida matemaatilise pendli võnkumise näitel.

Matemaatiliseks pendliks nimetatakse mitteveniva niidi otsa riputatud keha, mis evib lõplikku massi, kuid mille mõõteid võime tähele panemata jätta (niinimetatud „masspunkt"). Küllaldase täpsusega matemaatiliseks pendliks on pika peenikese niidi otsa riputatud väike kerake.

Seni kui pendel ja tema kinnitamispunkt asuvad ühel vertikaalil, on pendel tasakaalus. Kui pendel on viidud välja tasakaalu-asendist mööda kaart CA punkti A, mis asub endise nivoo suhtes kõrgusel h (joon. 1), siis ta evib selles punktis potentsiaalse energia juurdekasvu $Ph = mgh$, kus m on pendli mass. Selles punktis ei ole pendli kaal P enam



Joon. 1. Matemaatiline pendel.

tasakaalustatud toetuspunkti vastumõjuga; viimane tasakaalustab ainult ühte, niidi sihis suunatud kaalu komponenti P_2. Teine komponent P_1, mis on suunatud puutujatpidi tasakaalu-asendi poole, kujuneb liikumapanevaks jõuks ja paneb pendli liikuma, niipea kui see on jäetud omapead.

Kui pendli kõrvalekaldumise nurk AOC tähistada α-ga (radiaanides [1]), siis $\angle DAE = \angle AEH = \alpha$ ja liikumapanev jõud $P_1 = P \sin \alpha = mg \sin \alpha$.

---

[1] Radiaan — kesknurk, millele vastav kaar on võrdne raadiusega.

Mehaanika teise seaduse järgi väljendub iga jõud massi ja kiirenduse korrutise kaudu. P_1 avaldises on mass tähistatud tähega m, järelikult suurus $g_1 = g \sin \alpha$ väljendab pendli võnkuva liikumise kiirendust. Kuna väikeste nurkade puhul võib ilma suurema veata $\sin \alpha$ asendada α-ga, α aga radiaanides on võrdne kaare pikkusega $CA = x$ jagatud raadiusega l, siis $\alpha = -\frac{x}{l}$.

Kui pendel kaldub tasakaalu-asendist paremale, siis kiirenduse vektor on suunatud vasakule; kui aga pendel kaldub vasakule, siis on kiirenduse vektor suunatud paremale. Võnkuva liikumise juures on punkti nihkumine tasakaalu-asendist ja kiirendus alati vastupidiselt suunatud; sellepärast on neil vastupidised märgid. Arvestades märke, tuleb eelmised võrdused kirjutada nii:

$$P_1 = mg_1, \text{ kus } g = -\frac{g}{l}x. \qquad (I)$$

Pendli võnkumisel küllalt väikeste hälvetega on kiirendus võrdeline kaugusega tasakaalu-asendist ja sellega vastassuunaline.

Tee ulatuses A-st kuni C-ni kiirendus pidevalt kahaneb, kuid on seejuures alati samasuunaline kiirusega, mille tõttu kiirus kasvab, ja tasakaalu-asendis C, kus kiirendus on muutunud nulliks, saavutab kiirus suurima väärtuse, mida võib arvutada energia jäävuse seaduse võrrandi $\frac{mv^2}{2} = mgh$ järgi. Tee ulatuses C-st kuni B-ni kiirenduse absoluutväärtus suureneb, olles kogu aja suunatud puutujatpidi tasakaalu-asendi suunas, s. o. vastupidiselt kiirusele; liikumine kujuneb aeglustuvaks ja kiirus muutub nulliks, kui pendli kogu kineetiline energia on muundunud tõusu potentsiaalseks energiaks kõrgusele h_1. Kui puuduvad energiakaod mingite takistuste ületamiseks, siis $mgh_1 = \frac{mv^2}{2}$. Kahe viimase valemi võrdlemisest järgneb, et tõusu kõrgus vasakul on võrdne tõusu kõrgu-

sega paremal ($h_1 = h$) ja järelikult $BC = CA$. Alates punktist B korduvad kõik nähtused uuesti samas järjekorras.

Liikumist, kus kiirendus on võrdeline masspunkti kõrvalekaldumisega tasakaalu-asendist ja on alati suunatud tasakaalu-asendi poole, nimetatakse lihtsaks harmooniliseks võnkumiseks.

Lihtsaks harmooniliseks võnkumiseks on näiteks matemaatilise pendli liikumine ainult raskusjõu mõjul, kui puuduvad takistavad jõud ja kui hälbe nurk on väga väike.

2. Võnkumist määravad suurused. Suurimat kõrvalekaldumist tasakaalu-asendist AC (joon. 1) nimetatakse võnke-amplituudiks. Aega, mille jooksul pendel käib mööda kaart AB edasi-tagasi ehk teiste sõnadega — aega, mis kulub nelja amplituudiga võrdse tee läbimiseks, nimetatakse täisvõnke perioodiks (T). Täisvõnke poolt perioodi nimetatakse poolvõnke perioodiks ($T_1 = \frac{1}{2}T$).

Võnkumist võib määrata perioodi T asemel täisvõngete arvuga sekundis $\nu = \frac{1}{T}$; $T = \frac{1}{\nu}$.

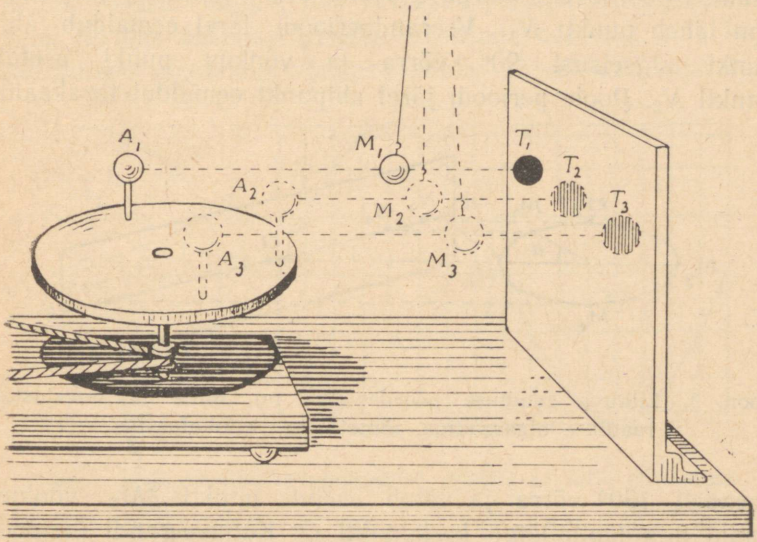
Tõepoolest, kui näiteks täisvõngete arvuks ühes sekundis on 10, siis täisvõnke perioodiks on $\frac{1}{10}$. Kui periood on $\frac{1}{2}$ sekundit, siis toimub sekundis kaks võnget.

Nagu nähtub eelnevast, on takistusjõudude puudumisel amplituudid mõlemal pool tasakaalu-asendit võrdsed. Jääva amplituudiga võnkumist nimetatakse summutamatuks; pidevalt väheneva amplituudiga võnkumist nimetatakse summutatuks.

3. Võnkliikumise seos ringliikumisega. Kui tsentrifugaalmasinale asetada ketas, selle servale vertikaalne pulgake, mille otsas on kuulike, ja valgustada kogu seadist horisontaalsete ja paralleelsete kiirte kimbuga, siis kiirte teele vertikaalselt asetatud ekraanile tekib kuulikese vari. Kui kuu-

like panna ühtlaselt ringlema, siis hakkab vari liikuma sirgjoont mööda edasi-tagasi (joon. 2).

Sama ekraani ette asetatakse väga pikk pendel nii, et selle vari langeks samale joonele, kus liigub ringleva kuulikese vari. Pendel pannakse võnkuma ekraaniga paralleelses



Joon. 2. A_1, A_2, A_3 — ühtlaselt ringleva kuulikese asendid; M_1, M_2, M_3 — võnkuva pendli asendid; T_1, T_2 T_3 — kuulikese ja pendli kokkulangevad varjud.

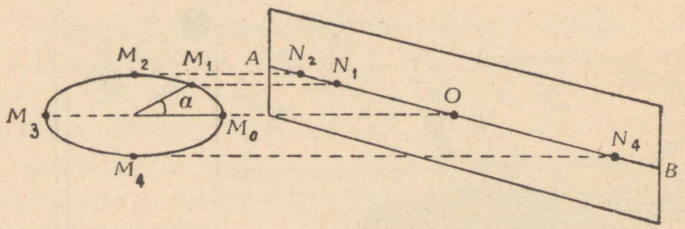
tasapinnas. Siis osutub võimalikuks valida kuulikese ringlemisele selline kiirus, et kuulikese varju liikumine ekraanil igas punktis ühtib võnkuva pendli varjuga.

Kirjeldatud ühtimist võib saavutada ainult pendli väikeste võnkeamplituudide puhul.

See ühtimine näitab, et punkti võnkliikumist piki sirget AB (joon. 3) võib vaadelda kui ühtlaselt ringleva punkti M projektsiooni liikumist sellel sirgel. Nimetame ühtlaselt ring-

levat punkti abipunktiks ja lõiku, mis ühendab abipunkti ringjoone tsentriga, liikuvaks raadiuseks.

Kui abipunkt võtab ringjoonel algseisu M_0, siis tema projektsioon langeb selle lõigu keskpunkti O, mida mööda toimub võnkumine. Kui abipunkt asetub punkti M_1 ja liikuv raadius pöörab end nurga α võrra, siis punkti M_1 projektsioon läheb punkti N_1. Veerandperioodi järel eemaldub abipunkt algseisust 90^0 võrra ja võnkuv punkt asetub punkti N_2. Poole perioodi järel abipunkt eemaldub tasakaalu-



Joon. 3. Liikuva raadiuse pöördenurka (α), mille ta moodustab raadiuse algasendiga, nimetatakse võnkefaasiks.

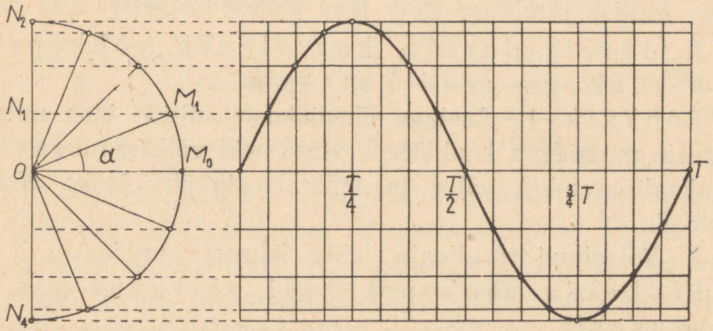
asendist 180^0 võrra ja võtab asendi punktis M_3, võnkuv punkt aga läbib lõigu keskpunkti O. Kolmveerandi perioodi järel ehk 270^0-se eemaldumise puhul võtab abipunkt asendi M_4, võnkuv punkt aga asendi N_4; ühe perioodi tagant on mõlemad punktid algasendis.

Liikuva raadiuse pöördenurka, mille ta moodustab raadiuse algasendiga, nimetatakse võnkefaasiks.

Järelikult on joonisel 3 algmomendil punktis O faas võrdne nulliga; punktis N_2 on faas $\frac{\pi}{2}$ (90^0), tagasitulekul punkti O, kui liikumine toimub punktist N_2 punkti N_4 suunas, on faas π (180^0), punktis N_4 on ta võrdne $\frac{3}{2}\pi$ (270^0) ja lõpuks punktis O saab ta võrdseks 2π-ga. Punktist O kuni

punktini N_2 faas muutub 0-st $\frac{\pi}{2}$-ni; punktist N_2 kuni N_4 — muutub $\frac{\pi}{2}$-st $\frac{3}{2}\pi$-ni, punktist N_4 kuni O — muutub $\frac{3}{2}\pi$-st 2π-ni jne.

4. Harmoonilise võnkumise graafik. Kui abstsisseljele kanda võrdsed lõigud, mis vastavad perioodi võrdsetele osadele, ja igas abstsissi punktis püstitada ordinaat, mis kujutab mingis mastaabis võnkuva punkti kõrvalekaldumist tasa-



Joon. 4. Harmoonilise võnkumise graafik ja selle ehitamine.

kaalu-asendist, siis kõikide ordinaatide otspunktid asetsevad joonel, mida nimetatakse sinusoidiks (joon. 4). Sinusoid kujutab enesest graafikut, mis näitab võnkuva punkti kauguse muutumist tasakaalu-asendist, sõltuvalt ajast.

5. *Laboratoorne töö 1.* Pendli võnkumiste seaduste uurimine. Töövahendid: 1) alus, sellesse löödud kahe naelaga; 2) mitmesuguste massidega rauast, puust jt. kerakesed diameetri sihis läbipuuritud aukudega; 3) niit; 4) puust kiilukesed niidi kinnitamiseks kerakeste auku; 5) ajanäitaja (kell); 6) mõõdupuu.

I. Järele uurida, kas sõltub võnkeperiood võnkeamplituudist.

Töökäik. 1. Siduge niidi üks ots aluse ühe naela külge ja visake niit üle naabernaela; kinnitage niidi otsa kiilukese abil kuulike [1].

2. Viige kuulike mingi nurga (väikese, kuni 10°) võrra tasakaalu-asendist välja ja laske ta lahti; mõõtke kella järgi (sekundites) 100 poolvõnget ja arvutage võnkeperiood.

3. Viige kuulike uue, väiksema nurga võrra, tasakaalu-asendist välja, määrake uuesti periood ja võrrelge mõlemaid arve. Millise järelduse saab teha sellest katsest?

II. Järele uurida, kas oleneb võnkeperiood võnkuva pendli massist.

Töökäik 1. Asetage ühepikkuste niitide otsa mitmesuguste massidega kuulikesed, viige neid väikese nurga võrra tasakaalu-asendist välja ja määrake igaühe jaoks võnkeperiood.

2. Võrrelnud resultaate, tehke katsest järeldus.

III. Leida võnkeperioodi sõltuvus pendli pikkusest.

Töökäik. 1. Võtke pendlid pikkustega l (näiteks 1 m) ja l_1 (näiteks $\frac{1}{4}$ m või $\frac{1}{9}$ m, või $\frac{1}{2}$ m) ja määrake nende võnkeperioodid t ja t_1.

2. Võrrelge $\frac{l}{l_1}$ ja $\frac{t^2}{t_1^2}$. Missuguse järelduse võime teha sellest võrdlemisest?

6. Pendli võnkumise seadused. Katsetest võib teha järgmised järeldused:

1. Võnkeperiood ei sõltu väikeste amplituudide puhul amplituudist (seda omadust nimetatakse isokroonsuseks — võnkumise võrdaegsuseks).

2. Võnkeperiood ei sõltu pendli massist.

---

[1] Kuulikese diameeter peab olema palju kordi väiksem niidi pikkusest.

3. Võnkeperiood on võrdeline ruutjuurega pendli pikkusest.

4. Võnkeperiood on pöördvõrdeline ruutjuurega raskuskiirendusest. [1]

Järelikult on neli korda pikemal pendlil periood kaks korda suurem, üheksa kõrda lühemal pendlil on periood kolm korda väiksem jne.

Teooria annab poolvõnkeperioodi ja täisvõnkeperioodi jaoks järgmised valemid:

$$T_1 = \pi\sqrt{\frac{l}{g}} \qquad T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \qquad \text{(II)}$$

Pendli isokroonsuse avastas G a l i l e i 1583. a.

7. Füüsiline pendel. Füüsiliseks pendliks nimetatakse iga keha, mis võngub ümber horisontaalse telje. Telg ei või läbida keha raskuspunkti. Selle pendli üksikuid osakesi, mis asetsevad teljest mitmesugustel kaugustel, võib vaadelda kui mitmesuguste pikkustega matemaatilisi pendleid (joon 5). Teljele ligematel osakestel peaks olema lühem periood, kuna kaugematel osakestel peaks periood olema pikem. Kuna füüsiline pendel võngub tervikuna, siis tema periood peab asuma üksikute punktide väikseima ja suurima perioodi vahel. Iga füüsilise pendli jaoks võib alati leida sellise matemaatilise pendli, millega esimesel on võrdne periood.

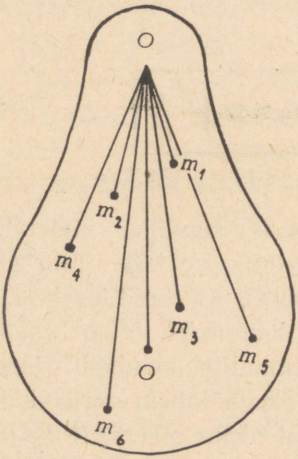
Matemaatilise pendli pikkust, millel on füüsilise pendliga sama suur periood, nimetatakse füüsilise pendli redutseeritud ehk taandatud pikkuseks.

Matemaatilise pendli võnkeperioodi valemid on rakendatavad ka füüsilise pendli jaoks, kui neisse asetada füüsilise pendli redutseeritud pikkus. Harilikult antakse pendlile varva kuju, mille otsa on riputatud massiivne lääts.

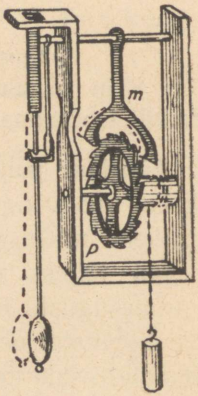
---

[1] Viimane järeldus saadakse teoreetiliselt.

8. Pendli rakendamine kellade juures. Pendlit rakendatakse kellade juures käigu regulaatorina. Osuteid liikumapanevad teljed pannakse pöörlema kas ülestõstetud pommi või üleskeeratud vedru abil. Pomm langeb ja vedru keerab end lahti ebaühtlaselt; osuti liikumine aga peab ära märkima võrdseid ajavahemikke. Kella käigu reguleerimiseks kasutatakse pendli võnkumise isokroonsust. [1]



Joon. 5.



Joon. 5-a. Kella käigu reguleerimine pendli abil.

Eriline ankur, mis on ühendatud pendliga, laseb viimase võnkumisel kella hammasrattal läbi ühe hamba korraga, millega kindlustataksegi kella ühtlane käik. Hammasratta pöördumisel saab ankur hammasrattalt väikesi tõukeid, mis hoiavadki pendli võnkumised summutamatuna.

Kella pendli ehitus on kujutatud joonisel 5-a.

---

[1] Pendlit rakendas kellade juures esimesena hollandi füüsik Huygens 1658. a.

9. Pendli rakendamine raskuskiirenduse mõõtmiseks. Poolvõnkeperioodi valemist võime leida:

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

Et arvutada raskuskiirendust Maa mingi koha jaoks, tuleb: 1) mõõta pendli redutseeritud pikkus; 2) mõõta mõne saja või tuhande võnke aeg; nende andmete järgi arvutada pendli võnkeperiood; 3) asetada l ja T väärtused valemisse ja arvutada g.

Harjutus 1.

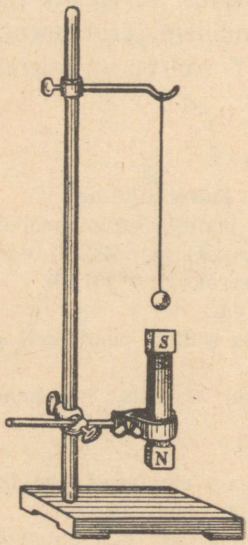
1. Miks tehakse pendli massiivne osa läätsekujuline?
2. Leida sekundpendli (s. o. niisuguse pendli, mille poolvõnke periood on 1 sek.) redutseeritud pikkus poolusel ($g = 983{,}24$), ekvaatoril ($g = 978{,}05$), Pariisis ($g = 980{,}94$) ja Moskvas ($g = 981{,}56$).

   Vastus: Moskva jaoks $l = 99{,}55$ cm.
3. Kuidas hakkab käima Moskva jaoks seatud pendelkell poolusel ja ekvaatoril?
4. Määrata pendlite poolvõnkeperioodid Pariisis, kui pendlite pikkused on 76 m ja 300 m.

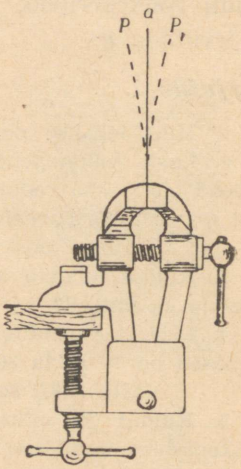
   Vastus: 8,8 sek.; 17 sek.
5. Kuidas ja miks muutub niidi otsa riputatud raudkuuli võnkeperiood, kui selle alla asetada magnet (joon. 6)?
6. Kuidas muutub pendli võnkumine, kui teda viia õhust vette või püdelasse õlisse?
7. Kuidas muutub pendli võnkeperiood, kui tema pikkust kahekordistada, kolmekordistada?
8. Kuhu peab nihutama pendli läätse, kui kell jääb taha?
9. Kuidas muutub kella käik (joon. 5-a) kuumade suvepäevade tulekuga, võrreldes külmade talvepäevadega?

10. Elastsete kehade võnkumine. Kehade võnkumine toimub nii raskusjõu kui ka elastsusjõu toimel. Kui tõmmata kõrvale kruustangide vahele pigistatud terasplaadikese ots (joon. 7), siis hakkab plaadike harmooniliselt võnkuma. Keha väljaviimisel tasakaaluasendist toimub kuju muutus; kuju muutumisel tekib nõndanimetatud e l a s t s u s j õ u d, mis välise jõu mõju lakkamisel taastab keha endise kuju. Elast-

susjõud ja sellest tekitatud kiirendused on võrdelised tasakaalu-asendist kõrvalekaldumise suurusega [1] ja on alati suunatud tasakaalu-asendi poole. Kui keha on jõudnud tagasi tasakaalu-asendisse, on elastsusjõud muutunud nulliks, kuid elastsusjõu poolt tekitatud kiirendus on jõudnud sel momen-



Joon. 6. Ülesande nr. 5 juurde.



Joon. 7. Elastse plaadikese võnkumine.

dil maksimaalse väärtuseni; saadud kineetilise energia arvel keha osakesed läbivad tasakaalu-asendi ja kalduvad vastaspoolele samasugusele kaugusele, kui ei ole takistavaid jõude. Niiviisi tekib plaadiosakeste harmooniline võnkumine risti plaadi pikkusega.

Kui keha kuju muutmise asemel muuta tema ruumala, surudes näiteks kokku õhusamba või ülesriputatud spiraal-

[1] Kui jõud ei ületa elastsuspiiri (vt. § 94).

vedru tema telje sihis, siis tekivad kehas elastsusjõud, mis taastavad endise ruumala, kui lakkavad tegutsemast välised jõud. Tekkinud elastsusjõud on jällegi võrdelised tasakaaluasendist kõrvalekaldumise suurusega. Omaette jäetud kehaosad ei tule kohe tasakaalu-asendisse tagasi, vaid hakkavad keha pikkuse sihis harmooniliselt võnkuma.

Seega tekivad harmoonilised võnkumised elastses kehas kuju ja ruumala muutmisest.

11. Võnkumise levimine elastses kehas. Elastse keha mingis kohas tekitatud võnkumine ei piirdu selle kohaga, vaid levib üle kogu keha.



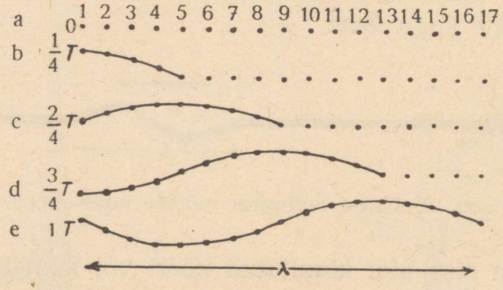
Joon. 8. Laine levimine mööda kummitoru.

Kui ühte otsa pidi kinnitatud nööri või kummitoru hoida teist otsa pidi horisontaalselt käes ja teha käega järsk löök, siis tekib selles otsas mõhk, mille järel tekib nõgu; need mõlemad moodustised — mõhk ja nõgu — läbivad kogu nööri kuni lõpuni (joon. 8). Võnkumise levimist kehas nimetatakse l a i n e l i s e k s l i i k u m i s e k s. Meie näites mõhk ja naabruses olev nõgu moodustavad laine.

Võnkumise lainelise levimise näiteks elastses kehas võivad olla lained veepinnal, kuigi need lained pole tekkinud vee elastsusest, vaid teistel põhjustel.[1] Vaikse tiigi veepinnale visatud kivi moodustab enda all pinnakihis nõo; mõne aja pärast nõgu asendub mõhaga. Samal ajal võime tähel-

[1] Lained, mis on tekkinud veepinnal kivi viskamisest vette, hoitakse ülal raskusjõu poolt, tuule puhul tekivad lained õhu ja vee vahelisest hõõrdumisest.

dada, et liikumine ei piirdu kivi kukkumise kohaga: keskse mõha ümber tekib rõngakujuline nõgu. Sama ajavahemiku järel tekib tsentris uuesti nõgu, esimese rõngakujulise nõo asemele tekib mõhk, edasi jällegi rõngakujuline nõgu jne. Üle kogu tiigi levivad kivi kukkumise kohast rõngaslained. Nagu ujuvate lehtede järgi võib näha, ei nihku vedeliku osakesed ringi raadiust mööda laine levimise suunas; levib ainult liikumise vorm, võnkumine, ilma et aine ise edasi liiguks.



Joon. 9. Ristvõnkumise levimine.

12. Ristvõnkumine. Et saada paremat kujutlust laine tekkimise viisist elastses kehas, eraldame mõttes horisontaalsel varval mõned tema osakesed ühesugusel kaugusel üksteisest (joon. 9). Mõjugu esimese osa peale vertikaalselt üles momentaanne jõud ja viigu ta see osa välja tasakaalu-asendist. Selle momentaanse jõu toimel liigub esimene osake üles; kuid niipea kui ta on välja viidud tasakaalu-asendist, hakkavad tema peale mõjuma elastsusjõud, mis on välja kutsutud naaberosakeste kohesioonist ja on suunatud tasakaalu-asendi poole. Sellest jõust tingitud kiirendus on suunatud vastupidiselt esialgsele kiirusele ja mõne aja pärast kiirus muutub nulliks. Kuid esimene osake peale tasakaalu-asendist väljaminemist tõmbab endaga kaasa teise osakese,

teine jälle kolmanda jne. Oletame, et veerandi perioodi pärast, esimese osakese peatumise ajaks, jõudis liikuma hakata neli osakest, mis on kaldunud tasakaalu-asendist mitmesugustele kaugustele (joon. 9 *b*).

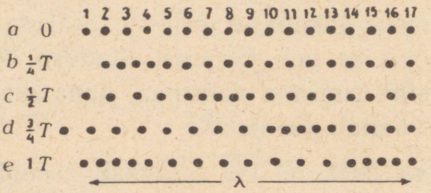
Pärast seda, kui esimese osakese kiirus on muutunud nulliks, hakkab see liikuma elastsusjõu toimel järjest suureneva kiirusega tasakaalu-asendi poole ja jõuab sinna jällegi veerandi perioodi pärast. Selle aja jooksul teine, kolmas ja neljas osake pole mitte ainult eemaldunud suurimale kaugusele, vaid hakkavad tagasi tulema tasakaalu-asendisse, kogu aja hilinedes omas liikumises eelmise osakese suhtes. Naaberosakeste mõjul ka neli järgmist liiguvad üles, misjuures viies jõuab läbida suurima vahemaa, kuna ülejäänud asetuvad nii, nagu näitab joonis 9 *c*.

Kuid esimene osake ei jää tasakaalu-asendisse, vaid jätkab kogunenud kineetilise energia arvel oma liikumist vastaspoolele ja läbib $\frac{1}{4}T$ jooksul samasuguse vahemaa alla, nagu ta eemaldus maksimaalselt üles. Selle ajaga tuleb viies osake tasakaalu-asendisse tagasi, üheksas saavutab maksimaalse eemaldumise üles ja ainult kolmeteistkümnes on veel paigal (joon. 9 *d*). Veel veerand perioodi — ja esimene osake läbib tasakaalu-asendi altpoolt ja kõik osakesed võtavad niisuguse asendi, nagu näidatud joon. 9 *e*. Siis hakkavad võnkuma järgnevad osakesed ja esimesed jätkavad oma võnkumist järkjärgulise sumbumisega. Mõhad ja nõod vahelduvad piki elastset keha paremale poole.

Järkjärguline mõhkade ja nõgude levimine piki varba osutub laineliseks liikumiseks. Ka siin võnguvad varva osakesed tasakaalu-asendi ümber, ilma et liiguksid piki varba; mööda varba toimub ainult liikumise vormi edasiandmine, mitte aga osakeste eneste liikumine. *Võnkumisi, milledes osakeste liikumised on risti laine levimissuunaga, nimetatakse ristvõnkumisteks.* Ristvõnkumistega lained ehk rist-

lained tekivad sel juhul, kui kehas ilmneb *elastsus kuju muutumisel.* Kuna oma kuju evib ainult tahke keha ja ainult tema juures tuleb ette elastsus kuju muutumisel, siis *elastsed ristvõnkumised* võivad esineda ainult elastsetes tahketes kehades.

Ristvõnkumised võivad esineda samuti vedeliku, näiteks vee pinnal. Kuid seal kutsub neid välja mitte elastsusjõud, vaid osakeste raskusjõud ja vedeliku vaba pinna püüe säilitada horisontaalset asendit.



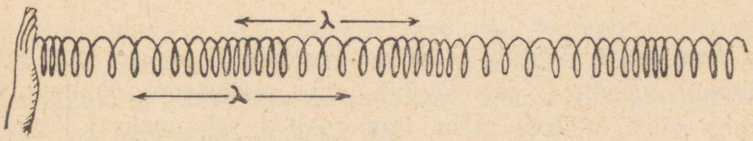
Joon. 10. Pikivõnkumise levimine.

13. Pikivõnkumine. Kui eraldada horisontaalsel varval mõned üksteisest võrdsetel kaugustel olevad osad ja mõjuda varvale momentaanse jõuga varva pikkuse sihis, näiteks paremale, siis esimene osake läheb tasakaalu-asendist välja ja tõmbab endaga kaasa naaberosakesed (joon. 10); ruumala muutusest tingitud elastsusjõud vähendab esialgset esimese osakese kiirust kuni nullini, andes talle kiirenduse, mis on suunatud tasakaalu-asendi poole. Needsamad elastsusjõud panevad osakese kiirenevalt liikuma tasakaalu-asendi poole; kogudes tasakaalu-asendisse jõudmisel kineetilist energiat, osakene läheb sellest asendist läbi vastaspoolele, eemaldub samale kaugusele ja hakkab jälle elastsusjõu toimel liikuma tasakaalu-asendi poole. Järgnevad osakesed kordavad kirjeldatud liikumist teatud hilinemisega. Veerandperioodi järel üksteisele järgnevad punktide asendid on kujutatud joonisel 10.

Joonis 11 näitab elastses vedrus tekkinud tihendusi ja hõrendusi, joonis 12 annab aga üksikute osakeste asetuse skeemi.

Tihenduste ja hõrenduste levimine piki varba on samuti lainelineliikumine. Ka siin liigub piki keha ainult elastne deformatsioon, laine, mitte aga aineosakesed. Osakesed võnguvad tasakaalu-asendi ümber, nihkudes ühele ja teisele poole laine liikumise suunas.

Võnkumisi, milledes osakeste nihkumised toimuvad laine liikumise suunas, nimetatakse pikivõnkumiseks. Piki-



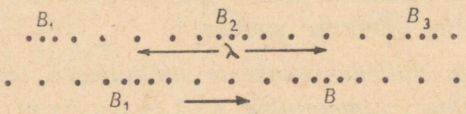
Joon. 11. Pikilaine levimine spiraalvedrus.

võnkumisega lained ehk pikilained tekivad kehades, milles avaldub elastsus ruumala muutmisel. Järelikult võivad pikilained tekkida tahketes, vedelates ja gaasilistes kehades.

14. Laine pikkus. Kahe naabermõha (harja) kaugust ristlaines või kahe naabertihenduse kaugust pikilaines nimetatakse lainepikkuseks ja tähistatakse kreeka tähega λ (lambda). On silmanähtav, et kahe naabernõo (oru) või kahe naaberhõrenduse kaugus teineteisest on samuti võrdne laine pikkusega (joon. 8, 11, 12).

Teiste sõnadega, laine pikkuseks on kahe lähima punkti (võetud laine levimise suunas) vaheline kaugus, millised üheaegselt läbivad tasakaalu-asendi ja liiguvad ühele poole (näiteks punktid 1 ja 17 joonisel 9); on ilmne, et need punktid on kogu aja ühtedel ja samadel ajamomentidel tasakaalu-asendi suhtes ühesuguses asendis.

Nende punktide kohta, mis on tasakaalu-asendi suhtes ühesuguses asendis ja liiguvad ühele poole, öeldakse, et nad on *ühesuguses faasis*; nende punktide kohta, mis asetsevad tasakaalu-asendi suhtes sümmeetriliselt ja liiguvad vastassuunaliselt, öeldakse, et nad on *vastupidistes faasides* ehk evivad 180°-st faaside vahet.



Joon. 12. Tihenduste ja hõrenduste skeem pikilaines.

Jooniselt 9 nähtub, et võnke perioodi T jooksul on laine läbinud vahemaa, mis võrdub laine pikkusega. Võnkumise mingi faasi, näiteks mõha tipu poolt 1 sek. jooksul läbitud tee mõõdab *laine levimiskiirust*. Kui laine levimiskiirus on võrdne v-ga, siis vahemaa, millele levib võnkumine ühe perioodi jooksul, on vT ja moodustab lainepikkuse λ.

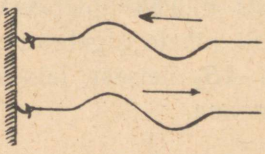
Kui tähistada võnkumiste arvu 1 sekundis ν-ga, siis kõik nimetatud suurused on omavahel järgmiselt seotud:

$$\boxed{\nu = \frac{1}{T};\quad T = \frac{1}{\nu};\quad \lambda = vT;\quad v = \lambda\nu.} \qquad \text{(III)}$$

15. Lainete peegeldumine ja murdumine. Kui pingutada horisontaalset kummitoru (-paela) või nööri ja teha järsk löök käega, siis, nagu oli kirjeldatud §-s 11, liigub piki nööri üksik ristlaine. Vaatlus näitab, et laine, olles jõudnud nööri teise, kinnitatud otsa, tuleb sama teed tagasi (peegeldub).

Laine peegeldumisel võib esineda kaks juhtu: teine keskkond, mille pinnal toimub peegeldumine, võib olla sellest keskkonnast, milles liikus laine enne peegeldumist suurema või väiksema tihedusega.

Kinnitame kummitoru seina külge ja saadame seda mööda üksiku laine mõhaga ees (joon. 13). Katse näitab, et ta peegeldudes tuleb tagasi, nõgu ees. Kui aga siduda kummitoru kerge nööri külge ja jällegi saata laine mõhaga ees, siis peegeldunud kiir tuleb tagasi samuti mõhaga ees (joon. 14).



Joon. 13. Peegeldumine poollaine kaotusega.

Esimest juhtu nimetatakse peegeldumiseks poollaine kaotusega, teist — peegeldumiseks poollaine kaotuseta.

Peegeldumist võib näidata veepinnal levivate lainetega. Kui tekitada veepinnal laine ja asetada laine teele vertikaalne tasapinnaline tõke, siis peegelduvad sellest pinnalained nii, nagu on kujutatud joonisel 15.



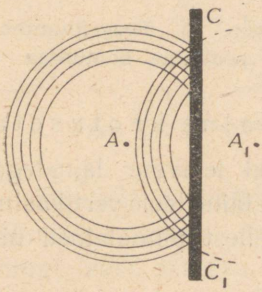
Joon. 14. Peegeldumine poollaine kaotuseta.

Laine murdumine toimub laine üleminekul ühest keskkonnast teise, kus laine levimiskiirus osutub teistsuguseks.

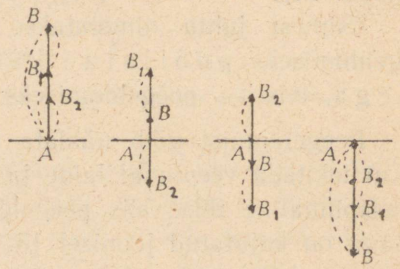
Laine murdumine seisab järgmises: kui laine läheneb kaldu kahte keskkonda lahutavale piirile (kummaski keskkonnas on oma laine levimiskiirus), siis ta ületades piiri muudab oma levimissuunda.

16. Lainete interferents. Kui keha mingi punktini tulevad üheaegselt kaks lainet ja panevad selle võnkuma, siis selle punkti nihked, mis on tekitatud mõlema laine poolt, peavad igal ajamomendil liituma vektorite liitmise reegli järgi.

Sellise liitmise lihtsaimaks liigiks on juhtum, kus mõlemad lained panevad punkti võnkuma ühte sirgjoont mööda. Siis nihked liidetakse algebraliselt. Joonisel 16 on toodud neli nihete algebralise liitmise juhtu: AB_1 esimesest lainest ja AB_2 teisest lainest; AB on mõlema nihke algebraline summa.



Joon. 15. Veepinda mööda levivate lainete peegeldumine: A — lainete allikas; CC_1 — tõke, millelt toimub peegeldumine; A_1 — peegeldunud ringlainete tsenter (A ebakujutis).

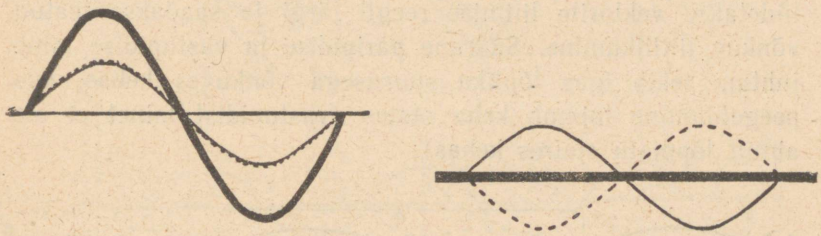


Joon. 16 Nihete algebralise liitmise neli juhtu.

Kui lainetel on ühesugused perioodid ja amplituudid, siis rakendades eespool nimetatud võtet leiame, et ühesuguste faaside korral nihked liitvõnkumisel kahekordistuvad ja tulemuseks on võnkumine kahekordse amplituudiga (joon. 17); vastupidiste faaside korral nihked vastastikku hävivad ja võnkumist üldse ei teki (joon. 18).

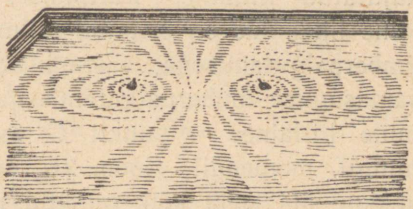
Kahe lainete süsteemi liitumise resultaati, mis ilmneb kõvendatud ja nõrgendatud võnkumiste piirkondade kujunemises, nimetatakse lainete interferentsiks. Oluliseks selle juures on see, et need piirkonnad säilitavad oma

asukoha ruumis. See on ainult sel juhul nii, kui võnkumiste liitmise tingimused igas ruumi punktis jäävad aja jooksul muutumatuks, ehk teiste sõnadega, lained peavad tulema



Joon. 17—18. Võrdsete sagedustega ja amplituudidega võnkumiste liitmine; võnkumiste resultant on kujutatud rasvase joonega. Joonisel 17 on mõlema võnkumise faasid võrdsed; joonisel 18 on faasid vastupidised.

igasse antud ruumi punkti jääva faaside vahega. Pole raske kujutella, et sellist tingimust täidavad ainult võrdsete perioodidega lained. Vastasel korral tekib paratamatult võnkumiste amplituudide maksimumide ja miinimumide piirkondade jagunemise ebapüsiv pilt ja interferentsi ei täheldata.



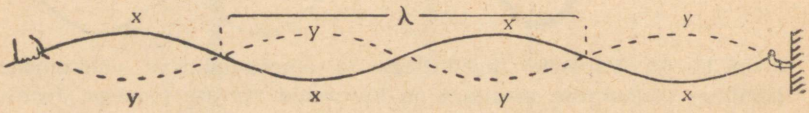
Joon. 19. Lainete interferents vee pinnal.

Interferentsi võib täheldada vee pinnal, kui sellel tekitada kaks lainete süsteemi. Heledad ribad kahe võnkuva ujuki vahel joonisel 19 näitavad interferentsiribasid, s. o. neid punkte, kuhu lained tulid vastupidiste faasidega, mille tagajärjel kadus võnkumine nendes punktides.

17. Seisev laine. Kui nööri mööda saata käe liigutamisega rida laineid, siis samasugune lainete rida tuleb teisest

otsast tagasi (joon. 20); niiviisi läheb nööri mööda üheaegselt kaks võrdsete perioodidega ja amplituudidega lainelist liikumist vastupidistes suundades.

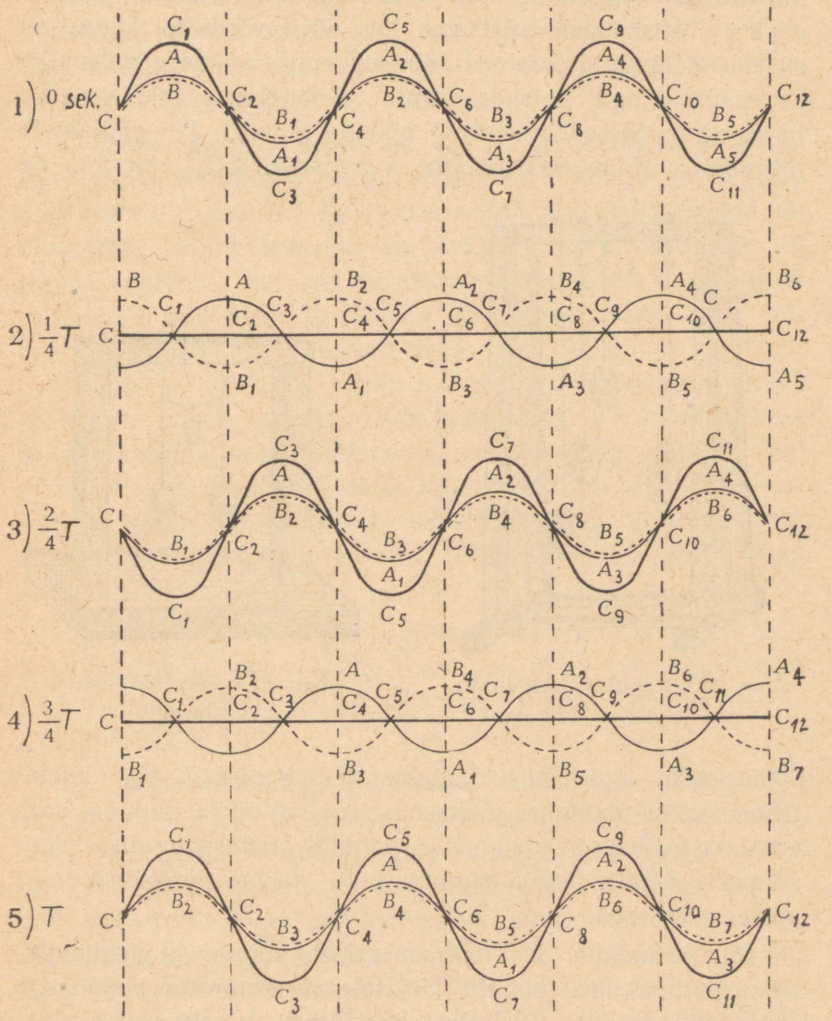
Iga nööri punkti poolt mõlemas võnkumises läbitud teed liidetakse vektorite liitmise reegli järgi ja saadakse teatud võnkuv liitliikumine. Säärane päripidise ja vastupidise laine juhtum tekib igas lõpliku suurusega võnkuvas kehas, kus peegeldumine toimub keha otstes (vastupidist lainet ei ole ainult lõpmatu suures kehas).



Joon. 20. Kummitoru abil tekitatud seisev laine.

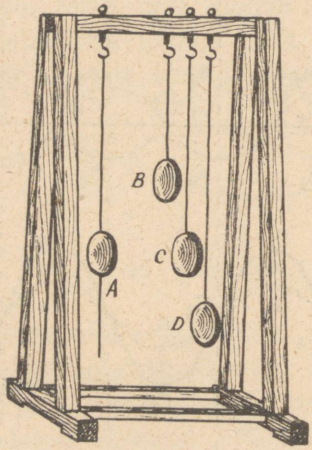
Kahe vastassuunaliselt liikuva laine liitmine (edasimineva ja tagasipeegelduva) rea üksteisele järgnevate momentide jaoks on näidatud joonisel 21, kus jämeda joonega on kujutatud liitlaine. Päripidise, vasakult paremale mineva laine liikumine on esitatud mitmesuguste indeksitega tähe *A* ümberpaigutamisega; vastupidise laine liikumine — tähe *B* samasuguse ümberpaigutamisega paremalt vasakule; võnkumine liitlaines — punkti *C* asenditega. Kui kujutella, et mingil momendil (joon. 21, seis 1) sinusoidid langevad kokku, siis keha kõik punktid nihkuvad kahekordselt. Niisama liidetakse nihked poole perioodi tagant (seis 3 ja 5). Veerandi ja kolmveerandi perioodi tagant (seis 2 ja 4) on kõikide punktide kõrvalekaldumised mõlemas võnkumises võrdsed ja vastassuunalised ning hävivad vastastikku; nendel momentidel on kogu nöör tasakaalu-asendis.

Kui võrrelda kõiki viit seisu, siis võib näha, et kõik *C* paarispunktid jäävad perioodi jooksul tasakaalu-asendisse; neid nimetatakse s õ l m e d e k s. Kõik *C* paaritud punktid

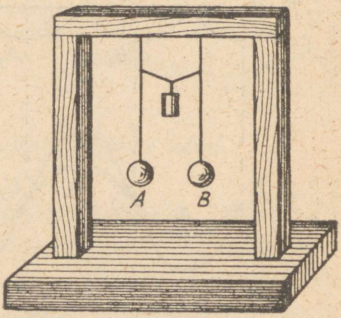


Joon. 21. Seisvate lainete tekkimine päripidise ja vastupidise laine liitmise teel.

läbivad suurimad amplituudid ja neid nimetatakse paisudeks. Võnkumiste süsteemi, kus ühed võrdsetel kaugustel asetsevad punktid ilmuvad sõlmede kujul, sõlmede vahemiku keskpunktid aga paisude kujul, nimetatakse seisvaks laineks. Seisev laine võib tekkida nii rist- kui pikilainete liitmisest. Kahe naabersõlme vahemaad CC_2, ehk mis on



Joon. 22. Pendlite resonants.



Joon. 23. Pendlite seotud võnkumised.

sama, kahe naaberpaisu kaugust teineteisest C_1C_3, nimetatakse seisva poollaine pikkuseks. Igal ajamomendil on kahe seisva naaberpoollaine punktid vastassuunalises võnkumises. Seisva poollaine pikkus on võrdne päripidise laine poole pikkusega (joon. 20).

18. Resonants. Kui horisontaalsele niidile või püstkandurile riputada mitu pendlit võrdsete ja erinevate pikkustega (joon. 22) ja üks võrdsetest pendlitest A panna võnkuma, siis võib täheldada, et temaga pikkuselt võrdne pendel C hakkab samuti võnkuma; erinevate pikkustega pendlid B ja D hakkavad ainult vaevalt märgatavalt võnkuma.

Esimese pendli amplituud väheneb miinimumini, kuna samal ajal teise samapikkuse pendli amplituud saavutab suurima väärtuse. Sellele järgneb vastupidine muutumine. Nähtust seletatakse järgmiselt.

Esimene pendel, võnkudes teatud perioodiga, kõigutab ka niiti või kandurit; pendli võnkumine kandub edasi igale ülesriputatud pendlile. Kui teise pendli omavõnkeperiood on ühesugune esimese pendli perioodiga, siis tema amplituud järjest suureneb; kui aga periood on erinev, siis võnkumised sumbuvad selle tõttu et tõuked, mis teine pendel saab esimeselt, ei lange alati suunalt ühte pendli liikumise suunaga.

Niiviisi antakse ühe pendli energiavaru teisele ja see tuleb sealt jälle tagasi (paratamatute kadudega). Üleminek toimub seda kiiremini, mida parem on pendlitevaheline side. Kui püstkandurile riputatud kaks ühepikkust pendlit ühendada niidiga (joon. 23) ja asetada sellele ühendusniidile koormus, siis energia edasiandmise kiirus ühelt pendlilt teisele kasvab koormuse kasvamisega.

Võnkumiste tekitamist ühes kehas võnkumistega teises kehas, millel on esimese kehaga samasuur võnkeperiood, nimetatakse resonantsiks.

19. Resonantsinähtus ja tehnika. Paljudes tööpinkides ja masinates jõud tegutsevad perioodiliselt. Sellise nähtusega on tegemist aurumasinates ja stantsimismasinates, mis annavad lööke võrdsete ajavahemikkude järel. Need perioodiliselt korduvad löögid antakse edasi masina teistele osadele, tööpinkide alustele ja hoonele. Kui jõu mõjumise sagedus saab lähedaseks või täpselt võrdseks tööpingi või hoone võimaliku võnkumise sagedusega, siis tekib resonantsinähtus. Võnkumiste amplituudid võivad saada nii suureks, et võib murduda võll, lahti põruda masina või tööpingi alus ning võivad vappuda seinad.

Tehnikas kasutatakse erilisi abinõusid resonantsi tõttu seadmetes tekkinud elastsete võnkumiste vastu võitlemisel. Võnkumiste vähendamise eesmärgil kasutatakse masinate juures võnkumise energiat neelavat viltalust. Ehitusasjanduses on samasugune ülesanne betooni asetamisel kahe tala vahele. Sõjaväe osad ei tohi taktsammul minna üle silla, muidu võib perioodilistest tõugetest tekkida nii suur kõikumine, et sild langeb kokku.

Paljudel teistel juhtudel on resonantsil positiivne tähendus ning ta leiab kasutamist teaduses ja tehnikas (näiteks raadiotehnikas).

KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Mida nimetatakse matemaatiliseks pendliks?
2. Kuidas sõltub pendli kiirendus kõrvalekaldumise nurgast?
3. Missuguses tee punktis on pendlil suurim kiirus? Millega on võrdne selles punktis kiirendus?
4. Missugustes tee punktides on pendlil suurim kiirendus ja missugune on nendes punktides kiirus?
5. Mida nimetatakse harmooniliseks võnkumiseks?
6. Mis on võnkumise amplituud ja periood?
7. Mida nimetatakse summutamatuks ja mida summutatud võnkumiseks?
8. Kuidas on omavahel seotud võnkeperiood ja võngete arv sekundis?
9. Missugune on kujult ja missugust nime kannab harmooniliselt võnkuva punkti tasakaalu-asendist kõrvalekaldumise graafik?
10. Missugused on matemaatilise pendli võnkumise seadused?
11. Mida nimetatakse füüsiliseks pendliks?
12. Mida nimetatakse füüsilise pendli redutseeritud pikkuseks?
13. Missugusel omadusel põhjeneb pendli rakendamine kella juures ja mis on seal tema ülesanne?
14. Kuidas võib pendlit kasutada raskuskiirenduse määramiseks?
15. Missuguse jõu toimel, peale raskusjõu, võivad veel tekkida harmoonilised võnkumised?
16. Mida nimetatakse laineks?

17. Mida nimetatakse ristvõnkumiseks? Missugune on punkti liikumise graafik ühe perioodi jooksul?

18. Mida nimetatakse pikivõnkumiseks? Missugune on punkti liikumise graafik ühe perioodi jooksul?

19. Missugustes kehades on ristvõnkumised võimalikud ja missugustes pikivõnkumised?

20. Mida nimetatakse laine pikkuseks?

21. Missugune seos on lainepikkuse, kiiruse, perioodi ja võnkearvu vahel 1 sekundis?

22. Missugused kaks võimalust on laine peegeldumise juures?

23. Mida nimetatakse lainete interferentsiks?

24. Mis saadakse, kui liita kaks ühesuguste perioodidega, suundadega ja faasidega võnkumist?

25. Mis saadakse kahe ühesuguste suundade ja perioodidega kuid vastupidiste faasidega võnkumise liitmisel, kui:

a) amplituudid on võrdsed,

b) amplituudid ei ole võrdsed.

26. Mida nimetatakse seisvaks laineks ja mille tõttu ta tekib?

27. Mida nimetatakse seisva laine sõlmeks ja mida paisuks?

28. Kuidas nimetatakse kahe naabersõlme või naaberpaisu kaugust teineteisest?

29. Missugustes faasides on võnkuvad punktid, mis asetsevad kahel pool sõlme?

30. Milles seisab pendlite resonants?

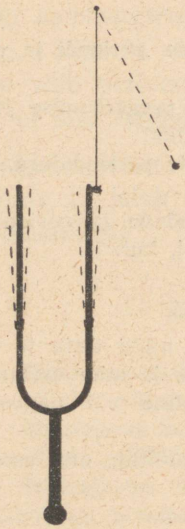
31. Milles seisab elastsete võnkumiste resonants?

32. Missugune on resonantsi põhiline tingimus?

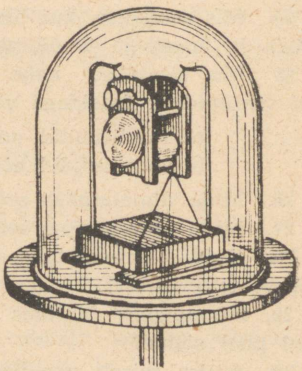
20. Hääl. Hääle allikaks on võnkuv keha. Kui heliseva keha, näiteks helihargi külge viia niidi otsas rippuv metallist kuulike (joon. 24), siis see kuulike hakkab helihargilt eemale hüplema, näidates sellega heliseva keha võnkuvale olekule.

Heliseva keha võnkumine antakse edasi õhule. Heliseva keha pind esimesel momendil liigub ümbritseva õhu poole ja surub selle lähema kihi kokku; pinna tagasiliikumisel tekib tihenduse asemel õhuhõrendus. Need tihendused ja hõrendused levivad ümbritsevas õhus lainetaoliselt, moodustades häälelaineid.

Hääl levib ainult elastses aines. Õhuta ruumis hääl ei levi. Kui riputada õhupumba kupli alla elektrikõlisti, (joon. 25), siis selle järgi, kuidas õhku kupli alt välja pumbatakse, hääle tugevus väheneb.



Joon. 24. Heliseva helihargi võnkumine.



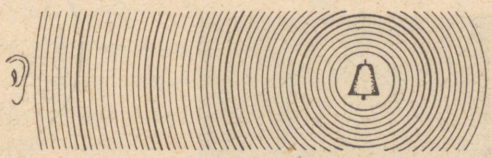
Joon. 25. Elektrikõlisti õhupumba kupli all.

Hääle levimine punktitaolisest allikast toimub sfääriliste lainete kujul (joon. 26). Õhu laine, jõudes kõrvani, paneb võnkuma trumminaha; selle võnkumised antakse edasi keskkõrvale; seal nad ärritavad kuulmisnärvi ja kutsuvad sellega esile hääle tajumise, kuulmise.

Erisugustes kehades on hääle levimiskiirus erisugune. Et mõõta seda kiirust, tuleb ühe täpse kella (kronomeetri) järgi märkida mingi lühikese hääle tekkimise aeg, teise kella abil, mille näitamine on esimese omaga kooskõlastatud, märgitakse teatud kaugusel tajumise aeg ja jagatakse vahemaa

mõõdetud ajavahemikuga. Mõõtmised annavad järgmised kiiruse suurused $\frac{m}{sek}$-tes: õhus 0° juures 332; õhus 15° juures 340; vees 1450; kuusepuus 4000 kuni 5000; terases 5000. Inimese kõrv võtab häälena vastu võnkumised, mille võnkearvud sekundis on 16 ja 20 000 vahel.

Võnkumiste arvu sekundis mõõdetakse ühikuga, mida nimetatakse h e r t s i k s. *Hertsiks nimetatakse sagedust 1 võnge sekundis.*



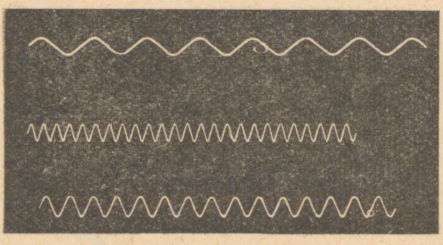
Joon. 26. Keralainte levimine helisevast kehast.

21. Toon. Tooni valjus ja kõrgus. Sireen. Hääled jagunevad muusikalisteks helideks ehk toonideks ja müradeks. Müra on paljude lühiajaliste ja mitmekesiste häälte kogum. Selline on metsa mühin tuules, müra, mis tekib palkide või kivide viskamisest teesillutisele, sõidukite liikumisest, trammi- ja metroovagunite liikumisest rööbastel jne.

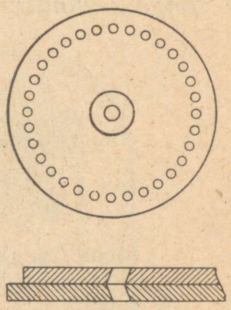
Muusikalist heli annavad helihark, mänguriista keel, laulja hääl ja muusikariistad. Heli juures kõrv eraldab kolme omadust: valjust, kõrgust ja tämbrit.

Heli valjus on tema eriline omadus, mis on määratav ainult kuulmisaistingu järgi. Heli valjus kui psühhofüüsiline nähtus sõltub heli füüsilisest omadusest — tema tugevusest. Heli tugevust mõõdetakse helienergia hulgaga, mis läbib ühe ruutsentimeetri sekundis. Võnkumise energia aga, kui teised tingimused jäävad samaks, sõltub *võnkumise amplituudist.*

Kvalitatiivselt võime selles veenduda heliseva helihargi või pillikeele juures: amplituud väheneb seal ajajooksul. Võnkumise amplituudi vähenemisega väheneb ka tema energia ja heli valjus. Keskmiste sageduste jaoks, piirides 1000 kuni 3000 Hz, võib kõrv veel eraldada heli, kui energia hulk 1 cm^2 kohta 1 sekundis on võrdne 10^{-8} ergiga (kuuldelävi).



Joon. 27.

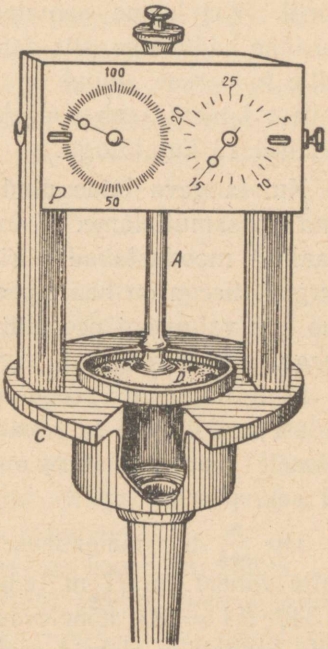


Joon. 28. Gagniard de la Tour'i sireeni kate.

Heli kõrgus sõltub võnkumiste arvust sekundis. Katse näitab, et kuuleme *neid toone kõrgematena, mille võnkumiste arv sekundis on suurem.* Helihargi võnkumiste arvu on kerge määrata, kui asetada helihargi harule kerge teravik ja ühtlaselt tõmmata nõetatud klaasiribaga heliseva helihargi teravikku pidi. Ühe ja sama aja jooksul joonestavad erinevad helihargid võrdsetel teepikkustel (klaasi liikumise võrdsete kiiruste puhul) erinevad sinusoidid (joon. 27). Nende sinusoidide ja klaasiriba liikumise aja järgi võib arvutada võngete arvu sekundis ehk võnkesageduse.

Heli võngete arvu mõõtmiseks rakendatakse riista, mida nimetatakse s i r e e n i k s.

Sireen on silindriline karp, mille ülemisse kattesse on tehtud ringjoont mööda hulk üksteisest võrdsetel kaugustel olevaid auke (joon. 28). Aukude teljed on katte tasapinnaga kaldu. Katte peale on tihedalt asetatud teine liikuv ketas samasuguse aukude arvuga, kuid augud on vastupidiselt kaldu ketta tasapinna suhtes. Sireeni puhutakse lõõtsa abil õhku; katte aukudest väljuv õhujuga, andes tõukeid liikuva ketta aukude seintele, paneb ketta pöörlema ümber telje. Kui liikuva ketta augud tulevad liikumatu ketta aukude kohale, tekib sireeni peal õhutihendus; kui aga liikuva ketta aukude vahed katavad liikumatu ketta augud, tekib hõrendus.



Joon. 29. Cagniard de la Tour'i sireen.

Need õhutihendused ja -hõrendused on hääle allikaks. Võnkumiste arvu sekundis määratakse ketta aukude arvu ja ühes sekundis ketta poolt tehtud pöörete arvu korrutisega. Mingile helile vastava võnkumiste arvu määramiseks pannakse sireen helisema ja tugevdatakse lõõtsaga õhujuga seni, kui kaks heli — uuritav ja sireeni oma — tunduvad meie kõrvale kokkusulanud olevat (s. o. tekib unisono ehk samakõla). Siis mõõdetakse teatud aja kohta liikuva ketta pöörete arv sireeni küljes oleva ja selleks määratud lugeja abil ning selle järel määratakse võngete arv sekundis kettal oleva aukude arvu ja ketta pöörete arvu korrutisega.

Et aru saada hääle füüsilisest omadusest, mida nimetatakse *tämbriks*, tuleb tutvuda hääle kui lainelise liikumise teiste omadustega.

22. Häälelaine peegeldumine. Sarnaselt igasuguse elastse võnkumise lainega peegeldub häälelaine kahe iseliiki keha piirilt. Kui hoone seinale, jõe kaldale või metsale langeb keraline häälelaine, siis nendelt piiridelt lähtub uus keralaine, mille kumeruse suund on vastupidine langeva laine omaga. Sellest lainest saab peegeldunud laine. Nähtus on sarnane joonisel 15 kujutatuga.

Kui langeva laine pind on lame, siis peegeldunud laine pind on samuti lame. Langeva ja peegeldunud lainete normaalid [1] moodustavad piirile tõmmatud ristjoonega võrdsed nurgad. Seega on hääle peegeldumise kohta kehtiv sama seadus mis valgusegi peegeldumise kohta: *langemisnurk võrdub peegeldumisnurgaga.*

Mingilt piirilt peegeldunud häält võib kuulda häälest endast eraldi, kui ta jõuab kõrva pärast seda, kui häälest otseselt saadud aisting on kadunud, s. o. mitte enne kui 0,1 sek. pärast.

340 $\frac{m}{sek}$-lise häälekiiruse juures peab peegeldav pind olema mitte vähem kui 17 m (edasi-tagasi hääl käib ära $L = vt = 340 \cdot 0{,}1 = 34$) kõnelevast inimesest, et tekitatud hääl ja selle peegeldus oleksid eraldi kuulda. Eraldi tajutud peegeldunud häält nimetatakse kajaks. Kajast, s. o. selgesti eraldatavast hääle kordumisest tuleb eraldada reverberatsiooni nähtust, s. o. hääle järkjärgulist kustumist hoones pärast hääleallika vaikimist. Reverberatsioon on seletatav paljukordselt korduva hääle peegeldumisega seintelt, kus juures ruumis olevad asjad on osaliselt neelanud hääleenergiat.

---

[1] Normaaliks nimetatakse tasapinnale tõmmatud ristjoont.

23. Häälelainete interferents. Kui panna helihark helisema ja pöörata teda ta jala telje ümber, siis on kuulda hääle vahelduvat nõrgenemist ja tugevnemist. On ilmne, et helihargi harudest tulevad häälelained kord nõrgendavad, kord jälle tugevdavad teineteist. Sellist hääle tugevnemist ja nõrgenemist nimetatakse hääle interferentsiks. Hääle interferentsi aluseks on lainete interferents (vt. § 16).

24. Tuiklemised. Erilise lainete liitmise juhu moodustavad lained, mille perioodid erinevad üksteisest väga väikese suuruse võrra. Võtame kaks võrdsete võnkearvudega helihark ja paneme nad helisema. Me kuuleme ühte tooni: helihargid helisevad unisonos. Nüüd asetame ühele neist painutatud metallplaadikese. Seega me suurendame helihargi massi ja muudame väga vähe tema põhitooni kõrgust. Kui nüüd panna helihargid üheaegselt helisema, siis võime kuulda heli vahelduvat tugevnemist ja nõrgenemist.

Peaaegu võrdsete perioodidega kahe keha üheaegsel helisemisel tekkivaid tugevnemisi ja nõrgenemisi nimetatakse tuiklemisteks. Tuiklemised tekitavad ebameeldiva mulje, kui nad korduvad 30 kuni 130 korda sekundis.

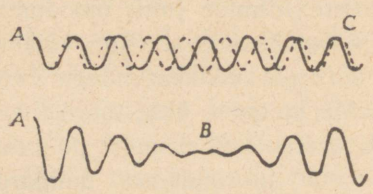
Tuiklemiste füüsilisest põhjusest on kerge aru saada, vaadeldes joonist 30. Sellel on peenikese pideva joonega graafiliselt kujutatud laine võnkearvuga $\nu = 512$ Hz; punktiirjoonega on kujutatud laine võnkearvuga $\nu_1 = 576$ Hz. Alumine kõverjoon on liitlaine. Juba joonise ulatuses on näha suuremaid ja väiksemaid liitlaine amplituude, mis kutsuvad välja heli tugevnemise ja nõrgenemise.

Tuiklemiste arv sekundis on võrdne $\nu_1 - \nu = n$, meie näites $576 - 512 = 64$.

25. Keha omatoon. Kui keha ühes otsas on tekitatud võnkumine, siis lained lähevad kehast läbi, peegelduvad selle teiselt otsalt, tulevad vastupidise lainena tagasi, peegelduvad uuesti esimeselt otsalt jne. Päripidise ja vastupidise laine

liitumisest tekivad seisvad lained. Kui võnkesagedus on 16 ja 20 000 Hz vahel, siis võivad seisvad lained saada heli allikaks.

Kuna vastupidine laine, jõudes keha esimese otsani, peegeldub sellelt ja läheb esialgses suunas, siis võivad kehas peale välise võnkumapaneva jõu toime kadumist veel kaua säilida seisvad lained, mis pärinevad varemtekitatud võnkumistest kummaski otsas peegeldunud lainete liitmise teel.



Joon. 30. Tuiklemiste tekkimine.

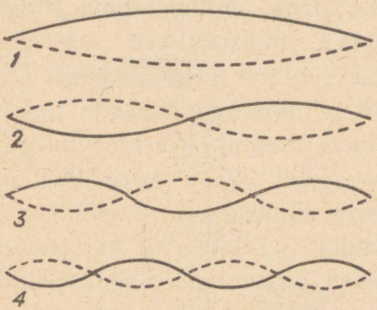
Seisvate lainete tekitamiseks mitmesugustes kehades on kaks võimalust: esimene võimalus — keha mõlemad otsad on vabad või mõlemad on liikumatud; siis nendel tekib üheaegselt kas kaks sõlme või kaks paisu, s. o. kogu kehale paigutub täisarv seisvaid poollaineid (paarisarv veerandlaineid); teine võimalus — üks ots on liikumatu, teine vaba; siis esimesele tekib sõlm, teisele pais ja kogu keha ulatuses võib paigutuda paaritu arv veerandlaineid.

Kui väline võnkumist tekitav põhjus on niisugune, et antud võnkuva keha pikkuses võib paigutuda paaris või paaritu arv veerandlaineid, siis kehas tekitatud seisvad lained säilivad veel kaua peale välise põhjuse kõrvaldamist ja kustuvad vaid aegamööda paratamatute takistuste tõttu. Kõik ülejäänud võnkumised, mis ei vasta eespool toodud tingimustele, sumbuvad kiiresti ja kustutatakse peegeldunud lainete poolt.

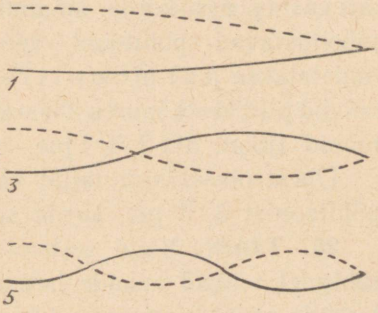
Keha o m a t o o n i d e k s nimetatakse selliseid toone, mille puhul kehale paigutub täisarv veerandlaineid.

26. Keha põhitoon. Keha p õ h i t o o n i k s nimetatakse kõige väiksema võnkesagedusega omatooni. Põhitooni puhul tekib kehas kõige väiksem arv sõlmpunkte. Otstest kinnita-

tud keele võnkumisel tekivad otstesse sõlmpunktid ja keskele pais (joon. 31). Keele pikkus l annab ühe seisva poollaine, järelikult on põhitooni lainepikkus $\frac{\lambda}{2} = l$, ehk $\lambda = 2l$.

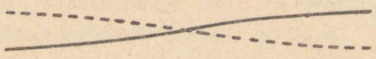


Joon. 31. Heliseva keele põhitoonile ja ülemtoonidele vastavad võnkumised.



Joon. 32. Ühest otsast kinnitatud varva võnkumine (põhi- ja ülemtoonid).

Ühest otsast kinnitatud varva võnkumisel tekib kinnitatud otsas sõlmpunkt (joon. 32), teises otsas aga pais. Sellise varva pikkusele paigutub pool seisvast poollainest, s. o. neljandik põhitooni lainepikkusest; järelikult $\frac{\lambda}{4}$ on võrdne varva pikkusega l ja siit $\lambda = 4l$.



Joon. 33. Keskelt kinnitatud varva võnkumine (põhitoon).

Niisamasugune seos on ühest otsast lahtise ja teisest otsast kinnise puhkpilli õhusamba pikkuse ja põhitooni lainepikkuse vahel.

Keskelt kinnitatud varva (joon. 33) võnkumisel tekib keskele sõlmpunkt, otstesse paisud ja varva pikkus vastab jällegi seisva poollaine pikkusele.

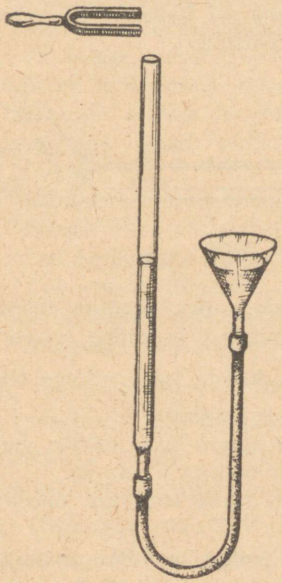
27. Ülemtoonid. Katsed näitavad, et võnkuvas kehas võivad tekkida üheaegselt põhivõnkumisega võnkumised, millede lainepikkused on täisarv (2, 3, 4 jne.) korda põhitooni lainepikkusest väiksemad või millede võnkearvud on vastav arv korda suuremad. Toone, millede võnkearvud moodustavad põhitooni võnkearvu täisarvulised kordsed, nimetatakse harmoonilisteks ülemtoonideks. Nii võivad pilli keele juures üheaegselt põhitooniga heliseda ülemtoonid (joon. 31) 2, 3, 4 jne. korda suuremate võnkearvudega. Ühest otsast kinnitatud varva (joon. 32) ülemtoonidel on põhitoonist 3, 5 jne. korda suurem võnkearv.

28. Tämbr. Nagu eespool toodud näidetes nii ka teistel juhtudel võivad kehade helisemised üksteisest erineda ülemtoonide arvu, kõrguse ja tugevuse poolest. Ühe ja sama põhitooni juures võivad erinevatel instrumentidel või häältes kuuldavale tulla erinevad ülemtoonid, mispärast kuulmismuljed võivad olla ka erinevad. Seda erinevust väljendatakse sellega, et põhitoonile omistatakse erinev helivärv ehk tämbr. Seega heli kolmas omadus — *tämbr* — sõltub põhitooni saatvate ülemtoonide arvust, kõrgusest ja valjusest. Sellepärast näiteks toon *do*, nagu iga teinegi, võetud inimese häälega, viiulil või klaveril tekitab kuulmisel erinevaid muljeid.

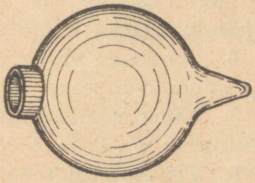
29. Heli resonants. Kui avatud klaveri ees tekitada mingi toon, siis peale tekitatud heli kadumist võib kuulda klaveri keelte helisemist. See on keelte resoneerimine, kaasahelisemine, millel on tekitatud tooniga samasuur võnkeperiood. Kui asetada lauale mitu resonants-kastikesega heliharki, mille hulgas on kaks ühesuguste võnkeperioodidega, ja panna üks viimastest võnkuma ning siis summutada, siis võib kuulda teise samasuguse helihargi edasihelisemist.

Võib panna resoneerima mingi helihargi toonile pikas silindris suletud õhusamba (joon. 34). Muutes vee nivood silindris, võib saavutada seda, et õhusamba võnkumise omaperiood saab võrdseks helihargi võnkeperioodiga. Niisugune

õhusammas resoneerib tugevasti helihargi helisemisele. Võib valida õhusamba suuruse nii, et saadakse helihargi ülemtoonide resonants. Edaspidine vee nivoo muutmine muudab õhusamba võnkumise omaperioodi ja resonants lakkab. Mingile helile resoneerivat riista nimetatakse r e s o n a a t o r i k s.



Joon. 34. Riist õhusamba resonantsi saamiseks.



Joon. 35. Helmholtzi resonaator.

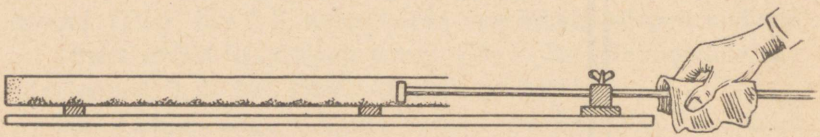
Helmholtzi resonaator (joon. 35) kujutab endast metallist õõnes kera kahe avausega, milledest üks on pööratud helilaine poole, teine aga pannakse kõrva. Sõltuvalt suurusest resoneerib resonaator kindla kõrgusega toonile.

30. *Laboratoorne töö 2.* Hääle kiiruse mõõtmine mitmesugustes ainetes.

T ö ö v a h e n d i d: 1) Kundti toru (joon. 36); 2) näpitsad; 3) mitmest ainest varvad; 4) papist ketas; 5) mõõtjoonlaud; 6) korgipuru; 7) märg kalevitükk.

Töökäik. 1. Kinnitage varb keskelt näpitsaga; varva ühte otsa asetage papist (või korgist) ketas ja selle peale nihutage klaastoru, millesse on enne raputatud ühtlase kihina korgipuru.

2. Tõmmates märja kalevitükiga varva vaba otsa mööda, tekitate temas pikivõnkumised; need võnkumised kutsuvad esile õhulaine klaastorus olevas õhusambas. Torus tekkinud seisvad lained jätavad sõlmpunktides korgipuru paigale ja annavad talle suurima liikumise paisukohtades. Nihutage toru nii kaua, kuni korgipuru pole andnud selget pilti sõlmedest ja paisudest.



Joon. 36. Kundti toru.

3. Loendage n_0 sõlmede või paisude vahet, mõõtke mõõtjoonlauaga äärmiste loendatud punktide kaugus l ja leidke seisva poollaine pikkus õhus $l_0 = \frac{l}{n_0}$. Avaldage l_0 kaudu laine pikkus õhus λ_0, λ_0 kaudu aga ka hääle kiirus õhus v_0 ja võnkearv ν.

4. Avaldage varva pikkuse L (§ 26) kaudu laine pikkus varvas λ ja λ kaudu võnkearv ν ning laine levimiskiirus v varvas.

5. Kuna võnkesagedus ν on varvas sama suur kui õhuski, siis arvutage v v_0, l_0 ja L kaudu.

6. Tehke mitu mõõtmist ühe aine kohta ja võtke v keskmine.

7. Tehke samasugused mõõtmised teistest ainetest varbadega.

8. Kandke mõõtmised tabelisse.

Järjek. nr.	Aine	Poollainete arv n_0 õhus	Poollaine pikkus l_0	Laine pikkus õhus λ_0	Laine pikkus aines λ	Suhe $\frac{\lambda_0}{\lambda}$
1.	Klaas					
2.	„					
3.	„					
4.	Vask					
5.	„					
6.	„					

31. *Laboratoorne töö 3.* **Hääle lainepikkuse määramine resonantsi abil.**

Töövahendid: Ühendatud anumad (kujutatud joon. 34); 2) helihark; 3) mõõtjoonlaud.

Töökäik. 1. Tõstes lehtri võimalikult kõrgele, viige helisev helihark toru otsa kohale ja langetage lehtrit seni, kui õhusammas torus on hakanud resoneerima helihargile.

2. Mõõtke mõõtjoonlauaga resoneeriva õhusamba pikkus.

3. Arvatlege, missugune osa lainest paigutub resoneerivasse õhusambasse ja arvutage laine pikkus.

4. Jätkake anuma langetamist seni, kui tekib teine resonants. Missugune osa lainest paigutub sel juhul resoneerivasse õhusambasse?

5. Mõõtke mõõtjoonlauaga õhusammas ja tehke arvutus.

6. Leidke kahe näitamise keskmine ja võrrelge laine pikkusega, mis vastab helihargile märgitud võnkearvule.

7. Kui suure lainepikkuse osaga on võrdne esimese ja teise resonantsi õhusammaste pikkuste vahe?

8. Arvutage helilaine pikkus ja võrrelge eelmise resultaadiga.

32. **Grammofon.** Grammofon (joon. 37) kujutab endast riista spetsiaalsetele plastmassist plaatidele mehaanilisel viisil jäädvustatud helide reprodutseerimiseks.

Hääle ülesvõtmisel tarvitatakse erilist lõiketera, mis pannakse võnkuma vahetult helilainete poolt või, mis praegu sagedasem, elektromagnetilise seadise — rekorderi abil; viimane on ehituselt sarnane valjuhääldajaga. Pehmele vahast kettale lõigatakse selle lõiketeraga looklev spiraalne vagu (joon. 38), mis vastab lõiketera helilistele võnkumistele. Vahast ketas on vormiks elektrolüüsi abil valmistatavale metallstantsile, millega hiljem valmistatakse pehmendatud plastmassist suurel arvul grammofoniplaate.

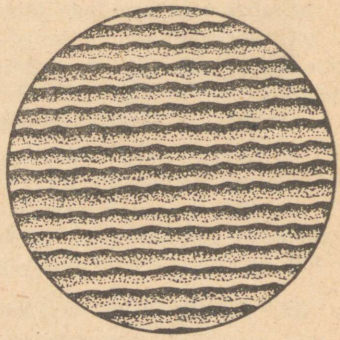
Hääle reprodutseerimiseks asetatakse elastsest vilgukivist või metallist plaadikesega (membraaniga) ühenduses olev grammofoninõel pöörlevale plaadile. Liikudes vagu mööda, kordab nõel kõiki neid võnkumisi, mida ülesvõtmisel tegi lõiketera. Need võnkumised antakse edasi membraanile ja sealt

edasi õhusambale, mis asetseb heli juhtivas torus ja hääletugevuse suurendajas — ruuporis.

Tänapäeval on laialt levinud portatiivsed ruuporita grammofonid, mis on monteeritud väikesesse kohvrisse ja mida nimetatakse *patefoniks* (kohvergrammofoniks).



Joon. 37. Grammofon.



Joon. 38. Osa grammofoni plaadist (suurendatult).

Hääle õige reprodutseerimise tingimuseks on grammofoni plaadi rangelt ühtlane pöörlemine sama kiirusega, mille juures toimus hääle ülesvõtt (78 pööret minutis).

33. Ultrahelid. Kui kvartsi kristallist plaadi vastastahkudele asetada metallplaadid ja anda plaatidele vahelduv elektripinge, siis vahelduvate elektriliste jõudude toimel plaat perioodiliselt deformeerub; kui elektri võnkumiste omaperiood ühtib kvartsplaadikese elastsete võnkumiste perioodiga, siis võib saada ümbritseva õhu tugevaid võnkumisi sagedusega 50 000 kuni 5 000 000 Hz ja isegi üle selle. Sellised võnkumised on saanud ultraheli nimetuse. Nad pole muidugi kõrvaga tajutavad, kuid avaldavad kehadele mitmesugust mõju.

1. Kui massiivne tahke keha, näit. metallvalam evib sisemist ebaühtlust, valamise defekte, siis sellistes kehades erisuguste tihe-

dustega osades sumbuvad ultrahelid erisuguselt ja võimaldavad avastada sisemise ehituse vigu. Niiviisi võib „läbi helistada" asju paksusega kuni 1,5 m, mille läbivalgustamine pole võimalik ka kõige tugevamate röntgeniseadmetega.

2. Ultrahelid soojendavad neid kehi, mida nad läbivad, kiirendavad keemilisi reaktsioone, panevad plahvatama mõningaid lõhkeaineid, pihustavad tahkeid kehi vedelikus, tekitades püsikindlaid emulsioone, kiirendavad kristalliseerimise protsessi.

3. Ultrahelid lõhuvad vereliblesid, tapavad 1—2 min. jooksul kalakesi, konnapoegi ja konni (soojaverelised loomad ei sure).

4. Nad surmavad baktereid, näit. piimahappe omi, mille tõttu piima kokkuminekut võib ära hoida mitme ööpäeva jooksul. Ultrahelide biokeemilisel toimel lagunevad valgud ja erituvad lahustunud gaasid protoplasmast.

5. Ultrahelisid kasutatakse laevadevahelisel signaliseerimisel ja merepõhja reljeefi uurimisel laevasõidu ajal.

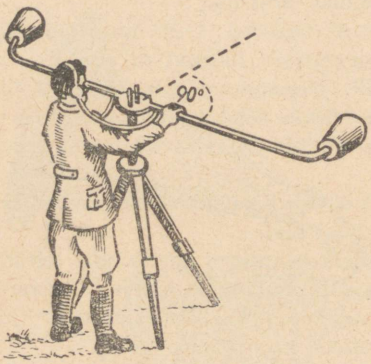
6. Viimasel ajal on Leningradi elekrotehnilises instituudis leitud võimalus „näha" ultraheli abil läbipaistmatus keskkonnas. Esemetest, mis hajutavad ultraheli, võib saada ultrahelilist „kujutist" ja neid viimaseid võib muuta nähtavateks kujutisteks.

Selle meetodi praktilise rakendamise ala on väga lai: tulevikus saab võimalikuks metallide defektide „nägemine" ekraanil, selle „nägemise" rakendamine mitmesuguste kehade asukohtade kindlakstegemiseks vees jts.

34. Müra kahjulik toime. Isegi väikese tugevusega, kuid pideva kordumisega müra (vt. § 21) rikub keskkõrva organeid, mõjub seedimisorganeile, tekitades üksikutel juhtudel isegi oksendamist, ja põhjustab kestvaid närvikava häireid. Sellepärast võitlevad nüüdisaja tehnika ja tervishoid intensiivselt müraga ja tegelevad müravastaste seadmete leiutamisega.

35. Hääle nähtuste kasutamine sõjatehnikas. Tänapäeva kaugelaskerelvade, kõrge maskeerimiskunsti ja sügavate kaevikute juures ei ole vaenlane oma vastasele alati nähtav. Kui vastane pole nähtav, siis võib ta olla kuuldav, sellepärast hääle nähtused evivad suurt tähtsust sõjatehnikas, võimaldades paljude sõjaülesannete lahendamist.

Üheks esimeseks ülesandeks osutub hääle järgi vastase kuulipilduja, patarei või lennuki asukoha ülesotsimine. Selline otsimine põhineb meie kuulmisorgani omadusel eraldada väga väikesi ajavahemikke, mis on ühe kõrva ja teise kõrva tajumiste vahel, — see on nii-nimetatud b i n a u r e a a l n e e f e k t, mis seisab häälelainete tuleku suuna määramises kahe kõrvaga kuulmisel. Hääle suuna määramine ühe kõrvaga on kas üldse võimatu või see määramine osutub väga ebatäpseks. Binaureaalse võime tõttu pöörab kuulaja pea nii, et hääle tajumine mõlema kõrvaga toimuks üheaegselt. Siis asub hääleallikas kõrvade ühendusjoone keskristtasapinnas. Kui hääle suund on leitud kolmes eri punktis, siis nende andmete järgi saab lihtsa konstrueerimisega leida kaunis täpselt hääleallika asukoha.



Joon. 39. Häälepüüdja; punktiirnool määrab vertikaalse tasapinna, mis läbib hääleallikat.

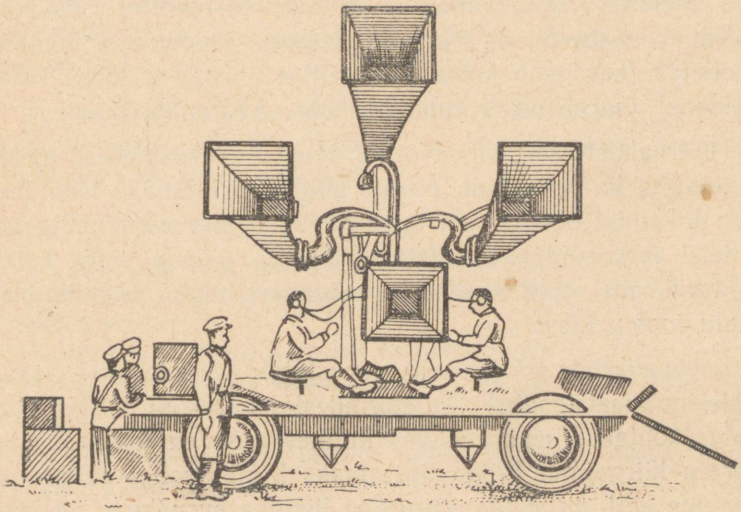
Kuid igal kõrval on olemas kaugemast hääleallikast hääle tajumise piir, kuna hääle valjus väheneb kaugusega. 2000 Hz võnkumiste juures (siin on kõrv kõige tundlikum) hääle taju kaob, kui tajumispinna igale ruutsentimeetrile langeb vähem kui $\frac{1}{10}$ ergi sekundis. Sellepärast võib lennuki müra palja kõrvaga kuulda mitte kaugemalt kui 9 km.

Veel nõrgemate häälte kinnipüüdmiseks kasutatakse kooniliselt koonduvaid torusid — r u u p o r e i d —, mis püüavad kinni palju suurema osa häälelainest kui kõrv, koondavad selle energia ja juhivad kõrvalestadesse (joon. 39).

Ruuporite vahe nagu suurendaks kõrvade vahet ja sellega

suurendab binaureaalsel võimel põhinevat hääleallika suuna määramise täpsust (kuni 0,5°). Ruuporite abil suureneb kuulmise kaugus 25 km-ni.

Lennuki tõrjel pole küllaldane teada ainult lähenemise suunda, vaid peame teadma ka lennu kõrgust; sellepärast koosneb häälepüüdmise riist kahest, horisontaalsest ja verti-



Joon. 40. Häälepüüdja.

kaalsest ruuporite paarist. Häälepüüdjat teenindab kaks vaatlejat: üks määrab horisontaalse ruuporite paariga hääleallika suuna (näiteks lennuki suuna), teine leiab vertikaalse paari abil selle kõrguse (joon. 40).

Samuti tuleb sõjategevuse ajal võtta tarvitusele abinõusid laevade ilmumise õigeaegseks avastamiseks. Selleks otstarbeks kasutab sõjatehnika vee häälejuhtivust, ehitades erilisi häältepüüdjaid, mille abil kuulaja, püüdes kinni laevakruvi müra, võib jälgida vaenlase laevade liikumist. Laeva-

kruvi müra ja teised laeva mürad koosnevad paljudest erinevate sagedustega (piirides 300 kuni 1500 võnget sekundis) häältest, moodustades häälte segu. Müra vastuvõtjad ehitatakse mitut tüüpi ja suuremalt jaolt nad põhinevad elektrilistel nähtustel. Sõjalaevadel harilikult rakendatakse elektromagnetilisi (või elektrodünaamilisi) vastuvõtjaid. Elektromagnetiline vastuvõtja kujutab endast suurendatud mõõdetega telefoni. Kui laevapardal on kaks vastuvõtjat, siis võib mõlemad vastuvõtjad seada ühesuguse tugevusega häälele ja otsitav laev asub kahte vastuvõtjat ühendava lõigu keskristjoonel (sarnaselt lennuki asukoha määramisega).

Hüdroakustilised vastuvõtjad leiavad rakendamist mereasjanduses ka rahu ajal. Nende abil võib kindlaks teha laevade liikumist öö ajal või udus, avastada karisid, jäämägesid ja teisi laevasõiduks kardetavaid kohti, pidada sidet kalda ja laeva vahel ning mõõta meresügavusi hääle peegeldumise kaudu merepõhjast.

Laevaavariide vältimiseks varustatakse kardetavad kohad häälesignalisatsiooniga. Tuletornides, karidel ja teistes sarnastes kohtades seatakse üles mitmesuguse ehitusega hääleenergia kiirgajaid. Kõige lihtsamaks liigiks selles suhtes on veealune kell, mille tila pannakse liikuma suruõhuga, elektrivooluga või automaatselt merelainete löökidega. Veealuse kella võnkumise sagedus on harilikult 1200 võnget sekundis ja tegevuse raadius kuni 20 km. Hääletehnika leiab väga laialdast rakendamist sõjatehnikas. Õpperaamatus pole võimalik peatuda nendel huvitavatel rakendustel. Tutvuda nendega võib Vnukovi ja Braggi raamatute järgi, mis on märgitud kirjanduse nimekirjas, peatüki lõpus.

Harjutus 2.

1. Missuguse ajaga läbib hääl õhus 1 km, kui temperatuur on 0^0?
2. Kui kaugel vaatlejast tekkis välk, kui ta kuulis müristamise algust 10 sekundit pärast välgu sähvatust (õhu temperatuur 15^0)?

3. Kui lai on järv, kui hääl teiselt kaldalt tuli õhku mööda 1 sek. võrra hiljem kui vett mööda?

Vastus: 4300 m.

4. Missugune on hääle kiirus selles aines, milles hääl läbib 4,5 m 0,001 sekundiga?

5. Võnkumiste arv sekundis on 512. Kui pikk on laine õhus 0^0 juures?

6. Kui suur on häälelaine võnkesagedus, kui ta pikkus õhus 330 $\frac{m}{sek}$-lise kiiruse juures on 33 cm? Anda vastus täisarvuna.

7. Häälelaine võnkeperiood on 0,004 sek. Leida laine pikkus õhus 0^0 juures.

8. Laine pikkus õhus on 17 cm (kui kiirus on 340 $\frac{m}{sek}$). Leida hääle levimiskiirus kehas, milles sama võnkesageduse juures mis õhuski on laine pikkus 102 cm.

Vastus: 2040 $\frac{m}{sek}$.

9. Kas võib hääl levida mitteelastses kehas?

10. Millist mõju kuuldavusele avaldavad kardinad ja pehme mööbel toas?

11. Millest tekib mägedes mitmekordne kaja?

12. Määrata, mitme sekundi pärast peale paugu kuulmist tuleb oodata mürsu langemist, kui vaatleja asub kahurist 4000 m kaugusel ja 4000 m peale laskmisel on mürsu keskmine kiirus 200 $\frac{m}{sek}$ (Vnukovi raamatust).

KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Milles seisab hääle füüsiline olemus?
2. Kuidas levib punktitaolisest hääleallikast lähtuv hääl õhus?
3. Kas on häälelaine õhus rist- või pikilaine? vees? tahkes kehas?
4. Kuidas mõõta hääle kiirust? Kui suur on ta õhus?
5. Mis on herts ja mida mõõdetakse selle ühikuga?
6. Missugustes sageduse piirides on kuuldavad hääle võnkumised?
7. Millest sõltub hääle valjus?
8. Mis on kuuldelävi?

9. Millest sõltub hääle kõrgus?
10. Millal ja kuidas toimub hääle peegeldumine?
11. Mida nimetatakse tuiklemiseks ja millest ta võib tekkida?
12. Mida nimetatakse keha omatooniks?
13. Mida nimetatakse keha põhitooniks?
14. Mida nimetatakse ülemtooniks?
15. Millest sõltub hääle tämbr?
16. Milles seisab hääle resonants? Tooge näiteid?
17. Kuidas saab määrata hääle resonantsi abil õhusambas häälelaine pikkust või võnkesagedust?

Kirjandus. Зернов, Колебания и волны, „Звук и музыка", Массовый вечерний университет МГУ. Красиков, Ухо. Беликов, Речь и слух. Ржевкин, Слух и речь в свете современных исследований. Внуков, Физика и оборона страны. Брэгг, Мир звука. Вуд, Звуковые волны и их применение. Флеммминг, Волны в воде, в воздухе, в эфире.

II. Soojus ja molekulaarfüüsika.

1. Soojus kui energia.

36. Soojusõpetuse areng. Mehaanika osas me nägime, et tootmistegevus viis inimkonna juba iidsel ajal tutvumisele mehaaniliste nähtustega. Juba viis tuhat aastat enne meie ajaarvamist nõudis püramiidide, nende maailma grandioosseimate ehitiste püstitamine masinate rakendamist. Vanaaja suured sõjad, tolle aja suurimate linnade piiramised toimusid märkimisväärse arvu mehaaniliste seadiste abil. Tööstuse ja kaubanduse arenemine esitas teadusele üha suuremaid ja suuremaid nõudmisi. Teaduse areng viis XVI ja XVII sajandi piiril Galilei-Newtoni mehaanika seaduste avastamisele.

Kuni XVII sajandini kasutati tolle ajani loodud masinate ja transpordivahendite liikumapanemiseks eranditult algul orjade, hiljem palgaliste tööliste lihaste energiat ja loomade energiat ning vähemal määral tuule ja vee mehaanilist energiat (vesiveski ilmus Kesk-Euroopasse umbes VI sajandi keskpaiku, tuuleveskid XI sajandi algul).

Tööstuse arenemine suurendas nõudmist metalli järele. Vanaaja kaevandusasjandus hakkab laienema, rajatakse uusi kaevandusi ja süvendatakse vanu. Kaevanduste süvendamine teeb järjest raskemaks kaevandustesse imbuva vee väljapumpamise. Tekib vajadus võimsama jõumasina järele, kui seda on elusolendid oma lihaste energiaga. Tehnilised otsingud suunduvad teist liiki loodusnähtuste — soojusnähtuste kasutamise poole.

Oma olemasolu esimestest päevadest alates kasutas inimene päikese soojust ilma mingisuguse pingutuseta omalt poolt. Tehniliselt hakkas inimene valitsema soojuse üle tulesaamise viisi avastamise ajast peale. Esimene soojusesaamine toimus töö muundumisel soojuseks hõõrdumise teel.

Järgmine samm soojuse rakendamise laiendamise suunas tehti II sajandil, kui Heron ehitas erilise mehhanismi, mida pani tööle aur, s. o. muutis soojuse jällegi tööks. Kuid Heroni ajastul, orjade ajastul ja järgnevatel odava lihaste energia kasutamise sajanditel Heroni ebatäiuslik mehhanism ei olnud suuteline võistlema teiste mehaanilise energia allikatega. Seepärast nii jõumasin kui ka soojuse enese omadused jäid väljapoole teaduslik-tehnilise mõtte tähelepanu. Alles XVII sajandil, kui oli juba peaaegu lõpetatud klassikalise mehaanika loomine ja kui ilmnes selgelt, nagu oli algul öeldud, seniste mehaanilise energia allikate puudulikkus kaevandusasjanduse ja vasttärkavate tekstiilvabrikute kasvavate vajaduste teenindamisel, pöördub teaduslik-tehniline mõte soojusnähtuste uurimisele.

Leidurite hulgas, kes püüdsid auru ära kasutada mehaanilise töö saamiseks, näeme Leonardo da Vinci't, Papin'i, Newcomen'it ja teisi. Paljude leidurite pingutuste tulemusena õnnestus XVII ja XVIII sajandite piiril ehitada esimesed seadised, mille abil saadi soojuse arvel mehaanilist tööd. Kuid need seadised olid väga primitiivsed ja leidsid ainult väga piiratud rakendamist. Need olid ainult „tulemõju" pumbad, mille abil võis pumbata vett mingisugusesse reservuaari. Vahetuks rakendamiseks tehastes olid esimesed aurumasinad kõlbmatud.

Mistahes tööstuslikuks otstarbeks kõlbliku aurumasina leiutamise suur au kuulub vene soojustehnikule — iseõppijale Ivan Polzunovile. Aastal 1763 I. Polzunov projekteeris ja aastal 1765 ehitas ta maailma esimese kahesilindrilise katkestamatu töötamisega aurumasina, mis kindlustas katkestamatu töö saamist igasuguse tööstusliku mehhanismi käitamiseks. I. Polzunovi masin oli ehitatud Altais, Kolõvano-Voskressenski tehastes Barnauli kreisis ja rea kuude jooksul pani käima õhupuhumise seadist; ta mitte ainult ei teinud tasa valmistamise kulusid, vaid tõi ka märkimisväärset kasumit. Kuid feodaal-pärisorjusliku Venemaa tingimustes ei suutnud Polzunovi masin leida laialdast rakendamist. Kolõvano-Voskressenski tehaste harimatud juhid ja tsaarivalitsuse valitsevad ringkonnad, kellel ei olnud usku vene inimeste jõusse ja võimetesse, hävitasid Polzunovi enda ja tema suure loomingu. Kuid I. Polzunovi töö ei läinud kaotsi. Polzunovi masinat nägid paljud mäetööstuse spetsialistid välismaalased. Nende kaudu see sai kahtlemata teatavaks ka piiri taga, eriti ettevõtjate ringkondades, kes ahnelt tundsid huvi Venemaa mäeasjanduse edusammude vastu.

Palju hiljem ehitati Manchesteris kahesilindriline aurumasin, mis mõningate täiustamistega jäljendas Polzunovi masinat. Aastal 1784 ehitas inglane Watt täiuslikuma aurumasina. Kuid see polnud enam esimene, vaid teine masin tööstuslikkudeks otstarveteks. Tollest ajast hakati aurumasinat rakendama mitte ainult kaevandusasjanduses, vaid ka vabrikutes ning maa- ja veetranspordis. Aurumasin, mis tekkis tehnika vajadustest, osutas ise suurt mõju tehnika ja kogu tootmise arenemisele. Sellepärast nimetataksegi seda aurumasina kõige laialdasema rakendamise sajandit aurusajandiks.

Soojusnähtuste eksperimentaalse uurimise kõrval käis ka nende teoreetiline tõlgendamine. XVIII sajandi algusest peale kujuneb välja vaade soojusele kui erilisele kaaluta ainele, mida nimetati flogistoniks; arvati, et flogistoni valamine kehasse kutsub esile temperatuuri tõusu, tema vähenemine — temperatuuri langust. Selle vaate kajastusena on veel tänini säilinud terminid soojusmahtuvus (sarnane vedelikkude mahtuvusega anumatesse) ja varjatud soojus.

Edaspidine tehnika ja eriti soojustehnika arenemine hävitas aegamisi kujutluse sellest, et soojuse nähtusi tekitab eriline aine — flogiston.

Esimesena arvustas sügavalt flogistoni teooriat suur vene õpetlane M. Lomonossov aastal 1744 oma töös „Mõtiskelud soojuse ja külma põhjusest". M. Lomonossov ei piirdunud ainult flogistoni teooria arvustusega, vaid töötas ka välja täiesti uue vaate soojuse olemusele. M. Lomonossovi kujutluse järgi on soojus molekulaarse liikumise vorm. Kuid M. Lomonossovi kujutlused saavutasid tunnustust ainult suure vaevaga ja väga aeglaselt. Alles 100 aastat pärast Lomonossovit jõudis Lääne-Euroopa teadus nendeni välja. Tänapäeval need vaated on üldtunnustatud (vt. § 63).

Enne kui asuda endiselt õpetuselt uuele ülemineku küsimuse juurde, meenutagem algkursusest neid suurusi, mis on sisse toodud soojusnähtuste iseloomustamiseks ja mis ei sõltu soojuse teooriast.

37. Soojushulga ühik. Soojushulga mõõtmise ühikuks on fikseeritud kalor [1].

Kaloriks nimetatakse soojushulka, mis on vajalik 1 g destilleeritud vee soojendamiseks 1° võrra [2].

Lühendatult kalorit tähistatakse **cal**.

[1] Ladinakeelsest sõnast *calor* — kuumus.

[2] Täpsemalt 19,5°-st kuni 20,5°-ni.

TARTU ÜLIKOOLI RAAMATUKOGU

1000 kalorit moodustavad 1 kilokalori
Lühendatult tähistatakse kilokalorit **kcal**.
Kilokalor on soojushulk, mis on vajalik 1 kg destilleeritud vee soojendamiseks 1^0 võrra.[1]

38. Aine erisoojus. Füüsika algkursusest on teada, et erinevad ained vajavad võrdsetes tingimustes soojenemiseks erinevat soojushulka; vastupidiselt nad soojenevad erinevate temperatuurideni võrdsete soojushulkade saamisel, kui muud tingimused on samad.

Erinevate ainete soojuseliste omaduste iseloomustamiseks on võetud tarvitusele eriline suurus, mida nimetatakse erisoojuseks.

Aine erisoojust mõõdetakse selle soojushulgaga, mis on vajalik 1 g aine soojendamiseks 1^0 võrra.

Sama soojushulka, mis on arvuliselt võrdne erisoojusega, eritab 1 g ainet jahtumisel 1^0 võrra.

Erisoojuse ühiku nimetuseks on

$$\frac{\text{kalor}}{\text{gramm} \cdot \text{kraad}} \quad \left(\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{kraad}}\right).$$

Kerge on taibata, et arv, mis iseloomustab aine erisoojust, jääb samaseks, kui väljendada teda

$$\frac{\text{kilokalorites}}{\text{kilogramm} \cdot \text{kraad}} \quad \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{kraad}}\right).$$

39. Soojushulga valem soojendamisel ja jahtumisel. Algkursusest on teada, et kui seatina erisoojus on $0{,}03 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{kraad}}$, siis 100 g seatina soojendamiseks 1^0 võrra on vaja soojust 100 korda rohkem kui 1 g soojendamiseks, s. o. $3 \frac{\text{cal}}{\text{kraad}}$, 100 g seatina soojendamiseks 50^0 võrra on aga vaja soojust 50 korda rohkem, s. o. $0{,}03 \cdot 100 \cdot 50 = 150$ cal.

[1] Jahtumisel 1^0 võrra 1 g või 1 kg vett eritab vastava kalori.

Järelikult soojushulka, mis on vajalik antud keha soojendamiseks teatud arvu kraadide võrra, saame kolme teguri korrutamisel:

Erisoojus* × *keha mass* × *temperatuuride vahe.

Seda seost võib anda valemi kujul. Tähistame keha erisoojuse c-ga, keha massi m-ga, esialgse temperatuuri t_1-ga, lõpp-temperatuuri t_2-ga ja soojendamiseks vajaliku soojushulga Q-ga. Sel juhul $t_2 > t_1$ ja temperatuuri tõus on $t_2 - t_1$.

1 g aine soojendamiseks 1^0 võrra vajatakse c cal
m „ „ „ 1^0 „ „ cm „
m „ „ „ $t_2 - t_1$ „ „ $cm\ (t_2 - t_1)$ cal.

Seepärast soojendamiseks temperatuurist t_1 kuni t_2 on vajalik soojushulk

$$\boxed{Q = cm\ (t_2 - t_1).} \qquad \text{(IV-a)}$$

Kui keha jahtub, siis $t_1 > t_2$ ja jahtumise juures äraantav soojushulk väljendub eelmise valemi järgmise eri kujuga:

$$\boxed{Q = cm\ (t_1 - t_2).} \qquad \text{(IV-b)}$$

Kui keha mass on avaldatud kilogrammides, siis arutelles analoogiliselt eelmise arutlusega, saame samad valemid (IV-a) ja (IV-b) selle vahega, et Q on avaldatud kilokalorites.

Korrutis cm näitab soojushulka, mis keha saab soojenemisel 1^0 võrra, või mis ta ära annab jahenemisel 1^0 võrra, ja seda nimetatakse keha soojusmahtuvuseks.

40. Soojusliku tasakaalu (soojusbilansi) võrrand. Erinevate temperatuuridega kehad annavad üksteisele soojust. Üldiselt annavad kõrgema temperatuuriga kehad osa oma soojusest madalama temperatuuriga kehadele seni, kuni nende temperatuurid pole muutunud võrdseteks.

Seejuures toimub soojuse vahetus kehade vahel kuni temperatuuride võrdseks muutumiseni soojusnähtuste kohta rakendatud energia jäävuse seaduse põhjal ja nimelt:

Soojushulk, mis on ära antud kõigi jahenenud kehade poolt, on võrdne soojushulgaga, mille on saanud kõik soojenenud kehad, kui seejuures pole toimunud soojuse muundumist mingiks teiseks energia liigiks.

Kõikide kehade soojusevahetuse kohta käivate arvutuste juures tuleb kokku võtta see soojushulk, mis vaadeldavates soojusnähtustes kehade poolt ära antakse, ja see soojushulk, mis teiste samas nähtuses esinevate kehade poolt saadakse; mõlemad need soojushulgad on omavahel võrdsed.

Rakendame seda olukorda kahe erinevate temperatuuridega vedeliku segamisel.

Tähistame külmema vedeliku hulga m_1-ga, tema erisoojuse c_1-ga ja tema temperatuuri enne segamist t_1-ga. Samad suurused soojema vedeliku jaoks olgu m_2, c_2 ja t_2. Segu lõpptemperatuuri tähistatakse harilikult kreeka tähega Θ (teeta). Siis:

Jahenev keha annab soojushulga	*Soojenev keha saab soojushulga*
$Q = c_2 m_2 (t_2 - \Theta)$.	$Q = c_1 m_1 (\Theta - t_1)$.

Kuna jahenevate kehade poolt antud soojushulk on võrdne soojenevate kehade poolt saadud soojushulgaga, siis:

$$c_2 m_2 (t_2 - \Theta) = c_1 m_1 (\Theta - t_1). \qquad \text{(IV-c)}$$

Sellest põhivõrrandist võib leida mistahes suuruse; määrame segu lõpptemperatuuri Θ väärtuse:

$$c_2 m_2 t_2 - c_2 m_2 \Theta = c_1 m_1 \Theta - c_1 m_1 t_1;$$
$$c_1 m_1 t_1 + c_2 m_2 t_2 = c_1 m_1 \Theta + c_2 m_2 \Theta;$$
$$c_1 m_1 t_1 + c_2 m_2 t_2 = (c_1 m_1 + c_2 m_2) \Theta;$$

kust

$$\Theta = \frac{c_1 m_1 t_1 + c_2 m_2 t_2}{c_1 m_1 + c_2 m_2}.$$

See võrrand oli tuletatud vee kohta Lomonossovi kaasaegse Peterburi akadeemiku Richmani poolt.

Esialgselt saadud võrrand (IV-b) kannab soojusliku tasakaalu võrrandi nime.[1]

Näiteid: 1. Leida segu temperatuur, kui segatakse $m_1 = 100$ g vett temperatuuril $t_1 = 40^0$ veega, mille $m_2 = 160$ g temperatuuriga $t_2 = 16^0$; $c_1 = c_2 = 1 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{kraad}}$:

$$\Theta = \frac{1 \cdot 100 \cdot 40 + 1 \cdot 160 \cdot 16}{1 \cdot 100 + 1 \cdot 160} = \frac{4000 + 2560}{260} = \frac{656}{26} \approx 25{,}2^0.$$

Samast võrrandist võib määrata mistahes teise suuruse: aine massi, mida segada tuleb, algtemperatuuri või lõpptemperatuuri.

2. Kui palju tuleb veele, mille $m_1 = 100$ g ja temperatuur $t_1 = 16^0$, juurde valada vett, mille temperatuur on $t_2 = 80^0$, et segu lõpptemperatuur oleks $\Theta = 40^0$.

Tähistame $m_2 = x$ ja koostame võrrandi:

$$1 \cdot x\,(80 - 40) = 1 \cdot 100\,(40 - 16); \qquad 40x = 2400; \qquad x = 60;$$
$$m_2 = 60 \text{ g}.$$

Soojusliku tasakaalu võrrandit rakendatakse paljude küsimuste lahendamisel.

1. Soojusliku tasakaalu võrrandil põhineb aine erisoojuse arvutamine. VII klassi laboratoorses töös mõõdeti aine erisoojust segamismeetodi abil. Tuletame meelde töökäiku: me leidsime kalorimeetri massi m_1, vee

---

[1] Kõikides järgnevates kalorimeetrilistes võrrandites pole arvesse võetud soojushulka, mis läheb õhu, termomeetri ja teiste kehade soojendamiseks. Samuti pole arvestatud soojusekadu kiirgamise teel.

massi m_2, mis oli valatud kalorimeetrisse, ja uuritava keha massi m; siis soojendasime uuritavat keha, mõõtsime vee ja kalorimeetri algtemperatuuri t_1, soojendatud uuritava keha algtemperatuuri t, lasksime uuritava keha kalorimeetri vette ja mõõtsime lõpptemperatuuri Θ.

Tähistame kalorimeetri erisoojuse c_1-ga, vee oma c_2-ga ja uuritava keha oma c-ga.

Koostame soojusliku tasakaalu võrrandi, arvestades, et $t_1 < \Theta < t$:

Jaheneva keha poolt antud soojushulk:	*Soojenevate kehade poolt saadud soojushulk:*
$Q = cm\,(t - \Theta)$.	kalorimeetri poolt $Q_1 = c_1 m_1 (\Theta - t_1)$; vee poolt $Q_2 = c_2 m_2 (\Theta - t_1)$.

$Q = Q_1 + Q_2$; $cm\,(t - \Theta) = c_1 m_1 (\Theta - t_1) + c_2 m_2 (\Theta - t_1)$,

kust

$$C = \frac{c_1 m_1 (\Theta - t_1) + c_2 m_2 (\Theta - t_1)}{m (t - \Theta)} = \frac{(c_1 m_1 + c_2 m_2)(\Theta - t_1)}{m (t - \Theta)}.$$

Rakendame seda valemit seatina erisoojuse määramisel, kui $m_1 = 60$ g ja kalorimeeter on tehtud valgevasest erisoojusega $c_1 = 0{,}09$; $m_2 = 200$ g; $t_1 = 16^0$; $m = 120$ g; $t = 100^0$; $\Theta = 17{,}4^0$; $c = x$:

$$x \cdot 120\,(100 - 17{,}4) = (0{,}09 \cdot 60 + 1 \cdot 200)\,(17{,}4 - 16);$$
$$120 \cdot 82{,}6\,x = 205{,}4 \cdot 1{,}4;\quad 9912\,x = 287{,}56;$$
$$x \approx 0{,}03;\quad c = 0{,}03\,\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{kraad}}.$$

2. Kalorimeetrilise meetodi abil võib määrata keha temperatuuri (näiteks gaasilambi leegi teatud osa temperatuuri).

Selleks võetakse mingi tahke keha (näiteks tükk rauda), leitakse tema mass ($m = 100$ g) ja asetatakse gaasipõleti leegisse. Raua kuumenemise ajal leitakse kalorimeetri mass m_1

(näiteks 90 g, valgevask) ja kalorimeetrisse valatud vee mass ($m_2 = 250$ g) ja mõõdetakse just enne keha kalorimeetrisse laskmist vee ja kalorimeetri algtemperatuur ($t_1 = 16^0$). Siis lastakse kuumendatud keha kalorimeetri vette ja mõõdetakse segu lõpptemperatuur ($\Theta = 45^0$).

Raua erisoojus $c = 0{,}1$; valgevasel $c_1 = 0{,}09$; veel $c_2 = 1$.

Tähistame kuumendatud keha temperatuuri enne vette laskmist x-ga.

Jaheneva keha poolt antud soojushulk:	*Soojenevate kehade poolt saadud soojushulk:*
$Q = cm\,(x - \Theta)$.	kalorimeetri poolt $Q_1 = c_1 m_1\,(\Theta - t_1)$; vee poolt $Q_2 = c_2 m_2 (\Theta - t_1)$;

$$Q = Q_1 + Q_2;\quad cm\,(x - \Theta) = (c_1 m_1 + c_2 m_2)\,\Theta - t_1);$$

$$0{,}1 \cdot 100\,(x - 45) = (0{,}09 \cdot 90 + 1{,}250)\,(45 - 16);$$

$$10x - 450 = 7484{,}9;\quad 10x = 7934{,}9;\quad x = 793{,}5;\quad t \approx 793{,}5^0.$$

Harjutus 3.

1. Priimusel on soojendatud 2 l vett 16^0-st kuni 100^0-ni 15 minuti jooksul. Kuipalju neelas vesi soojust ühes minutis (oletada, et soojenemine on ühtlane)?

   Vastus: 11,2 kcal.

2. Kui palju kulub soojust 40 kg seatina soojendamiseks 10^0-st kuni 320^0-ni?

3. 1 kg rauda jahenes 600^0-st kuni 24^0-ni. Kui palju eraldus sellejuures soojust?

4. Vanni on kallatud 300 l vett temperatuuriga $t_1 = 10^0$. Kui palju tuleb sellesse vanni kuuma vett $t_2 = 90^0$ juurde kallata, et tekiks segu temperatuuriga $\theta = 35^0$?

   Vastus: 136 l.

5. Segati 20 l vett temperatuuriga $t_1 = 12^0$ 40 l veega temperatuuriga $t_2 = 80^0$. Arvutada segu lõpptemperatuur, kui segamise juures läks õhku 100 kcal soojust.

   Vastus: $\approx 56^0$.

6. Arvutada valgevase erisoojus järgmiste andmetega: 400 g valgevaske temperatuuriga 100° lasti 300 g vette, mille temperatuur oli 14°. Vee temperatuur tõusis 23,5°-ni.

7. Leida 500 g-se rauatüki algtemperatuur, kui lastes teda 500 g vette, mille temperatuur on 10°, kujuneb lõpptemperatuur 18,9°-seks.

Vastus: 100°.

8. Kui palju on vaja soojust, et soojendada toa õhku 7°-st 16°-ni, kui toa mõõted on 10 m × 5 m × 3 m ja soojuskadu seinte kaudu moodustab 10%?

Vastus: ≈ 465 kcal.

9. Missuguses vahekorras on soojushulgad, mis on vajalikud ühesuguste ruumaladega raua- ja vasetüki soojendamiseks võrdse arvu kraadide võrra?

41. Soojus ja töö. Juba XVIII sajandi lõpul täheldati nähtusi, mida polnud võimalik seletada flogistoni teooriaga. 1798. a. pani Rumford tähele, et kahurite torude puurimise juures tekib suur soojushulk. Kui puuritav ese ja puur asetati vette, siis kahe tunni jooksul vesi soojenes keemiseni. Mõõtmised lükkasid ümber flogistoni pooldajate katsed seletada seda soojenemist sellega, et laastudel on väiksem erisoojus ning järelikult nad eritavad liigset flogistoni: mõõtmise tulemused aga näitasid, et massiivne rauatükk ning selle laastud evivad ühte ja sama erisoojust. Rumford tuli järeldusele, et soojus kujutab endast teatud liikumise vormi.

Järgneva purustava löögi flogistoni teooriale andis Davy 1799. a. Ta teostas kahe jäätüki hõõrumist, mis olid paigutatud õhuta ruumi —2° temperatuuri juures. Jäätükid sulasid vastastikuse hõõrdumise tõttu. Vee erisoojus on suurem jää erisoojusest; seepärast ei saanud sulamist seletada flogistoni eritamisega. Siin tekkis soojus töö arvel.

Jätkamata selle küsimuse arutamist ajaloolises järjekorras toome mõned paljudest näidetest soojuse tekkimise kohta töö arvel ja töö tekkimise kohta soojuse arvel. Tõepoolest, on loomulik küsida, milleks muundub keha kineetiline energia neil juhtudel, kui ei ole keha tema osade edasisi nähta-

vaid ümberpaigutumisi, näiteks mitteelastse keha mahakukkumisel, vasara löögil vastu rauatükki, hõõrdumisega liikumisel, kuuli põrkamisel vastu kiviseina jms. Kuuli põrkamisel vastu seina on kuulda häält; kuid kui välja arvutada tekkinud hääle energia, siis osutub see palju väiksemaks kuuli kineetilisest energiast. Kuuli lähemalt uurides leiame tema temperatuuri kõrgenemist. Soojenemiseks vajalik soojus tekibki muus suhtes kasutamata jäänud lendava keha kineetilise energia arvel. Sellist kineetilise energia muundumist soojuseks kasutab tehnika juba ammust ajast: vasaralööja muundab oma lihaste energia tõstetud vasara potentsiaalseks energiaks; vasara langemisel rauatükile muundub tema potentsiaalne energia kineetiliseks. Löögi momendil, kui vasara liikumine lakkab, muundub tema kineetiline energia soojuseks ja rauatükk ning samuti ka vasar soojenevad (osa kineetilisest energiast muundub ikkagi teisteks energia liikideks: hääle energiaks, vasaras tekkivate elastsete muutuste potentsiaalseks energiaks, mis kutsuvad esile tema tagasipõrkamise, küljest äralöödavate osade liikumise energiaks, löödava keha deformeerimise tööks).

Iga mehhanismi juures tuleb ette liugumise või veeremise hõõrdumist, seepärast kulub osa kineetilisest energiast paratamatult hõõrdumise ületamiseks ja selle energia osa arvel tekib hõõrduvate osade soojenemine.

Nii soojenevad kõikide rataste teljed puuduliku määrimise juures, s. t. suure hõõrdumise puhul on võimalik laagrite sulamine, pukside põlemine; soojenevad rööpad, mida mööda sõidab rong; soojenevad töö juures saed, höövlid, puurid, kirved ja teised tööriistad. Hõõrdumise ületamiseks kulutatud töö muundub soojuseks mitte ainult töötavates mehhanismides. Igasugune liikuv keha kaotab liikumist takistavas keskkonnas osa oma kineetilisest energiast ning soojeneb selle arvel. Niinimetatud „langevad" tähed, mis on

planeetidevahelises ruumis liikuvad aine osakesed, sattudes maa-atmosfääri, kohtavad takistust oma liikumisele, kaotavad osa oma kineetilisest energiast ning selle energia arvel saavad nii suure soojushulga, et põlevad õhus ära järsu helendamisega 100 kuni 200 km kõrgusel; nad jätavad enda järel heledaks kuumendatud õhu jälje ning tekitavad langeva tähe mulje. Nagu oli märgitud eespool, oskas ürgaja inimene saada tuld kahe puutüki hõõrumisega, muundades mehaanilist tööd soojuseks.

Seega *kineetilise energia ja töö osaline muundamine soojuseks toimub igas takistusega liikumises.*

Teiselt poolt, soojus võib muutuda tööks. Päikese kiired, soojendades vett või maa kaudu õhku, sooritavad tööd veeauru ja õhu tõstmiseks, nende tõusvate õhuvoolude tekitamiseks, mis põhjustavad tuult, tema kineetilist energiat ja vee ringkäiku maa peal.

Samasugune soojuse üleminek tööks teostub inimese poolt leiutatud masina abil. Aurumasinad ja sisepõlemise mootorid teostavad pidevalt soojuse muundamist tööks ja kineetiliseks energiaks. Siinsamas aga on vaja märkida, et kehale antud kogu soojus ei muundu tööks; osa soojusest hajub ruumi. Soojusmasinad paremal juhul muudavad tööks umbes kolmandiku neile antud soojusest.

VII klassi füüsika kursusest on teada, et elektrienergia läheb üle soojuseks; praegu tegime kindlaks, et soojus läheb üle tööks ja ümberpöördult; edaspidi meie tutvume sellega, et soojuse juurdevoolu arvel võib saada elektrivoolu, s. o. jälle elektrienergiat.

Need mitmesuguste energialiikide vastastikused üleminekud soojuseks ja ümberpöördult soojusest muudeks energialiikideks viivad järeldusele, et s o o j u s o n e n e r g i a.

42. Soojuse mehaaniline ekvivalent. Töö ja soojuse vastastikuste üleminekute kvalitatiivsed vaatlused ei andnud veel alust soojuse teaduslikule teooriale. Oli vaja selgitada,

kas on kindlat kvantitatiivset seost kulutatud tööhulga ja tekkinud soojushulga vahel. Ainult sellise seose kindlus ja jäävus võisid olla aluseks väitele, et soojus on energia.

Selle seose iseloomustamiseks kasutatakse erilist suurust, mida nimetatakse soojuse mehaaniliseks ekvivalendiks.

Soojuse mehaaniliseks ekvivalendiks on tööhulk, mida tuleb kulutada, et saada ühte soojushulga ühikut.

Kui tähistada kulutatud tööhulka A-ga, selle töö arvel saadud soojushulka Q-ga, soojuse mehaanilist ekvivalenti I-ga, siis

$$\boxed{I = \frac{A}{Q}.} \qquad \text{(V)}$$

Saksa arst Robert Mayer määras 1842. a. (teoreetiliselt) soojuse mehaanilise ekvivalendi.

Pärast teda määrati seda suurust paljude füüsikute poolt väga mitmesuguste eksperimentaalsete meetodite abil. Eriti palju (umbes 10 aastat) töötas sel alal inglise füüsik James Joule, kes oma tööd algas 1840. a.

Praegusel ajal on tarvitusel, kui täpseimad, järgmised soojuse mehaanilise ekvivalendi väärtused:

$$I = 427\ \frac{\text{kGm}}{\text{kcal}}$$

$$I = 4{,}19\ \frac{\text{kdž}}{\text{kcal}},\ \text{või}\ 4{,}19\ \frac{\text{dž}}{\text{cal}}\ \text{(ümardatult}\ 4{,}2\ \frac{\text{dž}}{\text{cal}}\text{)}.$$

Vastupidise ülemineku puhul soojusest tööks iga tööks muundunud kilokalori arvel saadakse 427 kGm tööd.

Soojuse mehaanilise ekvivalendi pöördarvu nimetatakse töö termiliseks ekvivalendiks.

Töö termiliseks ekvivalendiks on soojushulk, mis tuleb kulutada, et saada ühte tööhulga ühikut.

Kui selleks, et saada A ühikut tööd, kulus Q ühikut soojust, siis ühe tööühiku jaoks vajatakse $\frac{Q}{A}$ soojusühikut.

Kui töö termilist ekvivalenti tähistada tähega B, siis:

$$B = \frac{Q}{A} = \frac{1}{I}.$$

$B = 0{,}00234 \frac{\text{kcal}}{\text{kGm}}$ ehk $B = 0{,}24 \frac{\text{kcal}}{\text{kdž}}$ ehk $0{,}24 \frac{\text{cal}}{\text{dž}}$.

43. Soojuse mehaanilise ekvivalendi määramine Joule'i poolt. Soojuse mehaanilise ekvivalendi katselise mõõtmise

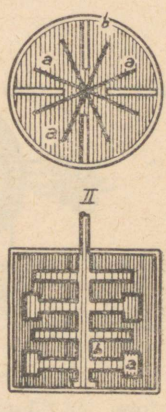


Joule[1] (1818—1889).

viis läbi inglise füüsik Joule (1847. a.). Joule'i meetodi järgi muundub hõõrdumise ületamiseks tehtud töö soojuseks. Soojuse mehaanilise ekvivalendi arvutamiseks tuleb arvutada sooritatud töö ja saadud soojushulk. Soojust mõõdetakse kalorimeetri abil, mille ehitust muudetakse nii, et tema sees oleks kerge tekitada hõõrdumist. Selleks otstarbeks asetatakse kalorimeetri sisse pöörlev osa, mis kujutab endast telge selle külge kinnitatud labadega a (joon. 41); need labad asetatakse kalorimeetri seintesse ehitatud väljaulatuvate osade b vahele. Kalorimeeter täidetakse vedelikuga,

[1] J. P. Joule — inglise füüsik, tuntud rea eksperimentaalsete uurimiste poolest mitmest füüsika osast.

näiteks elavhõbedaga. Pööramisel panevad labad elavhõbeda liikuma; liikumise ajal toimub elavhõbedas hõõrdumine ja ta soojeneb. Kalorimeetrisse asetatud termomeetri abil mõõdetakse esialgne temperatuur $t_1{}^0$, ja lõpptemperatuur $t_2{}^0$. Telje pööramiseks mähitakse võllile A (joon. 42) kaks nööri, mis eemalduvad võllist kahes vastaspunktis. Üle plokkide D ja C visatud nööri vabadele otstele on riputatud võrdsed koormused F ja E kumbki kaalult P kilogrammi. Koormuste langemisel kerivad mõlemad nöörid ühel ajal end võllilt lahti ja panevad viimase pöörlema. Koormuste langemise teed H võib mõõta mõõtjoonlaua B ja G abil. Päris langemise alguses on koormuste liikumine kiirenev, kuid ta muutub õige ruttu ühtlaseks. Kui koormused üldise kaaluga $2P$ langevad h meetri ulatuses, siis on sooritatud töö $A = 2Ph$ (koormuste kerget lööki põranda vastu ei arvestata).



Joon. 41. I — Joule'i kalorimeetri horisontaalne läbilõige, II — vertikaalne läbilõige.

Koormuste ühtlasel langemisel kulutatud töö muundub hõõrdumise läbi soojuseks. Kui tähistada elavhõbeda massi m-ga, kalorimeetri, telje ja labade massi m_1-ga, elavhõbeda erisoojust c-ga ja metalli erisoojust c_1-ga, siis saadud soojushulk on

$$Q = mc(t_2 - t_1) + m_1c_1\,(t_2 - t_1) = (mc + m_1c_1)\,(t_2 - t_1);$$

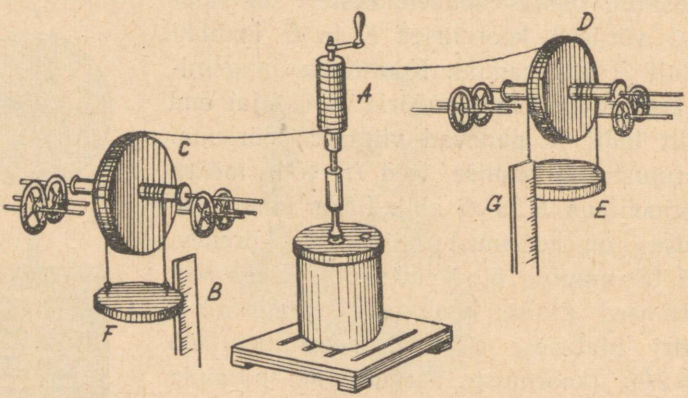
siis võib arvutada:

$$J = \frac{A}{Q} = \frac{2Ph}{(mc + m_1c_1)\,(t_2 - t_1)}.$$

44. Energia muundumise ja jäävuse seaduse rakendamine soojusnähtustes. Looduses toimub alaline mehaanilise energia ja soojuse vastastikune muundumine. Hoolikad teaduslikud mõõtmised näitasid, et need üleminekud toimuvad

alati kindlas vahekorras. 427 kGm-ne mehaanilise energia hulk osutub samaväärseks ehk ekvivalentseks ühe kilokalori soojusega (4,19 dž on ekvivalentne 1 kaloriga).

Need mõõtmised näitasid, et mõlemate energiavormide vastastikuste üleminekute puhul energiat ei kao ega tule juurde.



Joon. 42. Joule'i katseseade soojuse mehaanilise ekvivalendi määramiseks.

Soojusnähtuste tundmaõppimine sellelt seisukohalt lubab energia jäävuse seadust, mis on kehtiv mehaanilistes protsessides, üldistada ka soojusnähtustele.

Energia muundumise ja jäävuse seadust võib üldisel kujul väljendada järgmiselt:

Loodusnähtustes energia ei kao ega teki, vaid ainult muundub ühest liigist teiseks võrdsetes hulkades.

Energia muundumise ja jäävuse seadusel on suur metodoloogiline väärtus. Selle seaduse alaline rakendamine üksikute nähtuste arutelus loob kindla usu kõikide loodusnäh-



Lomonossov (1711—1765).



Mayer (1814—1878).



Helmholtz (1821—1894).

tuste muutumatutesse seaduspärasustesse ja õpetab rangelt teaduslikult mõtlema.

Mõtte teaduslik suund on paremaks toeks võitluses religioosse suhtumisega maailmasse. Religioon eeldab olevuse

olemasolu, kes segab end loodusnähtustesse, mõjutab inimese elu ja loodusnähtuste käiku. Siit siis tuleb kõikides religioonides esinev usk imesse kui selle olevuse tahte väljendisse. Üldise energia jäävuse seaduse ja kõikide loodusnähtuste seaduspärasuse vaimus kasvatatud mõte ei leia looduses kohta jumalale ja imele. Sellesamaga lüüaksegi pind alt religioonil kui usul kõrgemasse olevusse ja imel kui tema tahte väljendusel.

Energia jäävuse seaduse väljendas teaduses esimesena M. Lomonossov [1]. Selle looduse põhilise seaduse edasised suuremad väljakujundajad ja põhjendajad olid P. Mayer[2], H. Helmholtz[3] ja Joule.

45. *Laboratoorne töö 4.* Keha erisoojuse määramine.

Töövahendid: 1) kalorimeeter; 2) kaalud vihtidega; 3) termomeeter; 4) soojendaja; 5) mitmesugused metallitükid ja kolvid vedelikkudega.

Ülesanne 1. *Määrata tahkes olekus aine erisoojus.*

Töökäik. 1. Leida katsekeha mass.

---

[1] Lähemalt M. Lomonossovist vaata § 63.

[2] Mayer, Julius Robert (1814—1878) — saksa arst ja füüsik. Avaldas 1841.—1842. a. tööd, milledes 100 aastat peale Lomonossovit väljendas ja kaitses energia jäävuse mõtet. Seda mõtet Mayer rakendas mõningate organismis toimuvate protsesside seletamiseks. Tema tuletas esimesena teoreetiliselt soojuse mehaanilise ekvivalendi.

[3] Hermann Helmholtz sündis Potsdamis, Berliini ligidal. Hariduselt arst, oli füsioloogia ja anatoomia professoriks Königsbergis. 1847. a. ta andis range matemaatilise käsitluse energia jäävuse seadusele. Määras teoreetiliselt elektri elementaarlaengu suuruse. Töötas välja pöörisliikumise teooria. Lõi hääle ja värvide tajumise õpetuse. Hääle õpetuses pani aluse tänapäeva resonantsi õpetusele, andis hääle tämbri, dissonantsi ja konsonantsi seletuse, tegi omaleiutatud resonaatorite abil vokaalide analüüsi ja hiljem heliharkide abil hääle sünteesi.

2. Kirjutage mass ja teised andmed tabelisse:

Katse nr.	Kalorimeetri mass ilma veeta	Kalorimeetri mass veega	Vee mass	Keha mass	Vee ja kalorimeetri temperatuur	Keha temperatuur	Segu lõpptemperatuur	Erisoojus	%-des avaldatud vead

3. Sidunud katsekeha niidi otsa, laske ta soojendajasse, kus hoidke 10—15 minutit.

4. Leidke kalorimeetri sisemise anuma mass.

5. Kaaluge kalorimeeter ühes veega ja määrake vee mass.

6. Asetage kalorimeetri sisemine silinder välimisesse.

7. Segades kalorimeetris vett segajaga, määrake vee ja kalorimeetri temperatuur.

8. Kohe pärast vee temperatuuri määramist kalorimeetris, märkinud temperatuuri soojendajas, võtke keha ruttu välja soojendajast ja laske kalorimeetrisse.

9. Segades vett kalomeetris segajaga, märkige ära kõrgeim temperatuur; see on lõpptemperatuur.

10. Saadud andmetega arvutage aine erisoojus.

11. Võrrelge saadud resultaati tabeli suurustega ja avaldage vea suurus protsentides.

12. Tehke mõõtmisi teiste kehadega.

Ülesanne 2. *Määrata mingi vedeliku erisoojus.*

1. Leidke metallitüki mass, mille erisoojus on teada.

2. Mass ja teised andmed kandke tabelisse. Üleskirjutamise skeem koostage ise.

3. Leidke kalorimeetri sisemise anuma kaal.

4. Valage kalorimeetrisse niipalju vett, et võetud metallitükk saab üleni sukelduda vedelikku, ja leidke vedeliku mass grammides.

5. Määrake vedeliku temperatuur, segades teda ettevaatlikult segajaga otse enne kuumendatud keha kalorimeetrisse laskmist.

6. Kohe pärast vedeliku temperatuuri määramist, märkinud temperatuuri soojendajas, võtke kuumendatud keha kiiresti välja soojendajast ja laske ta vette.

7. Segades segajaga vett, millesse on lastud keha, määrake lõpptemperatuur.

8. Arvutage vedeliku erisoojus.

9. Võrrelge resultaati tabeli andmetega ja leidke protsentuaalne viga.

46. *Laboratoorne töö 5.* Tugevasti kuumendatud keha temperatuuri määramine kalomeetrilisel viisil.

T ö ö v a h e n d i d: 1) kalorimeeter; 2) kaalud vihtidega; 3) väike tükk metalli (50—100 g rauda); 4) tükk traati, mis on otsast painutatud nii, et tema abil saab hoida metallitükki; 5) termomeeter.

1. Leidke kalorimeetri sisemise silindri kaal ja kandke tulemus tabelisse:

Katse nr.	Kalorimeetri mass	Kalorimeetri mass koos veega	Vee mass	Vee temperatuur	Metallitüki mass	Metalli erisoojus	Segu temperatuur	Soojendatud keha temperatuur

2. Valage kalorimeetrisse külma vett.

3. Kaaluge ära kalorimeeter ühes veega ja määrake vee mass.

4. Kaaluge metallitükk.

5. Võtke tükk metalli, keerake sellele traat ümber ja hoidke teda piirituslambi leegis.

6. Kuumendage mitu minutit.

7. Segage enne ja siis määrake vee temperatuur kalorimeetris.

8. Kohe pärast vee temperatuuri määramist nihutage kalorimeeter leegile ligemale ja laske kumendatud metallitükk ruttu vette.

9. Viige kalorimeeter leegist eemale ja segajaga segades määrake lõpptemperatuur.

10. Missugune oli metalli temperatuur enne vette laskmist?

47. Soojuse allikad. Me nägime, et soojust võib saada kulutatud töö arvel. Löök, hõõrumine, kokkusurumine, painutamine ja teised mehaanilised toimingud muundavad mehaanilise energia tööks.

Tunduv osa soojusest Maa peal saadakse päikese kiirgusenergiast. Kiirgusenergiaks nimetatakse energiat, mida kehadest väljub kiirte näol. Kui keha temperatuur tõuseb üle 500°, siis osa tema kiirgusenergiast avaldab mõju silmale ja seda tajutakse valgusena (sel juhul punase valgusena). Üle 1200° temperatuuri juures see energia osa, mis avaldab mõju silmale, tekitab valge valguse muljet [1].

Kui ühe keha kiirgusenergia absorbeeritakse (neelatakse) teise keha poolt, siis enamus sellest muundub soojuseks, mis soojendab absorbeerivat keha.

Maa saab kiirgusenergiat hiiglasuurel hulgal Päikeselt. Meie laiuskraadides langeb päikesekiirtega risti asetatud

[1] Kehadest väljuv kiirgusenergia avaldab peale valguse toime veel teisigi toimeid, mida käsitellakse kursuse kolmandas osas.

maapinna 1 cm^2-le 1 minutis keskmiselt umbes 1 kalor või 4,19 dž kiirgusenergiat. Umbes sama suur hulk päikese kiirgusenergiast, mis jõuab Maani, absorbeeritakse atmosfääri mitmesuguste kihtide poolt [1]. Võib kujutella, kui suur on kogu kiirgusenergia hulk, mis langeb tervele maapinnale aasta jooksul. Võrreldes päikese kiirgusega on tähtede kiirgusenergia minimaalne [2].

Suurem osa päikese kiirgusenergiast kaob ilma kasu toomata inimestele ja maale; ta peegeldub maapinnalt, minnes tagasi maailmaruumi.

Teine osa absorbeeritakse Maa poolt ja muundub temas soojuseks; selle, Maa poolt absorbeeritud päikeseenergia arvel säilib maapinna keskmine aastatemperatuur 15° ümber.

Absorbeeritud kiirgusenergiast saadud soojus kutsub esile vee aurumise ja vee auru tõusmise üles ning tekitab maapinnal vee ringkäigu, millest üheks osaks on vee voolamine ojades ja jõgedes.

Sama energia tekitab ka tuultes avalduvat ringkäiku atmosfääris. Tuule ja vee kineetiline energia võlgneb oma olemasolu Maa poolt absorbeeritud päikese kiirgusenergia soojusele.

Hüdrauliline võimsus (voolava vee võimsus) maakeral on umbes 800 000 000 HJ. Oma tootmistegevuses inimesed tarvitavad laialt ja edaspidi hakkavad veel laiemalt tarvitama vee ja tuule kineetilist energiat masinate liikumapanemiseks.

---

[1] Atmosfääri piirile langeb 1,94 $\frac{cal}{cm^2\,min}$ („päikese konstant").

[2] Kõikidelt planeetidelt ja kinnistähtedelt Maa peale langevate kiirguste osad kokku moodustavad päikese kiirgusest $\frac{1}{30000000}$ (Newcomb'i järgi). Maa sisemusest tulev soojusvool moodustab iga ruutsentimeetri kohta Maa pinnast ainult 55 väikest kalorit aastas, s. o. umbes ühe kümnetuhandiku päikese kiirgusest, mis langeb samale pinnale.

Niisiis võib järelikult öelda, et nad oma tuule- ja veeseadistes lõppkokkuvõttes kasutavad päikeseenergiat.

Meie Liidus on juba rakendatud tööle paljud jõujaamad vee energia kasutamiseks, nende hulgas ka niisugune grandioosne nagu Dnepri oma; on ettevalmistusel veel grandioossemad — Volgal ja Angaral.

Päikese neeldunud kiirgusenergia muundub osaliselt jällegi kiirgusenergiaks ja kiirgab Maalt tagasi maailmaruumi. See avaldub Maa temperatuuri langemises nendel aegadel, kus on vähenenud või täiesti lakanud päikeseenergia langemine Maa peale, s. o. talvel ja öösel.

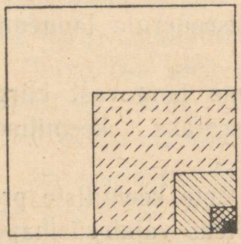
Eelmisega võrreldes väike osa Maale langevast kiirgavast energiast muundub iseliiki energiaks, keemiliseks energiaks.

Keemiliseks energiaks nimetatakse ainete keemiliste protsesside juures ilmnevat energiat. Nii näiteks vajab süsihappegaas kooste-osadeks lagunemiseks suurt energiahulka (umbes 8000 cal iga süsiniku grammi kohta). Sellepärast 1 süsiniku ja 2 hapniku aatomit, olles võimelised teineteisega ühinema, evivad energia varu (potentsiaalse energia liiki), mida nimetatakse keemiliseks energiaks. Vesiniku aatomi eraldamiseks kloori aatomist kulub 600 cal energiat iga kloorvesiniku grammi kohta. Vesiniku ja kloori aatomid, omades tungi ühineda, evivad keemilise energia varu. Nende ühinemise ajal muundub keemiline energia soojuseks ja iga kloorvesiniku grammi tekkimisel eritub 600 kalorit soojust. Nii ka teiste keemiliste protsesside juures toimub kas energia neelamine väljastpoolt või ümberpöördult, kehad annavad ära oma keemilise energia peaasjalikult soojuse näol (soojuse kaudu ka teiste energialiikidena).

Klorofülli terade poolt neelatud kiirgusenergia toimel lagunevad ainemolekulid, mis on tekkinud süsihappegaasi tungimisel terasse. Seejuures eritub hapnik, süsinik aga moodustab taimedes valkusid, rasvasid ja süsivesikuid. Süsiniku

ja hapniku keemilise suguluse tõttu saavad need kehad keemilise energia kandjaiks sel määral, kuipalju nende moodustumisel on kulunud kiirgusenergiat.

Kui luuakse soodsad tingimused ühe süsiniku aatomi ühinemiseks kahe hapniku aatomiga, s. o. kui algab põlemine, siis selle ainetepaari keemiline energia muundub soojuseks, eritades üle 8000 cal soojust põlemisprotsessist osavõtva süsiniku iga grammi kohta.



Joon. 43. Päikeseenergia kasutamine.

Süsiniku suure keemilise energia tõttu ja sellepärast, et see kergesti muundub soojuseks, kasutatakse süsinikuühendeid kütusena. Tehnika kasutab kütusena puid, turvast, kivisütt, naftat ja põlevkivi. Turvas ja kivisüsi tekkisid aeglaste keemiliste protsesside tulemusena väljasurnud taimedest, nafta aga ka väljasurnud loomadest — hapniku puudumise ja suure surve all olemise tingimustes. Nende põhiline põlevaine sisaldab keemilise energia tagavara, mis sinna on kunagi kogunenud päikese kiirgavast energiast.

Seega samuti kui vee ja tuule energia kujutab ka kütus endast päikese muundunud energiat.

Kuid taimed omandavad ainult tühise osa neile langevast päikeseenergiast. Taime hoogsa kasvamise perioodil võib roheline leht omandada kõige rohkem 8% temale langevast kiirgavast energiast (8% on füsioloogiline piir). Keskmiselt langeb see kuni 2%-ni (2% on tehniline piir). Kogu maismaa, mitte ainult taimestikuga kaetud osa suhtes langeb ärakasutamise protsent kuni 0,15-ni.

Kogu päikese kiirgust ($1{,}34 \cdot 10^{24}$ cal kogu Maale aastas) ja selle kasutamist taimede poolt võib kujutada järgmise diagrammiga [1] (joon. 43).

[1] Raamatust „В. М. Шульгина, Энергия Солнца".

Ruudu kogu pindala kujutab maismaale langevat päikese energiat; katkevate joontega kaetud ruut kujutab seda energia osa, mida omandaksid rohelised taimed, kui nende kasutegur oleks 100%. Pidevate joontega kaetud ruut näitab taimede poolt hoogsa kasvamise perioodil parimates tingimustes omandatud energiahulka; jämedate joontega kaetud ruuduke näitab, missugune osa maismaale langevast päikese energiast omandatakse taimede poolt keskmiselt (2%). Kui arvestada seda, et suur osa maismaast on kaetud kõrbetega, siis taimestiku kasutegur langeb kuni 0,15%-ni.

Muide, senini maakeral taimede poolt omandatud energia ületab ligi kümme korda selle energia hulga, mida inimene saab kütusest ja langevast veest.

Taimede kaudu teeb päikese energia veel teisegi muundumiskäigu. Taimed on toiduks loomadele ja taimedes varutud päikese energia muundub looma organismi energiaks. Kiskjad loomad, toitudes teistest loomadest, ammutavad endale energiat nendes varutud päikese energiast. Inimene ise oma kahte liiki toiduga — liha- ja taimtoiduga — saab endale energiat mõlemast allikast. Elavas organismis toimub järgmine energia muundumiskäik. Elav organism kasutab süsinikühendite keemilise energia näol akumuleerunud päikese kiirgusenergiat tema poolt tarvitatava taim- ja lihatoiduna. Need ühendid oksüdeeruvad sissehingatud hapniku toimel, sellejuures muundub keemiline energia organismi sisemiseks energiaks. Viimane muundub organismis enese eluliste protsesside (hingamine, vereringvool jt.) energiaks; tähelepandav osa sellest kiirgub ümbritsevasse ruumi (selle vähendamiseks tarvitame riideid ja elumaju), kulub sissehingatava õhu soojendamiseks ja ihu pinnalt vee aurustamiseks. Ainult väike osa saadud soojusenergiast (15—20%)[1] muundub kasulikuks tööks.

[1] Lühematel ajavahemikkudel võib muunduda tööks rohkem soojust.

48. Kütuse ja toidu soojusväärtus. Iga kilogrammi kütuse põlemisel eritub kindel arv kilokaloreid. Seda arvu nimetatakse kütuse soojusväärtuseks.

Täpselt samuti iga kilogramm toiduainet, põledes organismis või sellest väljaspool, eritab kindla arvu kilokaloreid. Viimast arvu nimetatakse toidu soojusväärtuseks ehk kalorsuseks.

Kütuse soojusväärtuseks nimetatakse seda kilokalorite arvu, mida eritab põlemisel 1 kg kütust.

Toidu kalorsuseks nimetatakse seda kilokalorite arvu, mida eritab põlemisel 1 kg toiduainet.

Kui tähistada põletatud kütuse hulka m-ga, soojusväärtust q-ga ja kütuse põlemisel saadud soojushulka Q-ga; siis soojushulka arvutatakse soojusväärtuse ja kütuse massi korrutisega, s. o.

$$Q = qm.$$

Arvutuste lihtsustamiseks on tehnikas tarvitusele võetud niinimetatud leppekütus (tingkütus) soojusväärtusega 7000 $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$.

Järgnevas tabelis on antud mitmesuguste kütusteliikide soojusväärtused ja nende võrdlus leppekütusega (kalorilised ekvivalendid).

Kütuse liik	Soojusväärtus kilokalorites 1 kg kohta	Ekvivalent
Leppekütus	7000	1,00
Doni kivisüsi	7005	1,00
„ antratsiit	7230	1,03
Moskva ümbruse pruun kivisüsi	3000	0,43
Tšeljabinski „ „	4755	0,68
Kuznetski (Leninski) „	6765	0,98
Sutšanski „	6970	0,99
Puud	3005	0,43

Kütuse liik	Soojusväärtus kilokalorites 1 kg kohta	Ekvivalent
Turvas (keskmine kõikides rajoonides)	3500	0,50
Surahhanõ nafta	10900	1,5
Balahna „	10500	—
Bensiin	11230	—
Petrool	11000	—
Masinaõli	10899	—
Põlevad gaasid	8000—9000	—

Harjutus 4.

1. Esitada järvepinnale langenud päikese-energia võimalikkude muunduste rida.

2. Esitada vihmapilve energia võimalikkude muunduste rida, kui selle vihm sajab Volhovi jõe basseini.

3. Leida priimuse kasutegur, kui 16^0 algtemperatuuriga 3 l vee keemaajamiseks vaskkastrulis, mille mass on 1 kg, kulutati 80 g petrooli. Vase erisoojus on $0{,}09 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{kraad}}$.

Vastus: $\approx 29{,}5\%$.

4. Vedur tarvitab ühes tunnis 1,5 kg kuznetski kivisütt iga hobujõu kohta. Leida veduri kasutegur η.

Vastus: $\approx 6\%$.

5. Kui palju kulub ühes tunnis naftat (soojusväärtus 10 500) 240 HJ-lise aurumasina töötamisel kasuteguriga $\eta = 12\%$?

Vastus: ≈ 120 kg.

6. 40 HJ-lisel autol, kasuteguriga $\eta = 20\%$, on bensiini tagavara 16 kg (soojusväärtusega 11 200). Mitme kilomeetri kaugusele jätkub sellest tagavarast, kui sõit toimub kiirusega 60 $\frac{\text{km}}{h}$?

Vastus: ≈ 85 km.

7. Seatinast kuul lendab kiirusega $200 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$. Mitme kraadi võrra ta soojeneb, kui ta äkki seisma jääb ja kogu energia soojuseks muundub? Seatina erisoojus on $0{,}03 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{kraad}}$.

Vastus: $\approx 160^0$.

8. Kui palju maksab ühe liitri vee soojendamine 20^0-st kuni 100^0-ni kannus, mille mass on 1,5 kg, erisoojusega 0,12 $\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{kraad}}$, kui kasutegur on 60% ja 1 hWh maksab 2,5 kop.?

9. Malmi sisse augu puurimisel avausse valatud 5 kg vett temperatuuriga $t = 10^0$ hakkas keema 5 min. pärast. Leida puuri võimsus hobujõududes (soojuskadusid mitte arvestada).

Vastus: 8,5 HJ.

10. 490 000 kG kaaluga ja 45 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ kiirusega rong peatatakse pidurite abil. Kui palju tekib sellejuures soojust?

Vastus: $\approx$ 9148 kcal.

11. Aururõhk aurumasina silindris on $p = 9\ \frac{\text{kG}}{\text{cm}^2}$. Kolvi pindala $s = 300\ \text{cm}^2$, kolvi käigu pikkus $l = 100$ cm; hooratta pöörete arv on 60 minutis; masina kasutegur $\eta = 12\%$. Määrata ühes tunnis tarvitatava nafta hulk, kui selle soojusväärtus on 10 000 $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$: a) kogu masina poolt, b) iga hobujõu kohta, arvestades, et ratta ühe pöörde kohta teeb kolb kaks käiku.

Vastus: $\approx$ 3,8 kg.

12. Leida diiselmootori kasutegur, kui ta tarvitab iga hobujõu kohta 0,2 kg naftat tunnis. Nafta soojusväärtus — 10 000 $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$.

Vastus: $\approx$ 0,3.

13. Kui suur on veevoolu võimsus hobujõududes, kui 1 sekundis voolab läbi 5,6 m^3 vett kiirusega 2,4 $\frac{\text{m}}{\text{sek}}$, ja missugune soojushulk sekundis tekitaks sama suure võimsuse?

Vastus: $\approx$ 22 HJ.

14. Arvutada Maksimi tüüpi kuulipilduja kasutegur, kui ta igas padrunis on 3,2 g püssirohtu, kuuli mass on 9,6 g ja kuuli algkiirus torust väljumisel on 880 $\frac{\text{m}}{\text{sek}}$. Püssirohu soojusväärtus on 900 $\frac{\text{cal}}{\text{g}}$.

Vastus: $\approx$ 31%.

15. Mitme kaloriga on samaväärne töö 1 HJ-tund?

Vastus: $\approx$ 632 kcal.

16. Leida priimuse võimsus hobujõududes, kui temal 10 minuti jooksul soojendati 2,5 l vett 0^0-st kuni 100^0-ni, võttes arvesse, et kogu soojus läks soojendamiseks.

17. Kui palju maksab 1 l vee keemaajamine alumiiniumkastrulis, mille mass on 500 g, kui vee algtemperatuur on 0^0, priimuse kasutegur 30%, petrooli tihedus 0,8 $\frac{g}{cm^3}$, selle soojusväärtus 10 000 $\frac{kcal}{kg}$ ja 1 liiter petrooli maksab 47 kopikat. Alumiiniumi erisoojus — 0,22 $\frac{cal}{g \cdot kraad}$?

18. Meie 7,62 mm vintpüssi padrunis on 3,2 G-se suitsuta püssirohuga laengu juures, 1908. a. mudeli ja 9,6 G raskusega kuuli puhul, kogu energia võrdne 1366 kGm-ga. Sellest ainult 362 kGm läheb kuulile algkiiruse andmiseks.

a) Leida vintpüssi kasutegur.

b) Milleks läheb kasutult kulutatud töö?

c) Kui suur on vintpüssi võimsus, kui kuuli liikumise aeg torus on $t = \frac{1}{680}$ sek?

d) Kui suur on suitsuta püssirohu kalorsus?

e) Kui suur on keskmine kiirendus torus?

(Missugused andmed peavad meil olema viimase küsimuse lahendamiseks?)

KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Mis on kalor ja kilokalor?
2. Kuidas mõõdetakse aine erisoojust?
3. Missugune on aine erisoojuse nimetus?
4. Mis on keha soojusmahtuvus?
5. Kuidas arvutada soojushulka, mis on vajalik antud keha massi temperatuuri tõstmiseks antud kraadide arvu võrra?
6. Missugune on keha soojenemiseks vajaliku ja jahenemisel äraantava soojushulga valem?
7. Mis on kalorimeetriline võrrand ja millel põhjeneb selle koostamine?
8. Kuidas arvutatakse kahe veehulga segu temperatuur ja missuguseid andmeid on selleks vaja?
9. Kuidas arvutada aine erisoojust, missugused andmed on selleks vajalikud ja kuidas neid saada?
10. Mida nimetatakse soojuse mehaaniliseks ekvivalendiks?
11. Missugustes erinevate süsteemide ühikutes väljendatakse soojuse mehaanilist ekvivalenti?
12. Mida nimetatakse töö termiliseks ekvivalendiks?

13. Missugustes erinevate süsteemide ühikutes väljendatakse töö termilist ekvivalenti?

14. Milles seisab Joule'i meetod soojuse mehaanilise ekvivalendi määramiseks?

15. Milles seisab energia muundumise ja jäävuse seadus? (Tooge näiteid selle seaduse ilmnemise kohta.)

16. Mis on kütuse soojusväärtus?

17. Missugustes ühikutes antakse kütuse soojusväärtus?

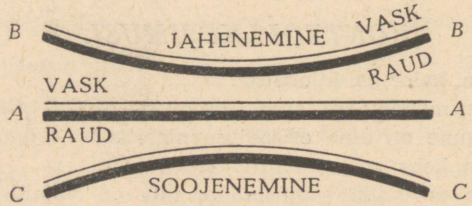
18. Mis on leppekütus?

19. Missuguse valemiga ja kuidas arvutatakse kütuse põlemisest saadud soojushulka?

Kirjandus. Перельман, Физическая хрестоматия, кн. I, стр. 191—218; 223—228.

2. Kehade paisumine soojenemisel.

49. Keha joon- ja ruumpaisumine. Arvukad katsed näitavad, et iga aine muudab temperatuuri muutumisel muude võrdsete tingimuste juures erimoodi oma mõõteid. Kui näi-



Joon. 44. Vasest ja rauast kokkuneeditud riba paindumine soojenemisel ja jahtumisel.

teks kokku neetida ühesuguste mõõdetega raud- ja vaskribad (joon. 44), siis soojenemisel võtab see paar kõvera kuju vasega kumeral poolel, jahtumisel aga vasega nõgusal poolel. See katse näitab, et vask ja raud paisuvad erimoodi: vask rohkem kui raud.

Kuna igal ainel on isesugune paisumine, siis selle omaduse iseloomustamiseks võetakse tarvitusele erilised suurused, mida nimetatakse paisumise koefitsientideks.

Paljud tahked kehad (rööpad, torud, traat jne.) evivad sellist kuju, mille juures mõõde ühes sihis (pikkus) võib olla väga suur, võrreldes teiste sihtidega (paksuse või jämeduse ja laiusega). Tahkete kehade suhtes võib temperatuuri suurenedes võtta arvesse eraldi joonpaisumist, s. o. mõõte suurenemist ühes sihis.

Vedelikkude ja gaaside juures, mis on alati suletud anumatesse, vaadeldakse ruumpaisumist, see on ruumala muutumist.



Joon. 45. Lermantovi riist joonpaisumise koefitsiendi määramiseks.

Mis puutub vedelikkude ja gaaside paisumisse, siis nende soojendamisel anumas võib täheldada ainult niinimetatud näivat ruumpaisumist, s. o. vahet antud temperatuurile vastava vedeliku ja gaasi tõelise ruumala ja sama temperatuuri juures võetud anuma ruumala vahel. Vedeliku või gaasi tõelist paisumist saab arvutada nende andmete põhjal.

50. *Laboratoorne töö 6.* Tahke keha joonpaisumiskoefitsiendi mõõtmine.

Töövahendid: 1) Lermanotvi riist (joon. 45); 2) mõned metalltorud umbes ühe meetri pikkusega, millede ühte otsa on kinnitatud toruga ristiseisev plaat; 3) mõõtjoonlaud, millimeetrijaotustega; 4) varbsirkel; 5) kolb; 6) kolmjalg; 7) lamp; 8) kummitorud; 9) klaas vee äravoolu jaoks; 10) termomeeter (ühine kõikidele gruppidele).

Töökäik. 1. Mõõtke mõõtjoonlaua abil 1 mm täpsusega toru algpikkus ühest otsast kuni plaadini l_0, märkige ära esialgne toru (toa) temperatuur ja kandke andmed tabelisse.

2. Pange toru alusele nii, et toru plaat (*A*) oleks vastu alusplaati (*B*). Teine toru ots keerake kruviga teise alusplaadi (*C*) külge kinni. Mõõtke varbsirkliga plaatide *A* ja *B* välimiste tahkude kaugus ja kandke varbsirkli näitamine tabelisse.

3. Valage kolbi varemvalmistatud tulist vett, ühendage kolb kummitoru abil metalltoruga, ajage vesi keema ja laske aur läbi toru. Korjake torust voolav vesi klaasi.

4. Umbes kümne minuti möödudes, kui võib arvata, et toru on võtnud keeva vee temperatuuri [1], mõõtke varbsirkliga plaatide välimiste äärte kaugus ja kandke see näitamine tabelisse. Samuti kandke tabelisse toru lõpptemperatuur t_2^0, võttes selle võrdseks keeva vee temperatuuriga, s. o. 100^0 [2].

5. Lahutades varbsirkli viimasest näitamisest esialgse, saate kätte toru pikenemise; arvutage toru temperatuuri muutus katse jooksul.

6. Arvutage toru pikenemine 1^0 kohta.

7. Arvutage algpikkuse iga ühiku pikenemine soojenemisel 1^0 võrra.

Toru aine	Algtemperatuur t_1^0	Algpikkus l_0	Varbsirkli esialgne näitamine	Lõpptemperatuur t_2^0	Varbsirkli lõppnäitamine	Pikkuse juurdekasv Δl	Temperatuuri muutus $t = t_2 - t_1$	Pikkuse juurdekasv 1^0 kohta, s. o. $\frac{\Delta l}{t}$	Pikkusühiku juurdekasv soojenemisel 1^0 võrra, s. o. $\frac{\Delta l}{t l_0}$	Viga protsentides

[1] Et veenduda selles, võib teha varbsirkliga korduvaid plaatidevaheliste kauguste mõõtmisi. Kui see vahe lakkab muutumast, siis toru on võtnud keeva vee temperatuuri.

[2] Toru jahutamise vältimiseks mähime ta ümber vildiga.

8. Võrrelge arvutatud koefitsienti tabeli omaga ja määrake vea suurus protsentides.

9. Tehke sama katse teisest ainest toruga.

51. Tahkete kehade joonpaisumise koefitsiendi valem. Kui meil on kasutada andmed, et raudvarb pikkusega 1,5 m soojenemisel 0°-st kuni 20°-ni pikenes 0,36 mm võrra ja vaskvarb pikkusega 1,2 m soojenemisel 0°-st kuni 15°-ni pikenes 0,31 mm võrra, siis pikenemiste absoluutväärtuste 0,36 ja 0,31 järgi meie ei saa otseselt võrrelda nende ainete pikenemist. Võrdlemine oleks võimalik, kui me pikkuse muutumise viiksime ühele ja samale algpikkusele ja ühesugusele temperatuuri muutusele. Arvutame, missuguse meetri osa võrra muutub pikkuse iga meeter ühe või teise aine juures soojenemisel 1° võrra:

$$\text{raua jaoks: } \frac{0{,}00036\ \text{m}}{1{,}5\ \text{m} \cdot 20\ \text{kraad}} = 0{,}000012\ \frac{1}{\text{kraad}};$$

$$\text{vase jaoks: } \frac{0{,}00031\ \text{m}}{1{,}2\ \text{m} \cdot 15\ \text{kraad}} = 0{,}000017\ \frac{1}{\text{kraad}}.$$

See arvutus näitab, et vase paisumine on suurem. Saadud suurused kannavad joonpaisumise koefitsiendi nime.

Joonpaisumise koefitsiendiks nimetatakse arvu, mis näitab, missuguse osa võrra muutub 0° juures võetud iga algpikkuse ühik soojenemisel 1° võrra.

Tahkete kehade joonpaisumise koefitsiendi mõõtmine toimub järgmise skeemi järgi. Mõõdetakse uuritavast ainest varva pikkus l_0 temperatuuri juures 0°. Siis mõõdetakse tema pikkus l_t temperatuuri juures t^0. Vahe $l_t - l_0$ annab terve varva pikkuse juurdekasvu soojenemisel t^0 võrra; jagatis $\frac{l_t - l_0}{t}$ annab terve varva pikkuse juurdekasvu soojenemisel 1° võrra; jagatis $\frac{l_t - l_0}{l_0 t}$ aga näitab, missuguse osa võrra muutub iga

0^0 juures oleva algpikkuse ühik soojenemisel 1^0 võrra, — see ongi joonpaisumise koefitsient.

Kui tähistada joonpaisumise koefitsient α-ga, siis $\alpha = \frac{l_t - l_0}{l_0 t}$.

Tahkete kehade joonpaisumise koefitsiendid, nagu näitab järgnev tabel, on väga väikesed [1]:

Raud	0,000012	Klaas	0,000010
Valgevask	0,000019	Invar (raua, nikli jt. sulam)	0,0000015
Vask	0,000017		
Plaatina	0,000009	Sulatatud kvarts	0,0000004
Teras	0,000011		

52. Mistahes temperatuuri juures võetud keha pikkuse valem. Joonpaisumise koefitsiendi valemist võime leida, et $l_t = l_0 + \alpha t l_0$ ehk

$$\boxed{l_t = l_0 (1 + \alpha t).} \qquad \text{(VI)}$$

Binoomi $1 + \alpha t$ nimetatakse joonpaisumise binoomiks. Seega *keha pikkus mistahes temperatuuri juures on võrdne pikkusega 0^0 juures korrutatud joonpaisumise binoomiga.*

Selle valemi järgi võime arvutada mistahes suuruse neljast suurusest: l_t, l_0, α ja t, kui on antud ülejäänud kolm suurust.

Näited. 1. Terastala pikkus temperatuuri juures $t_1 = 15^0$ on $l_{15} = 10{,}5$ m; leida tema pikkus l_{50} temperatuuri juures 50^0.

---

[1] Soojendamisel erinevates vahemikkudes 1^0 võrra, näiteks 0^0-st kuni 1^0-ni või 50^0-st kuni 51^0-ni või 100^0-st kuni 101^0-ni saadakse üksteisest mõningal määral erinevad arvud. Seega oleneb tõeline koefitsient temperatuurist. Tabelis antud koefitsiendid on keskmised; neid võib kasutada, kui temperatuuri muutused pole väga suured.

Lahendus üldisel kujul:

$$l_{t_1} = l_0\,(1 + \alpha t_1);\quad l_{t_2} = l_0\,(1 + \alpha t_2);$$

$$l_{t_1} = \frac{l_{t_1}(1 + \alpha t_2)}{1 + \alpha t_1};\quad l_{t_2} \approx l_{t_1}\,[1 + \alpha\,(t_2 - t_1)]\ ^1;$$

$$l_{50} = 10{,}5\ (1 + 0{,}000011 \cdot 35)\ \text{m} = 10{,}504\ \text{m}.$$

Kui palju muutub terassilla pikkus, mille pikkus on $l_0 = 400$ m 0^0 juures, kui temperatuur muutub $t_1 = -20^0$ kuni $t_2 = +40^0$?

$$l_{t_2} = l_0\,(1 + \alpha t_2);\quad l_{t_1} = l_0\,(1 + \alpha t_1);\quad l_{t_2} - l_{t_1} = l_0\alpha\,(t_2 - t_1);$$

$$l_{40} - l_{-20} = 400 \cdot 0{,}000011 \cdot 60\ \text{m} = 0{,}264\ \text{m}.$$

53. Keha ruumpaisumise koefitsiendi valem. Ruumpaisumise koefitsiendiks nimetatakse arvu, mis näitab, missuguse osa võrra oma esialgsest ruumalast 0^0 juures muutub iga ühik soojenemisel 1^0 võrra.

Et mõõta ruumpaisumise koefitsienti, tuleb mõõta ruumala V_0 0^0 juures ja V_t temperatuuri t^0 juures. Siis vahe $V_t - V_0$ annab ruumala juurdekasvu soojenemisel t^0 võrra. Jagatis $\frac{V_t - V_0}{t}$ annab kogu ruumala juurdekasvu soojenemisel 1^0 võrra. Jagatis $\frac{V_t - V_0}{V_0 t}$ aga näitab, missuguse, 0^0 juures võetud ühiku osa võrra muutub ühiku ruumala soojenemisel 1^0 võrra, — see ongi ruumpaisumise koefitsient. Kui tähistada ruumpaisumise koefitsient β-ga, siis

$$\beta = \frac{V_t - V_0}{V_0 t}.$$

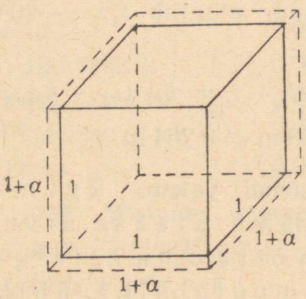
Jahenemisel 1^0 võrra iga pikkuse- või ruumalaühik väheneb suuruse võrra, mis on arvuliselt võrdne joon- või ruum-

---

[1] $1 + \alpha t_2$ jagamisel $1 + \alpha t_1$-ga on jagatises piirdutud kahe liikmega.

paisumise koefitsiendiga. Sellise meetodiga arvutatakse ruumpaisumise koefitsiendid vedelikkudele ja gaasidele.

Tahketele kehadele võib ruumpaisumise koefitsiendid arvutada joonpaisumise koefitsientidest. Kerge on näidata, et ruumpaisumise koefitsient on kolm korda suurem joonpaisumise koefitsiendist.



Joon. 46.

Tõepoolest, kui lõigata tahkest kehast kuup (joon. 46), mille serv on võrdne 0^0 juures pikkusühikuga, siis selle ruumala 0^0 juures on võrdne 1-ga. Soojendamisel 1^0 võrra iga serv pikeneb α võrra ja saab $1+\alpha$ pikkuseks, kogu ruumala aga suureneb β võrra ja saab võrdskes $1+\beta$-ga. Siis valemi järgi on kuubi ruumala $1+\beta = (1+\alpha)^3$; $1+\beta = 1+3\alpha+3\alpha^2+\alpha 3$.

Kuna kõikide kehade joonpaisumise koefitsiendid on väga väikesed, siis nende ruudud (α^2) ja kuubid (α^3) on seda väiksemad ja nende väärtused võib ilma suurema veata ära jätta. Siis

$$\beta = 3\alpha.$$

Vedelikkude ruumpaisumise koefitsiendid.

Vesi	0,00018	Elavhõbe	0,00018
Petrool	0,0010	Piiritus	0,0011
Õli (oliiv-)	0,0005	Eeter	0,0017

54. Mistahes temperatuuri juures võetud keha ruumala valem. Ruumpaisumise koefitsiendi valemist $\beta = \frac{V_t - V_0}{V_0 t}$ võib leida, et $V_t = V_0 + \beta t V_0$ ehk:

$$\boxed{V_t = V_0\,(1+\beta t).} \qquad \text{(VII)}$$

Kaksliiget $1 + \beta t$ nimetatakse ruumpaisumise binoomiks.

Siit — *ruumala mistahes temperatuuri juures on võrdne ruumalaga 0° juures korrutatud ruumpaisumise binoomiga.*

55. Keha tiheduse muutumine temperatuuri muutumisega. Keha tihedust mõõdetakse massiga ruumühikus. Kui keha massil m on 0° juures ruumala V_0, siis samal massil on temperatuuri t^0 juures ruumala $V_t = V_0 (1 + \beta t)$. Kui tähistada selle aine tihedust 0° juures D_0-ga ja temperatuuri t^0 juures D_t-ga, siis $D_0 = \frac{m}{V_0}$ ja $D_t = \frac{m}{V_0(1+\beta t)}$, kuna keha mass ei muutu temperatuuriga; siit:

$$\frac{D_t}{D_0} = \frac{mV_0}{V_0(1+\beta t)\cdot m} \quad \text{ja} \quad \boxed{D_t = \frac{D_0}{1+\beta t}} \qquad \text{(VIII)}$$

Järelikult, *aine tihedus mistahes temperatuuri juures on võrdne tihedusega 0° juures jagatud ruumpaisumise binoomiga.*

Samasugune seos seob ka kehade erikaalusid mitmesuguste temperatuuride juures.

Temperatuuri tõusmisel kehade tihedus ja erikaal vähenevad, vähenemisel — suurenevad. Erandiks on vesi, mille suurim tihedus on 4° juures.

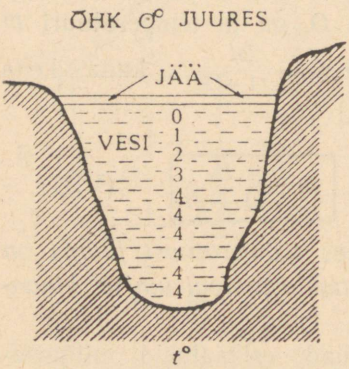
Soojendamisel üle 4° ja jahutamisel alla 4° (kuni 0°) vesi paisub. Viimasel asjaolul on suur tähtsus veeloomade ja -taimede talvitamisele. Jahtumisel alla 4° vee kihid, kuigi külmemad, aga vähem tihedad, jäävad veekogude peale, ei lange mitte alla. Sellepärast talvel korraldub sügavamates veekogudes temperatuuri jaotumine umbes nii, nagu näidatud joonisel 47, mis kindlustab loomade ja taimede olemasolu vees külma aja jooksul. [1]

---

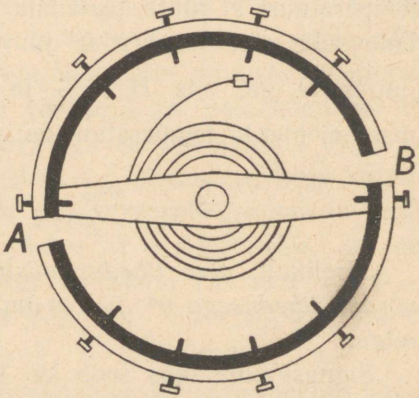
[1] Jõgedes rikub sellist temperatuuri jaotumist veevoolu tõttu tekkiv kihtide segunemine.

56. Soojuspaisumise kasutamine tehnikas. Paljude näidete kõrval, mis on toodud algkursuses soojuspaisumise tehnilise ärakasutamise kohta, peatume järgmiste juures:

1. *Kella kompensatsioon-balanssratas.* Üleminekul talvisest temperatuurist suvisele täpsete kellade balanssratas (joon. 48) laieneks, raadius suureneks ja kell hakkaks taha



Joon. 47. Temperatuuri jaotumine vertikaali mööda talvel sügavas järves.

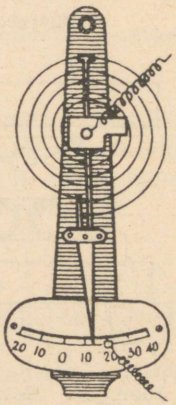


Joon. 48. Kella kompensatsioon-balanssratas.

jääma. Et hoida kella käiku muutumatuna, tehakse ratta võru kahest poolrõngast ja kinnitatakse diameetrile *AB*. Poolrõngad on kokku needitud kahest erinevast metallist sellise arvestusega, et temperatuuri tõusmisega poolrõngaste vabad otsad natuke ligineksid ratta tsentrile. Sellega kompenseeritakse diameetri *AB* paisumine soojenemisel ja säilitatakse balanssratta kui pendli mehaanilised omadused. Sel viisil kindlustataksegi kellade ühtlane käik temperatuuri muutumisel.

2. *Termoregulaator.* Temperatuuri ühtluse hoidmiseks spetsiaalsetes kappides — termostaatides, mida soojenda-

takse elektrivoolu abil, kasutatakse bimetallilist (kahest metallist) termoregulaatorit, mille konstruktsioonidest üks on kujutatud joon. 49. Kahest metallist kokkuneeditud ja spiraaliks keeratud riba liikuv osa on varustatud kontaktiga, mis lülib sisse termostaadi soojendaja, kui temperatuur langeb allapoole kindlaksmääratut. Niipea kui termostaat ja selles asuv termoregulaator soojenevad tarviliku temperatuurini, spiraal kõverdub, liikuv kontakt eemaldub mitteliikuvast vasakule ja soojendamine lakkab. Nii võib hoida automaatselt peaaegu konstantset temperatuuri.



Joon. 49. Bimetallilise riba kasutamine signaliseerijana.

Sama riista võib gradueerida kui termomeetrit. Teda võib kasutada tulekahju signaliseerijana, mis suleb elektriahela tulekahjust tingitud temperatuuri tõusmisel ja annab signaale tuletõrjele.

Paisumisega arvestatakse sildade ja teiste pikkade metallist seadmete juures (joon. 50, rullid), metallosade või rööbaste kokkuneetimise juures, aurujuhtmete ehitamisel (joon. 51, torude painutatud osad — kompensaatorid).

Harjutus 5.

1. Tooge igapäevasest elust ja tehnikast näiteid kehade paisumise kohta soojenemisel ja kokkutõmbumise kohta jahtumisel.

2. Missugune mõõteriist põhjeneb kehade paisumisel?

3. Missugune keha, kas tahke, vedel või gaasiline, on kõige sobivam termomeetri ehitamiseks ja mispärast?

4. Missugune kujumuutus toimub plaadikese juures, mis on kokku needitud raud- ja vaskplaadist, kui teda soojendada?

5. Missugune tähtsus on looduses vee sellel omadusel, et ta 4^0 juures on kõige tihedam?

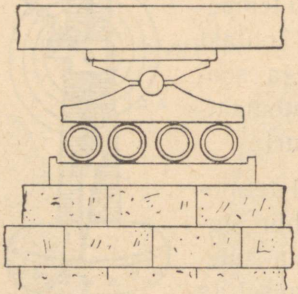
6. Missugune füüsikaline mõte on paisumisbinoomidel?

7. Terasrööpa pikkus on 0^0 juures 8 m. Kuipalju muutub tema pikkus temperatuuri muutudes -25^0-st kuni $+35^0$-ni?

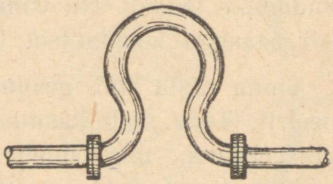
Vastus: $\approx 5{,}76$ mm.

8. Terasrööpa pikkus 35^0 juures on 8,00336 m. Selle temperatuuri juures on rööpad teineteisest 2 mm kaugusel. Missugune vahemaa tekib rööbaste vahele -15^0 juures?

Vastus: 6,8 mm.



Joon. 50. Metallsilla rulltoed.



Joon. 51. Aurujuhtmete elastsed kompensaatorid.

9. Telegraafi raudtraat evib lühimat pikkust 20 m-sel postide vahemaal -30^0 juures. Kui palju ta pikeneb soojenemisel kuni $+32^0$?

Vastus: 15 mm.

10. Dnepri sild Kiievi juures on 0^0 t^0-il 1082 m pikk. Kui palju muutub selle pikkus temperatuuri muutudes -10^0-st kuni $+20^0$-ni?

Vastus: 35,7 cm.

11. 12 l-ne plekk-kann on täidetud petrooliga 0^0 juures. Mitu grammi petrooli voolab üle kannu ääre soojenemisel kuni 20^0-ni? Anuma paisumist mitte arvestada. Petrooli jaoks $D_0 = 0{,}8 \frac{g}{cm^3}$.

Vastus: 188 g.

12. Arvutada vee tihedus 0^0 juures.

Vastus: 0,9993.

13. Arvutada 1 dm^3 vase mass 400^0 juures ($D_0 = 8{,}9 \frac{g}{cm^3}$).

Vastus: 8,83 kg.

14. Seatinatüki mass 0^0 t^0-l on 100 cm^3 ja 200^0 juures 101,74 cm^3. Leida seatina joonpaisumise koefitsient.

Vastus: 0,000029.

15. Kui suur on 100 g elavhõbeda ruumala 200^0 juures ($D_0 = 13{,}6 \frac{g}{cm^3}$)?

Vastus: 7,6 cm^3.

16. Missuguse temperatuurini 0^0-st tuleb soojendada plaatinatükki, et ta ruumala suureneks 0,01 võrra?

Vastus: 370^0.

17. Toetudes joonpaisumise koefitsientide tabelile, seletada: a) miks täpsete kellade pendlid ja pikkuste etaloonid valmistatakse invarist; b) miks kvartsist anum ei purune, kui teda visata külma vette, isegi siis mitte, kui ta on kuumendatud tulipunaseks?

KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Mida nimetatakse joonpaisumise ja mida ruumpaisumise koefitsiendiks?
2. Kuidas määratakse tahkete kehade joonpaisumise koefitsienti?
3. Missugune on joonpaisumise arvutamise valem?
4. Kuidas arvutatakse tahkete kehade ruumpaisumise koefitsienti?
5. Missugused on vedelikkude paisumise koefitsientide suurused, võrreldes tahkete kehade koefitsientidega?
6. Missugune on kehade tiheduse ja erikaalu muutus temperatuuri muutumisel?

Kirjandus. Перельман, Физическая хрестоматия, кн. I, стр. 129—153.

III. Molekulaarsed nähtused gaasides, vedelikkudes ja tahketes kehades.

1. Molekulaar-kineetilise teooria alused.

57. **Molekul.** Soojusnähtused on tihedas seoses aine ehitusega. Tänapäeva teaduslikkude andmete põhjal koosnevad kehad tibatillukestest osakestest, mida nimetatakse molekulideks.

Molekuliks nimetatakse väikseimat, antud temperatuuri ja rõhumise tingimustes iseseisvalt eksisteerivat ainehulka, mis evib suurel hulgal selle keha põhilisi keemilisi omadusi.

Missuguste vaatluste põhjal võime saada kujutluse molekuli olemasolust?

Teatud grupp vaatlusi näitab meile, et aine on võimeline jagunema väga väikesteks osakesteks. Igaüks teab igapäevaste vaatluste põhjal, et mõned tilgad eetrit lauale kallatult levitavad lõhna mitmesaja kuupmeetrilises ruumis. Samuti iga tugevasti lõhnava gaasi, näit. kloori lõhn, mis keemilises laboratooriumis juhuslikult välja lastud, annab end tunda suures kauguses. Kui jätta tuppa mõned kristallikesed naftaliini, mida tarvitatakse villaste esemete kaitsmiseks koide vastu, siis selle lõhn annab end veel kaua tunda kogu toas. Lõhna haistmine on võimalik ainult aineosakeste toimel inimese haistmisorganile. Lõhna tajumine suure ruumi mistahes kohas vihjab selliste osakeste olemasolule igas ruumi osas. Lõhnade levimine tühistest ainehulkadest

suurele ruumalale tunnistab antud ainehulga jagatavusest väga väikesteks osakesteks.

Kerge on veenduda, et kallates 1 cm^3 tinti 12—15 liitrisse vette, võib sellega ära värvida kogu vee. Värvumine sõltub samuti sellest, et läbipaistva vee mistahes kohas leidub värviva aine osake.

Lõpuks võib tänapäeva mikroskoopidega näha esemeid pikkusega kuni 0,001 mm, ning sagedasti need esemed osutuvad mingi mikroorganismi organiks, mis omakorda jaguneb komponentideks.

Sel viisil, osalt elulised vaatlused, peamiselt aga teaduslikud uurimused viivad meid järeldusele, et aine, sõltumata olekust, milles tema viibib, on võimeline jagunema üliväikesteks osakesteks.

Kuid nende vaatluste arutamisel tekib järgmine küsimus: kas on niisugune jagatavus üliväikesteks osakesteks lõpmatu või on sellele jagatavusele olemas piir?

Vastuseks sellele küsimusele võib teha järgmise katse: väga suurele puhta vee pinnale lastakse väike tilk õli; tilk valgub pinnal laiali suureks plekiks, õli kiht järjest õheneb. Kuid laialivalgumine lakkab, enne kui kogu vaba veepind kattub õlikilega. See tähendab, et õhenemine, s. o. jagatavus vertikaalses suunas jõudis piirini, ehkki laialivalgumise tingimus — vaba veepind — on alles. Selliseks piiriks on molekul.

Selline kergesti teostatav vaatlus langeb ühte paljude teaduslikkude andmetega, et kõik tahked, vedelad ja gaasilised kehad koosnevad molekulidest.

Teaduslikud arvestused näitavad, et molekulide mõõted on väga väikesed — kümnendikud millimikronist [1]. Normaalsel rõhul 0^0 juures sisaldab 1 cm^3 õhku $2{,}7 \cdot 10^{19}$ molekuli.

---

[1] Millimikron ($m\mu$) on võrdne 0,001 mikroniga (μ) ehk 0,000001 mm.

Teooriat, mis seletab aine omadusi ja ainet ilmnevaid nähtusi aine molekulilise ehituse abil, nimetatakse molekulaarteooriaks.

Ehkki molekul on kättesaadamatu silmaga või optilise seadmega [1] vahetuks vaatlemiseks, on siiski järeldusi, mida tehakse selle teooria põhjal, kontrollitud paljude katseliste uurimustega.

Molekul omakorda jaguneb osakesteks, mida nimetatakse aatomiteks.

Aatom on keemilise elemendi väikseim hulk, mis kuulub sama elemendi molekulide ja tema mitmesuguste ühendite molekulide koostisse.

Aatom ise evib kaunis keerulist ehitust, nagu see on teaduslikult selgitatud XX sajandil. Tema ehitusest võime saada kujutlust ainult pärast seda, kui oleme tutvunud aatomi kooste-osadega kursuse edaspidistes peatükkides.

58. Keha molekulid on eraldatud üksteisest vahedega. Oletades, et iga keha koosneb molekulidest, on loomulik küsida, kuidas molekulid kehas asetsevad: kas täidavad nad pidevalt kogu ruumi või on nad eraldatud üksteisest tühjade vahedega. Vastust annavad vaatlused ja katsed.

1. Lõhnava gaasi levimine kogu ruumis näitab seda, et tema molekulid võivad asetseda suures kauguses üksteisest; samuti on olemas vahed molekulide vahel õhus, milles gaas levib.

2. Kõikide kehade kokkutõmbumine rõhumise suurenemise tagajärjel, mis on väga suur gaaside ja palju nõrgem vedelikkude ja tahkete kehade juures, saab kergesti arusaadavaks, kui oletame vahede olemasolu, ja on raskelt seletatav, kui oletada, et aine täidab pidevalt kogu ruumala.

---

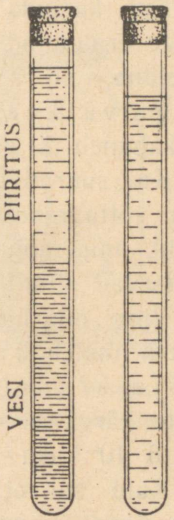
[1] Hiljuti on leiutatud eriline riist, niinimetatud „elektronmikroskoop", mille abil on võimalik fotografeerida suuremaid molekule. Üheks selliseks molekuliks on valgu molekul suurusega $43 \cdot 10^{-8}$ cm.

3. Kokkutõmbumise kõrval viivad ka teised keha kuju muutused — nihe, paine, vääne — mõttele tühjade vahede olemasolust molekulide vahel.

4. Samale järeldusele viib ka kõikide kehade omadus kokku tõmbuda jahenemisel ja paisuda soojenemisel.

5. Ka järgmine katse ilmutab vahede olemasolu molekulide vahel.

Täidame 1 m pikkuse ja 2 cm diameetriga klaastoru (joon. 52) poolenisti veega, peale aga ettevaatlikult valame värvitud piiritust nii, et selgesti oleks näha jagunemise piir. Piirituse ülemise ääre märgime ära kummist rõngaga või pealekleebitud paberiribaga. Siis segame mõlemad vedelikud. Nüüd võib märgata, et vedeliku ülemine äär seisab madalamal kui enne segamist. Järelikult on segu maht väiksem segatavate osade mahtude summast. Niisugune mahu vähenemine vihjab molekulide ümbergruppeerumisele tihedamalt koostatud gruppideks, mis aga on võimalik ainult tühjade vahede olemasolu puhul molekulide vahel.



Joon. 52. Vee ja piirituse segunemise juures maht väheneb.

Kõik vaatlused viivad järeldusele, et molekulid mistahes kehas asuvad teatud kaugusel üksteisest.

59. Kohesioon. Kui kehad koosnevad üksikutest vahedega jaotatud molekulidest, siis miks nad ei lagune, vaid iga keha (välja arvatud gaasid) säilitab oma mahu ja tahke keha ka kuju? On teada, et tuleb rakendada suurt jõudu, et purustada klaaspulka, ära raiuda laua küljest puutükki,

katki rebida metalltraati ja üldse ühel või teisel viisil lahutada tahke keha ühte osa teisest.

See nähtus osutab sellele, et molekulide vahel eksisteerivad jõud, mis hoiavad neid teatud kaugusel üksteisest. Keha molekulide vahelist vastastikuse mõju jõudu nimetatakse kohesiooniks[1].

Kui katsuda taastada purunenud keha, pannes temale külge eraldunud osa, siis see harilikult ei õnnestu; sellest järeldub, et kohesioon tuleb ilmsiks ainult väga väikestel kaugustel; selle kauguse piiri taga ta kahaneb nii ruttu, et teda ei saa enam kindlaks teha.

Kui suurimat kaugust, millel veel tuleb ilmsiks kohesioon, võtta raadiusena ja sellega joonestada kera, siis molekulid, mis mõjuvad vastastikku tsentris asuva molekuliga, asetsevad ainult selle kera seespool.

Ringi, mis haarab kõik molekulid, milledele mõjub tsentris asuva molekuli kohesioon, nimetatakse molekulaarse mõju sfääriks. Katseliste andmete põhjal tehtud arvustuste järgi on molekulaarse mõju sfääri raadius väiksem kui $6 \cdot 10^{-6}$ cm[2].

Kuid kas ei ole võimalik kindlaks teha katselisel teel kohesiooni ilmumist keha osade sellekohasel lähenemisel?

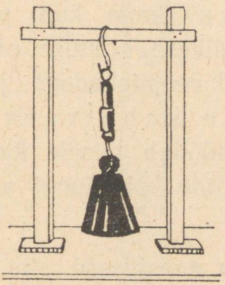
1. *Kohesioon tahkes kehas.* Kinnitame seatinast silindri otste külge kaks rõngast, siis lõikame ta noaga keskelt läbi ja paneme katkilõigatud osad kohe kokku, nihutades ja surudes ühte osa teise vastu nii, et eemalduksid õhu osad ja võimalikult tihedamalt liituksid mõlemad osad kokku.

---

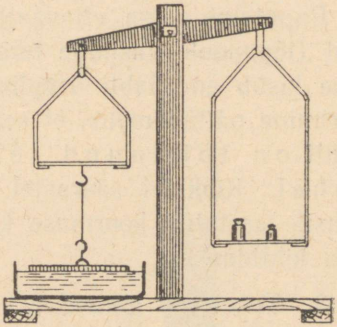
[1] Kohesiooni peab eraldama gravitatsioonist (külgetõmbejõust); tänapäeva vaadete järgi on molekulaarjõud elektrilise päritoluga. Molekulide lähenemisel ligemale teatud kaugusest nende vahel hakkavad mõjuma molekulaarsed tõukumised, mis takistavad kõikide molekulide vahetut kokkupuutumist.

[2] $10^{-6} = 0{,}000001$; üldse $10^{-n} = \frac{1}{10}\,n$.

Kui lõikekoht ei ole veel jõudnud oksüdeeruda [1] ja õhukiht on välja tõrjutud, siis mõlemad osad ühinevad üheks terveks. Nüüd võib silindri riputada ülemist rõngast pidi alusele (joon. 53), aga alumise otsa külge hakata riputama koormusi ja silinder kannatab välja kaunis suurt koormust ilma lahti minemata.



Joon. 53. Kohesioon seatinast silindri kahe tüki vahel kannatab välja vihi raskuse.



Joon. 54. Vedeliku kihtide vahel on olemas kohesioon.

Samuti võib esile kutsuda kohesiooni ka teistes pehmetes kehades — vahas, kautšukis jts.

Kui hästi poleerida kaks klaasplaadikest või hoolikalt lihvida kaks terasplaadikest ja panna nad teineteise peale, siis nad kleepuvad kokku ja võivad teineteist kinni hoida. Klaasi puhul kinnihoidev jõud saavutab kuni 6 kG ühe ruutsentimeetri kohta.

2. *Kohesioon vedelikkudes.* Et avastada kohesiooni vedeliku molekulide vahel, riputame ühe kaalukausi külge niidi

[1] Kui aga on toimunud oksüdeerumine või pind on muutunud ebapuhtaks, peab pinda noaga hoolikalt puhtaks kaapima.

otsa hoolikalt puhastatud klaasplaadikese nii, et see ripuks horisontaalselt. Olles teda kaaludel tasakaalustanud, lähendame temale altpoolt anuma veega kuni selle kokkupuutumiseni klaasiga (joon. 54). Kui ettevaatlikult lasta anum allapoole, siis klaasplaadike, vee poolt külgetõmmatuna, samuti laskub alla, kaalude tasakaal kaob, mis teebki ilmsiks kohesiooni olemasolu.

Raputame väga ettevaatlikult teisele kaalukausile haavleid (lõpupoole üksikute terade kaupa) nii kaua, kuni plaadike kisub end lahti veepinnast. Plaadikese alumise pinna uurimine näitab meile, et see on kaetud veepiiskadega, järelikult on toimunud lõhenemine kahe veekihi vahel. Kõikidel säärastel juhtudel mõõdab teisele kaalukausile asetatud koormuse kaal molekulide kohesiooni vedeliku kihtides.

3. *Kohesioon gaasides.* Mis puutub gaasidesse, siis esimesest pilgust näib, nagu ei võiks gaaside juures kõnelda nende molekulide kohesioonist, kuna viimased väga kiiresti eemalduvad üksteisest suurtele kaugustele; kuid gaaside paisumise ning kokkutõmbumise nähtuse uurimine viib kaudsel teel järeldusele, et ka gaasides eksisteerib kohesioon, kuid ta on väga väike.

60. Difusioon. Loomulik on küsida: kas on molekulid muutumatute väliste tingimuste puhul üksteise suhtes paigalolekus, või toimub ka sel juhul nende suhteline liikumine.

Katsed näitavad, et väga paljudel juhtudel kahe eri liiki keha molekulid, mis on viidud kokkupuutumisse, lähevad üle kehadevahelise piiri.

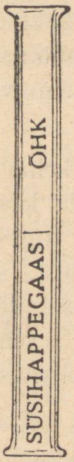
Ühe keha molekulide tungimist teise kehasse mingi välise mõjuta nimetatakse difusiooniks[1].

---

[1] Difusiooni nimetus, tuleb ladinakeelsest verbist *diffundere*, mis tähendab levitama.

Tutvume nüüd difusiooni nähtustega kehade erinevate olekute juures.

1. *Gaaside difusioon.* Kui täita üks klaassilinder süsihappegaasiga (joon. 55) ja temale asetada ülalt — avausega avause vastu — teine silinder, mis on täidetud õhuga, siis



Joon. 55. Gaaside difusioon.



Joon. 56. Vedelikkude difusioon.

võrdlemisi lühikese aja pärast võib märgata, kasvõi lubjavee abil, ülemises silindris süsihappegaasi olemasolu.

Lühikese ajavahemiku järel saadakse mõlemas anumas homogeenne õhu ja süsihappegaasi segu. See katse näitab, et raskema, süsihappegaasi molekulid liikusid üles, kergema gaasi — õhu molekulid laskusid alla, vaatamata sellele, et esialgne kihtide asetus — raske gaas madalamal kergemast — pidi Archimedese seaduse järgi takistama segunemist.

2. *Vedelikkude difusioon.* Et vaadelda vedelikkude difusiooni, täidame klaassilindri poolenisti puhta veega, siis aga valame ettevaatlikult põhjani ulatuva toru abil silindrisse

mingi värvilise soola, näit. vasevitrioli kanget lahust. Asetame katseriista ilma tõugeteta kindlale alusele, kus ta asuks täitsa rahulikult.

Alguses lahuse ja vee vaheline piir on väga terav; mõne päeva pärast hakkab vesi piirile lähimas kihis sinetama, lahus läheb kahvatumaks; aja jooksul värvingu muutumine hakkab levima piirist ikka kaugemale ja kaugemale; mõne nädala või kuu pärast, sõltuvalt silindri pikkusest, muutub segu homogeenseks. Ka siin nihkub raskem vedelik üles, kergem alla.

3. *Tahkete kehade difusioon.* Tahkete kehade difusiooni katset ei saa läbi viia õppetundides, kuna ta kestab aastaid. Teaduslikud vaatlused näitavad, et kui tugevasti kokku suruda kahte erinevast metallist plaadikest, näit. kullast (tihedus 19) ja seatinast (tihedus 11), asetades tihedama allapoole, siis pika aja möödumisel võib seatina piirikihis märgata kulla ja kulla piirikihis seatina olemasolu.

Ka see katse näitab raskema (tihedama) keha molekulide nihkumist üles, kergema — alla, s. o. vastassuunaliselt raskuse mõjule.

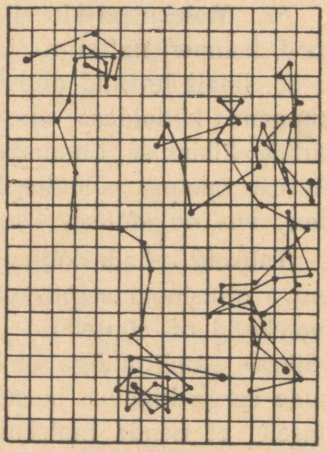
Difusioon toimub kiiremini difundeerivate kehade kõrgema temperatuuri puhul.

4. *Difusiooni nähtused looduses.* Kõikidel juhtudel, kus Maa peal eraldub raskem gaas, näiteks süsihappegaas maa pragudest, vabrikute korstnatest ja vulkaanidest, ta ei jää oma eraldumise kohale, vaid difundeerub õhus: difusiooni tagajärjel säilib üldiselt atmosfääri ühesugune koostis kogu Maa peal teatud paksusega kihi piirides. Niisama võib toimuda erinevate soolade lahuste difusioon maamullas.

61. **Browni molekulaarliikumine.** Molekuli liikumist pole võimalik vahetult vaadelda, kuna molekuli ennast pole võimalik vaadelda isegi mitte kõige tugevamate mikroskoopi-

dega. Seda enam nad alluvad paljudele kaudsetele vaatlustele. Viimaste hulgas inglise botaaniku Browni poolt korraldatud vaatlused juba 1827. a. viiksid nagu molekulaarliikumise otsesele vaatlusele õige lähedale.

Kui segada vette mingit kerget pulbrit, näiteks värvainet gummigutti (kummivaiku) ja asetada tilk vett selles heljuvate osakestega mikroskoobi klaasi alla, siis võib näha, et mikroskoobis nähtav pulbriosake (palju suurem molekulist) on alalises liikumises siksakilist trajektori mööda.



Joon. 57. Osakeste teed Browni liikumises.

Igal momendil ei saa osake molekulaarliikumise korrapäratuse tõttu molekulidelt igas suunas ühesuguseid tõukeid. Sel juhul liigub osake tasakaalustamata tõuke suunas. Järgmisel momendil saab molekul sellise tasakaalustamata tõuke mingist teisest küljest ja tema liikumine muudab suunda. Suure suunamuutumiste arvu puhul ühes sekundis saab tõugatava osakese liikumine värisemisele sarnase iseloomu.

Kontrollkatsed näitasid, et niisugune värisemine kunagi ei lakka ja ei sõltu mitte mingisugustest välistest mõjutustest nagu mehaanilistest, elektrilistest jt., kasvab aga temperatuuri tõusmisega.

Õpetlane Perrin märkis osakese asukoha mikroskoobi väljas iga 0,5 minuti tagant ja ühendas märgitud asukohad sirgjoontega; joonis 57 lubab otsustada osakeste üksteisele järgnevate nihkumiste üle ja järelikult kindlate ajavahemikkude järel liikuvate molekulide tõugete resultandi suuna üle.

Analoogilisi vaatlusi võime korraldada ka gaasis, milles on tolmuna mingi aine väikesi osakesi (tolm või udupiisad õhus).

Need katsed võimaldavad meil suurimal määral läheneda molekulaarliikumise otsesele vaatlusele.

62. Molekulaar-kineetiline teooria. Tahkete kehade (jää, jood, kamper, naftaliin) ja vedelikkude alaliselt toimuv aurumine, laialt levinud difusiooni nähtused ja Browni liikumine annavad küllaldase aluse kõikides olekutes kehade molekulide liikumise tunnustamiseks. Seepärast nüüdisaja aineehituse õpetuse põhialuseks on: *kehad koosnevad molekulidest, mis on alalises korrapäratus liikumises.*

Tahkete kehade kuju ja ruumala jäävus ning nendes toimuva difusiooni aeglus viivad kujutlusele, et tahkete kehade molekulid on suutelised läbima väga väikesi teid, võnkudes väikese amplituudiga oma tasakaaluasendi ümber. Vedelikkude kerge liikuvus ja suurem difusiooni kiirus viivad järeldusele, et nende molekulid liiguvad suurema amplituudiga ning on võimelised nihkuma üksteise suhtes. Gaasi väga suur difusiooni kiirus ja tema võime paisuda sunnivad tunnustama, et gaasi molekulid on alalises translatoorses liikumises kõikides võimalikkudes suundades; nende sirgjooneliste liikumiste juures on võimalikud molekulidevahelised kokkupõrkamised ja kokkupõrkamine anuma seintega, kui gaas on suletud anumasse, iga kokkupõrkamise juures muudab molekul oma teed.

63. Soojusliku oleku seletus molekulaar-kineetilise teooria abil. Difusiooni kiiruse suurenemine temperatuuriga osutab soojusliku oleku ja molekulide kiiruse vahelisele seosele. Tõsta keha temperatuuri tähendab suurendada molekulide liikumise kiirust.

Kui me mingil viisil suurendame molekulide korrapäratu liikumise kiirust, siis keha temperatuur tõuseb.

Keha soojuslik olek on seotud tema molekulide korrapäratu liikumisega.

Kuigi soojusnähtused on seotud keha molekulide mehaanilise liikumisega, *ei saa soojust tervikuna viia molekulide mehaanilisele liikumisele.* Iga üksiku molekuli liikumine ei loo veel soojusnähtust.

Soojusnähtuse tekkimiseks on vaja paljude molekulide osavõttu sellest nähtusest. Kuid ka sellest tunnusest — hulgast ehk massilisusest — ei piisa soojusnähtuse loomiseks. Molekulide soojuslikud liikumised on korrapäratud, kaootilised: ükski suund molekulide liikumises pole eelistatud, kõik suunad on võrdtõenäolised ja võrdväärtuslikud liikumisele.

Sellest arutelust on näha, et soojus on võrreldes mehaanilise liikumisega keerukam liikumise liik.

Mehaanilise liikumisega ühes kõigi selle seadustega on tegemist, kui liigub, s. o. kui evib kineetilist energiat ainult kasvõi üks molekul või selle osa.

Kõikides soojusnähtustes pole mitte üksi vajalik väikseimate osakeste mehaaniline liikumine, vaid peab aset leidma veel määratu hulga osakeste liikumine ja liikumise kaootilisus. Seepärast vajab soojusliikumine teisi uurimisvõtteid kui need, mida rakendati mehaanikas.

Selle asjaolu kinnitamist, et soojus on seotud molekulide kineetilise energiaga, leiame soojusnähtuste edaspidise käsitluse juures. Kuid juba üks nähtus, millest oli jutt eespool, leiab selles oma seletuse. Me nägime, et kehade kineetiline energia, kuigi osaliselt, läheb hõõrdumise tagajärjel üle soojuseks.

Keha mehaanilisel liikumisel joonestavad kõik tema punktid teatud trajektore: translatoorsel liikumisel paralleelseid jooni; pöörlemisel — kontsentrilisi ringjooni jne. (kui mitte arvestada kõrvalekaldumisi molekulaarliikumiste tõttu).

Kineetilise energia üleminekul soojuseks kujuneb keha korrapärasest liikumisest organiseerimatu, korrapäratu molekulide liikumine.

Kui on tegemist molekulide biljonite biljonitega, siis on tõenäolisem molekulide liikumine igasugustes võimalikkudes suundades kui kõikide molekulide üheaegne liikumine ühes kindlas suunas.

Kahest molekulide liikumise liigist — korrastamata ja korrastatud — kaootiline (korrastamata) liikumine osutub palju tõenäolisemaks.

Seega aine soojusliku liikumise vorm erineb teistest liikumise vormidest sellepoolest, et tema kujutab enesest väikseimate kehaosakeste kaootilist liikumist.

Soojusnähtuste seletamist keha üksikute osade liikumise alusel väljendas esimesena suur vene teadlane Lomonossov, kes pani aluse tänapäeva kineetilisele teooriale.

Oma ettekandes Teaduste Akadeemias ta ütles: „Kõigepealt olen mina tõestanud („Mõttiskelud sooja ja külma põhjustest"), et Aristotelese algtuli ehk uuema õpetlaste stiili järgi eriline soojusttekitav mateeria, mis ühest kehast teise minnes ja rännates hulgub ilma kõige väiksema tõenäolise põhjuseta, on ainult üks väljamõeldis; ma ühtlasi kinnitan, et tuli ja soojus seisavad keha moodustavate mateeriaosakeste keerlevas liikumises."

Nende osakeste sisemise liikumisega Lomonossov seletab soojuse üleminekut ühest kehast teise, tahkete kehade sulamist ja vedelikkude aurumist.

Mihhail Vassiljevitš Lomonossov (1711—1765) oli geniaalne vene õpetlane, vene loodusteaduse aluse rajaja. Erakordse jõuga avaldus temas vene rahvale omane talendi sügavus ja mitmekülgsus. M. Lomonossov oli talumehekaluri poeg; alles 19. eluaastast peale saab ta võimaluse

õppida. Kuid juba 34 aastaselt saab ta Vene Teaduste Akadeemia tegevliikmeks.

M. Lomonossov ennetas tolleaegse lääne-euroopa teaduse aastakümnete võrra. Tema väljendas esimesena looduse põhilise seaduse, millel põhjeneb kogu nüüdisaegne loodusteadus — energia jäävuse seaduse. Selle seaduse tunnustamisele tulid lääne-euroopa teadlased ligi 100 aastat pärast Lomonossovi tõid. Kvantitatiivsete meetodite sissetoomise teened keemiasse kirjutatakse harilikult prantsuse keemiku Lavoisier' arvele. Kuid ammu enne Lavoisier'd tegi Lomonossov kaalud keemia aluseks. Lomonossov tõestas eksperimentaalselt esimesena teaduses ammu enne Lavoisier'd aine hävimatust keemilistes reaktsioonides ja seega osutub tema aine jäävuse seaduse loojaks. Lomonossov andis materia kineetilise teooria esimese visandi. Tema rajas uue teaduse — füüsikalise keemia — alused. Tema korraldas rohkearvulisi astronoomilisi vaatlusi ja esimesena tegi kindlaks Veenuse atmosfääri olemasolu; ta konstrueeris mitmesuguseid optilisi riistu, uuris õhuelektrit, töötas välja valgusteooria jne.

Eriti suur tähtsus oli Lomonossovi töödel geoloogia vallast. Lomonossov arendas esimesena mõtet maakoores toimuvatest alalistest muudatustest ja näitas vajadusele vaadelda loodust ajalooliselt. Ka sellega oli Lomonossov lääne-euroopa teadusest kaugel ees. Maa ja maakihtide muutuvuse ideele tulid piiritagused õpetlased temast palju hiljem.

M. Lomonossovi teaduslik looming üllatab erakordse huvide laiusega ja kõiges, mida ta ka puudutas, jättis ta kustumatud jäljed. Tema esitas Suure põhjameretee projekti, kirjutas töid mäeasjandusest ja metallurgiast, juhtis klaasivabrikut, töötas välja värvilise klaasi tehnoloogia jne.

M. Lomonossov oli omaaja silmapaistev poeet; ta oli vene keele reformaatoriks ja kaasaegse vene grammatika aluse-

panija. M. Lomonossovi projekti järgi on loodud Venemaal Moskva ülikool.

M. Lomonossov oli hiilgav ühiskonnategelane, kes tuliselt armastas vene rahvast ja uhkelt kaitses tema rahvuslikke huve.

KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Mis on molekul, aatom?
2. Mis on kohesioonijõud ja milles nad ilmnevad?
3. Milles ilmneb difusioon?
4. Missugused on molekulaar-kineetilise teooria peajooned?

Kirjandus: Перельман, Физическая хрестоматия, вып. I (соответствующие статьи). Перрен, Броуновское движение и действительность молекул. Ми, Молекулы, атомы, мировой эфир. Покровский Г. И., Основы физических явлений, гл. II и IV. Муратов М., Юность Ломоносова, 1944, 122 стр.

2. Gaaside omadused.

64. Gaaside õpetuse arenemine. Gaaside õpetuse algus kuulub samasse XVII sajandisse, milles mehaanika sai oma teadusliku põhjenduse. Gaaside õpetuse arenemisele avaldas mõju osa neidsamu selle epohhi tootmisvajadusi, millest oli jutt mehaanika arenemise ajaloolises ülevaates õpperaamatu esimeses osas.

Suurenev metallide tarvitamine põhjustas olemasolevate kaevanduste süvendamise vajadust. Sellisel sügavusel imevpumbad lakkasid vett pumpamast, kuna nad suutsid seda tõsta vaid 10 m kõrgusele. Tekkinud raskuste kõrvaldamise vajadus tõmbas teadlaste tähelepanu õhu omaduste uurimisele.

Teiselt poolt tööstus vajas võimsamat jõumasinat, kui seda on inimene, loom, tuule- ja vesiveskid, mida kasutati tolle ajani.

Katsed ehitada uut, võimsamat aurumasinat sundisid teadlasi asuma auru ja selletaoliste gaaside omaduste uurimisele.

Kui tootmisvajadused seadsid teadlaste ette ülesande uurida gaaside omadusi, siis teadlaste tähelepanu loomulikult oli esialgu keskendatud peamiselt õhule.

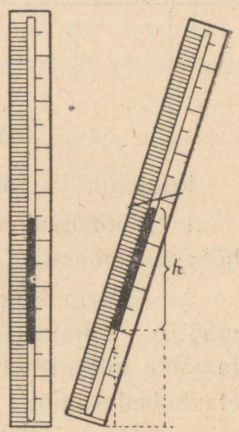
Me juba teame, et Galilei õpilane Torricelli leidis XVII sajandi algul õhurõhu mõõtmise meetodi (I osa) ja sellega andis ümberlükkamatu tõestuse õhurõhu olemasolust. Samal ajal Pascal uuris õhurõhu muutumist kõrgusega.

Aastal 1650 Guericke leiutas õhupumba. XVII sajandi lõpul hakati uurima gaaside (õhu) kokkusurutavust ja paisuvust mehaaniliste ja soojuslikkude nähtuste vastastikuste mõjutuste toimel.

65. *Laboratoorne töö 7.* Jääva temperatuuriga ning ühe ja sama massiga gaasihulga ruumala ja rõhu vahelise seose (Boyle-Mariotte'i seaduse) tuletamine.

Töövahendid: 1) Melde riist; 2) mõõtjoonlaud; 3) leht millimeeterpaberit; 4) baromeeter, ühine kõikidele gruppidele.

Töökäik. Töö kujuneb selle gaasimassi ruumala ja rõhumise mõõtmiseks, mis on suletud toru kinnise otsa ja elavhõbeda vahele. Ruumala V võime mõõta vabalt valitud ühikutes (leppeühikutes), võttes näiteks ruumala ühikuks ruumala, mis vastab õhusamba pikkusele 1 mm; siis gaasi ruumala leppeühikutes on arvuliselt võrdne gaasisamba pikkusega millimeetrites (joon. 58).



Joon. 58. Melde riist gaasi ruumala ja rõhu vahelise sõltuvuse uurimiseks.

Rõhku p, mille all on gaas ja mida ta ise tekitab anuma seintele tasakaalu puhul, võib muuta, andes torule mitmesuguseid horisondiga kaldu asendeid. Lahtise otsaga üles, toru mistahes asendis rõhk, mida avaldatakse gaasile, võrdub atmosfäärilise rõhuga H pluss elavhõbedasamba rõhk torus; elavhõbedasamba rõhk aga on mõõdetav vertikaali mööda mõõdetud ülemise ja alumise otsa nivoode vahega. Kui toru pöörata lahtise otsaga alla, siis gaasi rõhk torus võrdub H miinus elavhõbedasamba rõhk, mida mõõdetakse, nagu näidatud eespool. Et leida sõltuvust V ja p vahel, peab V ja p igale vastavate väärtuste paarile leidma nende korrutise. Nii töö kujuneb võimalikult suurema arvu V ja p

vastavate väärtuste paaride saamiseks toru mitmesuguste kallete puhul. Vaatluste tulemused tuleb kanda järgmisesse tabelisse:

Katse nr.	Maht V leppe-ühikutes	Rõhk $p = H \pm h$ elavhõbeda-samba mm-tes	Korrutis pV, arvutatud täpsusega kuni sajani	Suurima või vähima korrutise erinevus keskmisest protsentides
1				
2				

Ruumala ja rõhu mõõtmine võib toimuda järgnevalt.

1. Mõõtke atmosfääri rõhk baromeetri järgi H mm elavhõbedasambast.

2. Asetage toru vertikaalselt kinnise otsaga allapoole; mõõtke millimeeterpaberi abil õhusamba pikkus millimeetrites ja võtke millimeetrite arv ruumalaks V leppeühikutes; mõõtke elavhõbedasamba h pikkus millimeetrites; arvutage rõhk, mis vastab mõõdetud ruumalale $p = H + h$ mm elavhõbedasammast.

3. Kallutage toru mingi nurga võrra vertikaali suhtes (näit. 25°); mõõtke mõõtjoonlaua abil õhusambakese pikkus millimeetrites, mis annab ruumala suuruse V; mõõtke nivoode vahe vertikaali mööda elavhõbedasamba ülemise ja alumise otsa vahel, mis annab selle samba rõhu h; arvutage rõhk, mis on sel juhul õhul, $p = H + h$.

4. Korrake mõõtmist, kui kinnine ots on alla keeratud, veel vähemalt kahes toru asendis (näit 50° ja 75°).

5. Asetage toru horisontaalselt, mõõtke ruumala V. Millega võrdub õhu rõhk sel juhul?

6. Viige toru horisontaalsest asendist välja teatud nurga võrra (umbes 25°) lahtise otsaga alla, mõõtke mõõtjoon-

lauaga õhu ruumala ja elavhõbedasamba h mõlema otsa nivoode vahe vertikaali mööda; arvutage õhu rõhk $p = H - h$.

7. Korrake mõõtmisi ja arvutusi vähemalt kahe toru kaldseisu ja vertikaalseisu jaoks, kui lahtine ots on all.

8. Leidke pV keskmine väärtus kõikide mõõtmiste jaoks, määrake üksikute korrutiste ja keskmise korrutise vahe ja avaldage see protsentides. Kas on need vahed suured? Kas võib lugeda (vaatlusvigade piirides) korrutist pV konstantseks üksikute ruumalade ja rõhkude õige suurte erinevuste puhul?

9. Joonestage p ja V sõltuvuse graafik, kandes horisontaalteljele V väärtused ja vertikaalteljele p väärtused.

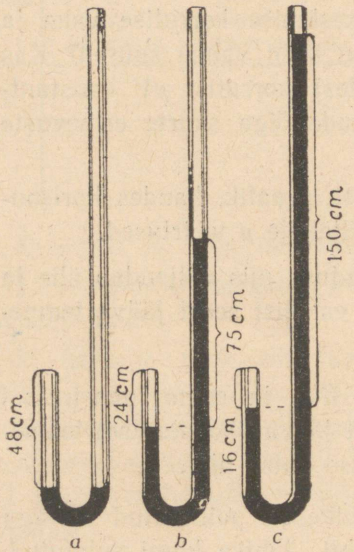
10. Kuidas võib sõnastada seadust, mis väljendab ühe ja sama gaasimassi ruumala ja rõhu vahelist seost jääva temperatuuri juures?

66. Boyle-Mariotte'i seadus. Ühe ja sama gaasimassi rõhu ja ruumala vahelist sõltuvust jääva (konstantse) temperatuuri juures võib uurida järgmise katse abil.

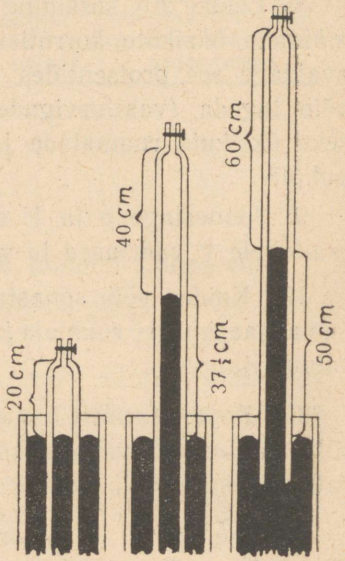
Võtame pika klaastoru lühikese painutatud otsaga (joon. 59). Toru pikk ots on lahti, lühike kinni sulatatud. Kallates temasse elavhõbedat ühesuguste nivoodeni mõlemas harus, nagu on näidatud joon 59 *a*, võime järeldada, et elavhõbedaga eraldatud ruumalas õhk asub üheatmosfäärilise rõhu all. Olgu katse ajal õhu rõhk $p_1 = 75$ cm elavhõbedasammast. Kallame lahtisesse harusse elavhõbedat juurde, seni kui õhk kinnises harus võtab kaks korda väiksema ruumala: $V_2 = \frac{V_1}{2}$ (joon. 59 *b*).

Elavhõbedasamba kõrguse mõõtmine lahtises harus näitab, et tema nivoo on 75 cm võrra kõrgemal kui kinnises harus, nii et õhk uues ruumalas osutus olevaks rõhu all $p_2 = 75$ cm Hg $+ 75$ cm Hg $= 150$ cm Hg, s. o. $p_2 = 2p_1$.

Kallates elavhõbedat veel juurde, nii et esialgne ruumala oleks kolmekordselt kokku surutud, kuni $V_3 = \frac{V_1}{3}$, leiame, et üldine rõhk temale $p_3 = 225$ cm Hg, järelikult $p_3 = 3p_1$ (joon. 59 *c*).



Joon. 59. Gaasi ruumala väheneb rõhu suurenemisega.



Joon. 60. Gaasi ruumala suureneb rõhu vähenemisega.

Võtame katseriista, mis on kujutatud joon. 60, asetame ühest otsast kinnise toru, milles on õhku, nii, et elavhõbe temas ja lahtises laias anumas seisaks ühel nivool. See asjaolu näitab, et õhk torus on üheatmosfäärilise rõhu all. Tõstame toru nii, et õhu ruumala saaks kaks korda suuremaks kui oli alguses: $V_2 = 2V_1$. Siis elavhõbe tõuseb kinnises harus ja, nagu näitab mõõtmine, jääb seisma laia anuma nivoo suhtes 37½ cm-sel kõrgusel. Tähendab nüüd tasakaalustab üheatmosfääriline rõhk 75 cm Hg kahekordistunud

ruumalaga õhu rõhu ja elavhõbedasamba rõhu, mille pikkus on 37½ cm. Torus oleva õhu rõhu arvele jääb ainult pool atmosfääri, s. o. $p_2 = \frac{p_1}{2}$.

Jätkates toru tõstmist seni, kui ruumala kolmekordistub, mõõdame elavhõbeda vahe õhuga täidetud torus ja välises anumas; siis ta osutub võrdseks 50 cm-ga. Järelikult moodustab õhu rõhk torus ainult kolmandiku atmosfääri (75—50), s. o. $p_3 = \frac{p_1}{3}$.

Võtame esimese ja teise katserea andmed kokku:

Ruumala vähenemine:

Ruumala	V_1,	$V_2 = \frac{V_1}{2}$,	$V_3 = \frac{V_1}{3}$.
Rõhk	p_1,	$p_2 = 2p_1$,	$p_3 = 3p_1$.
Korrutis	p_1V_1,	p_1V_1,	p_1V_1.

Ruumala suurenemine:

Ruumala	V_1,	$V_2 = 2V_1$,	$V_3 = 3V_1$.
Rõhk	p_1,	$p_1 = \frac{p_1}{2}$,	$p_3 = \frac{p_1}{3}$.
Korrutis	p_1V_1,	p_1V_1,	p_1V_1.

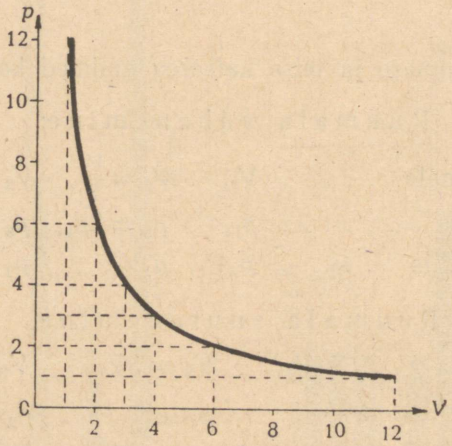
Sarnaste katsete põhjal leidsid inglise füüsik Boyle aastal 1662 ja prantsuse füüsik Mariotte aastal 1676 sõltumatult teineteisest seaduse, mida nende nimede järgi nimetatakse Boyle-Mariotte'i seaduseks:

Jääva (konstantse) temperatuuri juures on ruumala ja rõhu korrutis konstantne suurus ühe ja sama gaasimassi jaoks.

Kui tähistada m-grammise gaasihulga ruumala V-ga ja tema rõhu p-ga, siis võtab seadus järgmise matemaatilise kuju (Boyle-Mariotte'i seaduse valem):

$$\boxed{Vp = C} \quad \text{(C on konstantne suurus).} \qquad \text{(IX)}$$

67. Ruumala ja rõhu sõltuvuse graafik. Nagu võib näha eelnevast, on antud gaasihulga rõhk ja ruumala jääva temperatuuri juures pöördvõrdelised suurused. Kui kaks suurust on omavahel funktsioonaalses sõltuvuses, siis võib seda sõltuvust kujutada kõverjoonega, mis on tehtud mingi koordinaatteljestiku suhtes (joon. 61). Võtame abstsisstelje ruumala



Joon. 61. Gaasi rõhu sõltuvuse graafik ruumalast.

teljeks ja märgime sellel ära rea võrdseid lõike, millest igaüks kujutagu ruumala ühikut. Ordinaattelje võtame rõhu teljeks ja märgime sellel ära rea samasuguseid võrdseid lõike, kusjuures igaüks neist kujutagu rõhu ühikut. Ehitame graafiku juhu jaoks, kus $V = 12\ l$, $p = 1$ at. Leiame joonisel punktid, mis vastavad väärtustele:

$$\left.\begin{array}{l} p = 1,\ 2,\ 3,\ 4,\ 6,\ 12 \\ V = 12,\ 6,\ 4,\ 3,\ 2,\ 1 \end{array}\right\} \quad Vp = 12.$$

Läbi leitud punktide tõmbame joone. Saadud kõverjoont nimetatakse geomeetrias h ü p e r b o o l i k s. Füüsikas ta

kujutab gaasi oleku muutust jääva temperatuuri juures, mispärast teda nimetataksegi isotermiks [1].

68. Gaasi tiheduse sõltuvus rõhust. Kuna gaasi tihedus on $D = \frac{m}{V}$, siis

$$V = \frac{m}{D} \text{ ja } \frac{pm}{D} = C \text{ ehk } \frac{p}{D} = \frac{C}{m}.$$

Kuna C ja m on konstantsed suurused, siis ka $\frac{C}{m}$ on samuti konstantne suurus; tähistame teda C_1-ga, järelikult:

$$\boxed{\frac{p}{D} = C_1,} \qquad \boxed{\frac{p_1}{p_2} = \frac{D_1}{D_2},} \qquad \text{(X)}$$

s. o. gaasi tihedus on jääva temperatuuri juures võrdeline rõhuga.

Hilisemad uurimused näitasid, et Boyle-Mariotte'i seadus on ainult esimene lähendus tõelisele nähtusele ja osutub ligikaudseks seaduseks. Isegi väikeste rõhkude juures ei jää korrutis pV konstantseks, kusjuures ühtede gaaside ja ühtede rõhkude juures on kokkusurumine suurem, teiste juures väiksem, kui peaks olema Boyle-Mariotte'i seaduse järgi; suurte, üle 100 at rõhkude juures on kõrvalekaldumised juba suured.

Boyle-Mariotte'i seadusest kõrvalekaldumiste tabel.

V	Õhk		Süsihapu gaas		Vesinik	
	p	pV	p	pV	p	pV
1	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
$\frac{1}{2}$	1,9978	0,9989	1,9829	0,9914	2,0011	1,0006
$\frac{1}{8}$	7,9457	0,9932	7,5194	0,9399	9,0339	1,0042
$\frac{1}{20}$	19,7199	0,9860	16,7054	0,8353	20,2687	1,0134

[1] Kreeka keeles *isos* tähendab võrdne.

68-a. Ülesannete lahendamine Boyle-Mariotte'i seaduse põhjal. Põhilistes ülesannetes Boyle-Mariotte'i seaduse kohta otsitakse ühte suurust kolme antud suuruse abil; niiviisi on võimalikud kolm põhijuhtu. Tingimusi ja ülesannete lahendamist on kõige sobivam kirja panna järgmiselt.

Täheline näide. On antud gaas ruumalaga V ja rõhu all p. Leida tema uus ruumala sama temperatuuri juures, kui teda panna rõhu alla p_1:

	Ruumala	Rõhk	
Algsuurus	V	p	$xp_1 = Vp;\ x = \frac{Vp}{p_1}$.
Lõppsuurus	x	p_1	

Numbriline näide. Gaas, mille ruumala on 15 l 75 cm-se Hg rõhu juures, on surutud kokku ruumalale 12 l (sama temperatuuri juures). Kui suur on uus rõhk?

$$\left.\begin{array}{l} 15\text{ l} \text{ — } 75\text{ cm} \\ 12\text{ l} \text{ — } x\ \text{„} \end{array}\right\} 12 \cdot x = 15 \cdot 75;\ x = \frac{15 \cdot 75}{12};\ x = 93{,}75\text{ cm Hg.}$$

69. Gay-Lussac'i seadus. Gaaside paisumise mõõtmiseks kasutatakse riista, mida nimetatakse d i l a t o m e e t r i k s[1].

Dilatomeeter kujutab endast klaasist kera temale külgesulatatud, täisnurga alla painutatud peenikese klaastoruga. Kera ruumala ja toru ristlõige on hoolikalt mõõdetud. Kera täidetakse uuritava gaasi või õhuga (niiskusvaba). Siis lastakse toru horisontaalsesse ossa tilk mittekergesti auruvat vedelikku, mis eraldab uuritava gaasi ruumala. Asetades kera algul sulavasse jäässe, mõõdetakse gaasi ruumala 0^0 juures kuni vedeliku tilgani.

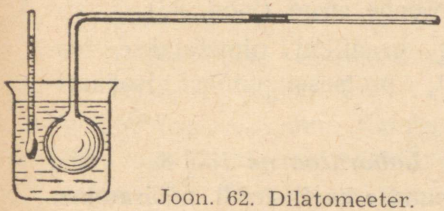
Siis viiakse kera soojendatud vette, määratakse vette lastud termomeetriga vee ja ühes sellega ka gaasi temperatuur ning selle järel mõõdetakse sama gaasihulga uus ruumala, mis on sellesama atmosfääri rõhu all.

Dilatomeetri enda väikest paisumist võib mitte arvestada.

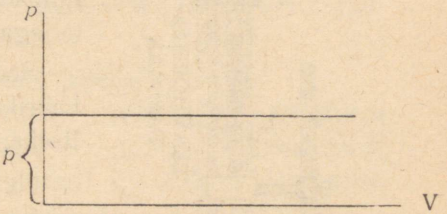
[1] Ladinakeelsest sõnast *dilatare* — p a i s u m a.

Saadud andmed lubavad arvutada gaasi ruumpaisumise koefitsienti (vt. § 54) jääva temperatuuri juures.

Hoolikaid gaaside paisumiste mõõtmisi korraldas Gay-Lussac, kes 1802. aastal leidis, et kõikide gaaside ruumala 1^0 võrra soojenemisel jääva (konstantse) rõhu puhul suureneb



Joon. 62. Dilatomeeter.



Joon. 63. Isobaar.

ühe ja sama osa võrra esialgsest, 0^0 juures olevast ruumalast. Sellepärast sai Gay-Lussac'i seadus järgmise väljenduse: *kõikide gaaside ruumpaisumise koefitsiendid jääva rõhu juures on ühesugused ja võrdsed suurusega* $\beta = \frac{1}{273} = 0{,}00366$ [1]. Gaasi ruumala mistahes temperatuuri t juures avaldub valemina $V = V_0 (1 + \beta t)$ (vt. § 54).

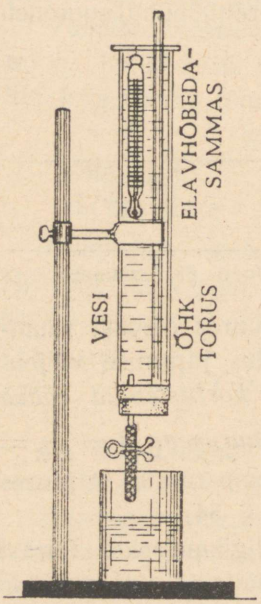
Gay-Lussac'i seadus osutub samuti ligikaudseks. Pärast Gay-Lussac'i korraldatud uurimused näitasid, et gaaside ruumpaisumise koefitsiendid, kuigi vähe, siiski erinevad üksteisest, ja nimelt:

Lämmastiku	jaoks	0,00367
Ammoniaagi	„	0,00380
Vesiniku	„	0,00366
Õhu	„	0,00367
Heeliumi	jaoks	0,00366
Hapniku	„	0,00367
Väävlishappeanhüdriidi	jaoks	0,00385
Süsihappegaasi	„	0,00373

$\beta =$

[1] Toodud arv pole antud Gay-Lussac'i enda, vaid hilisemate uurijate poolt.

Gaaside soojendamisel jääva rõhu juures vastab ühele ja samale rõhu väärtusele p palju ruumala V väärtusi. Kui abstsissteljele kanda ruumala väärtused ja ordinaatteljele vastavad rõhu väärtused, siis rõhu muutumist sõltuvalt ruumala muutumisest kujutab sel juhul abstsissteljega rööpne sirge (joon. 63).



Joon. 64. Katseriist laboratoorse töö nr. 8 juurde.

Seda graafikut nimetatakse isobaariks [1], protsessi ennast isobaariliseks.

70. *Laboratoorne töö 8.* Õhu ruumpaisumise koefitsiendi määramine.

T ö ö v a h e n d i d: 1) klaastoru (joon. 64) pikkusega umbes 30 cm ja diameetriga 2,5 mm; toru on ühest otsast kinni sulatatud ja umbes keskele on asetatud väike elavhõbedasambake, mis suleb õhusambakese; 2) termomeeter; 3) jäme klaastoru; 4) mõõtjoonlaud; 5) teekann keeva veega; 7) sulav jää.

T ö ö k ä i k. 1. Mõõtke mõõtejoonlauaga kogu toru pikkus L mm ja elavhõbedasambakese pikkus l mm.

2. Pange laia torusse sulavat jääd, või kui viimast ei ole, külma vett; asetage sulavasse jäässe või külma vette termomeeter ja v e r t i k a a l s e l t, kinnise otsaga alla, toruke, milles on õhk; märkige ära vee temperatuur t_0° ja torukese lahtise otsa kaugus elavhõbedasambakese ülemisest otsast l_0; arvutage leppeühikutes õhu ruumala $V_0 = L - l - l_0$.

---

[1] *Isos* — v õ r d n e; *baros* — r a s k e.

3. Laske laiast torust sulav jää või külm vesi välja ja kallake sinna sooja vett; asetage sinna termomeeter ja toruke õhuga, märkige ära temperatuur t^0 ja torukese lahtise otsa kaugus elavhõbedasambakese ülemisest otsast; arvutage välja uus ruumala $V_1 = L - l - l_1$.

4. Korrake katset vee mitmesuguste temperatuuride juures kuni 40°-ni.

5. Mõõtmise tulemused kandke tabelisse.

Torukese pikkus $L =$ ..... mm; elavhõbeda sambakese pikkus $l =$ ..... mm. Kaugus $l_0 =$ ..... mm torukese otsast kuni elavhõbeda alguseni temperatuuri t_0^0 juures. Algtemperatuur t_0^0. Algruumala $V_0 = L - l - l_0$.

Katse nr.	Temperatuur t^0	Kaugus torukese algusest kuni elavhõbedani l_1	Õhu ruumala $V_1 = L - l - l_1$	Ruumalade vahe $V_1 - V_0$	Temperatuuride vahe $t - t_0$	Ruumpaisumise koefitsient $\beta = \frac{V_1 - V_0}{V_0 (t - t_0)}$
					Keskmine	

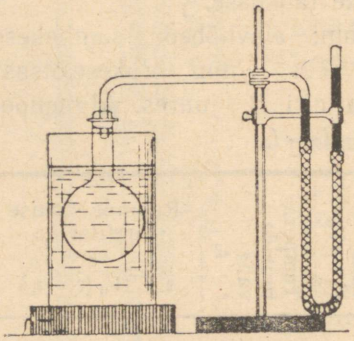
71. Gaaside rõhumise termiline koefitsient. Kui gaas on suletud anumasse (näiteks terasballoonidesse — hapnikku ja teisi gaase tootvates tehastes), siis temperatuuri muutudes tema ruumala ei muutu (anuma väike paisumine jääb arvestamata). Sellisel juhul muutub ühes temperatuuriga gaasi rõhk.

Gaasi rõhu sõltuvust temperatuurist võib uurida järgmise katse abil. Õhuga või mingi teise gaasiga täidetud kolb ühendatakse manomeetriga, mille vedelikuks on elavhõbe (joon. 65).

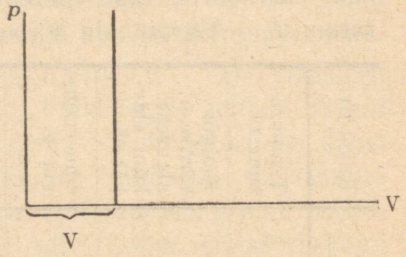
Kolb asetatakse anumasse, milles on sulav jää, mille temperatuur ja järelikult ka kolbi suletud gaasi algtemperatuur on 0°. Manomeetri liikuva haru nihutamisega seatakse

elavhõbeda nivood mõlemas harus ühekõrgusele. Siis on rõhk p_0, mille all on gaas kolvis, ja järelikult ka gaasi enese rõhk anuma seintele võrdne ühe atmosfääriga.

Mingi näitajaga märgitakse ära elavhõbeda nivoo manomeetri kinnises harus ja sellesamaga märgitakse ka gaasi ruumala anumas. Kolb võetakse välja esimesest anumast ja asetatakse anumasse, milles on kuum vesi.



Joon. 65. Katseriist gaasi rõhu sõltuvuse uurimiseks temperatuurist.



Joon. 66. Isokoor.

Nihutades uuesti manomeetri liikuvat haru, viiakse elavhõbeda nivoo näitaja juurde, sundides seega gaasi võtma endist ruumala. Kuid nüüd ei ole elavhõbeda nivood mõlemas harus ühekõrgused: lahtises harus seisab elavhõbe kõrgemal kui selles harus, mis on ühendatud gaasiga; olgu mõlema samba kõrguste vahe h. Gaasil on järelikult uus rõhk p_t, mis on õhurõhu ja kõrgusega h elavhõbedasamba rõhu summa. Mõõtnud vee temperatuuri t, võime arvutada, missuguse osa võrra muutub 0^0 juures võetud algrõhu iga ühik soojenemisel 1^0 võrra.

Arv, mis näitab, missuguse osa võrra muutub 0^0 juures võetud algrõhu iga ühik jääva ruumala juures soojenemisest

1° võrra, nimetatakse gaasi rõhumise termiliseks koefitsiendiks.

Rõhumise termilise koefitsiendi esimese mõõtmise tegi 1787. aastal prantslane Charles (loe šarl), kes avastas temanimelise seaduse: *jääva ruumala juures on kõikide gaaside rõhumise termilised koefitsiendid omavahel võrdsed.*

Kui tähistada rõhu koefitsient β-ga, siis:

$$\beta = \frac{p_t - p_0}{p_0 t}; \qquad \boxed{p_t = p_0 (1 + \beta t).} \qquad \text{(XI)}$$

Gaaside ruumpaisumise koefitsient jääva rõhu juures ja rõhu termiline koefitsient jääva ruumala juures avalduvad omavahel võrdsetes arvudes.

Charles'i seadus osutub jällegi ligikaudseks.

Gaasi soojendamisel jääva ruumala juures vastab ühele ja samale ruumala V väärtusele palju rõhu p väärtusi. Kui abstsissteljele kanda ruumala väärtused ja ordinaatteljele vastavad rõhu väärtused, siis rõhu sõltuvuse graafik ruumalast sel juhul esineb ordinaatteljega rööpse sirgjoonena (joon. 66).

Seda sirgjoont nimetatakse isokooriks[1] ja protsessi ennast isokooriliseks.

72. Ideaalne gaas. Nagu eespool näidatud, kalduvad kõik gaasid kõrvale Boyle-Mariotte'i ja Charles-Gay-Lussac'i seadusest. Antud gaasihulk jääva temperatuuri juures ei ole ranges pöördvõrdelisuses rõhuga; mitmesuguste gaaside termilised koefitsiendid erinevad üksteisest (kuigi vähe) ja temperatuuri muutumisel ei jää konstantseteks. *Gaas, mis täpselt alluks mõlemale gaasi seadusele, kannab „ideaalse gaasi" nime.* Kõige ligemal on ideaalse gaasi omadustele vesinik ja heelium.

---

[1] *Isos* — võrdne, *chora* — koht (kr. k.).

73. Gaastermomeeter. Kirjeldatud riistaga (joon. 65) sarnane riist, mille juures kolb on täidetud vesinikuga, võib täita vesinikuga gaastermomeetri ülesannet. Kolb lastakse ainesse, mille temperatuuri tahetakse mõõta; manomeetri lahtise otsa nihutamisega viiakse gaas ühele ja samale ruumalale; õhurõhumise ja elavhõbedasammaste vahe järgi mõõdetakse gaasi rõhku kolvis ja valemi (XI) järgi arvutatakse temperatuur. Gaastermomeetrit kasutatakse teaduslikkudes uurimustes ja temaga võrreldakse teisi termomeetreid.

74. Absoluutne temperatuur. Valemist (XI) on näha, et temperatuuri vähenemisega gaasi rõhk jääva ruumala juures samuti väheneb. Nii et kui gaasil 0^0 juures on antud ruumalas rõhk 1 $\frac{kG}{cm^2}$, siis temperatuuri $t = -1^0$ juures tema rõhk on võrdne $1 \cdot (1 - \frac{1}{273}) = \frac{272}{273}$; temperatuuri $t = -10^0$ juures on rõhk võrdne $\frac{263}{273} \frac{kG}{cm^2}$-ga, kui $t = -100^0$, siis rõhk saab võrdseks $\frac{173}{273} \frac{kG}{cm^2}$ jne.

Tekib loomulikult küsimus, missuguse temperatuuri juures, kui ruumala on jääv, võib gaasi rõhk muutuda nulliks. Tähistades selle temperatuuri x-ga ja võttes $p_t = 0$, leiame valemist (XI):

$$0 = p_0 (1 + \beta x);\ 1 + \beta x = 0;\ x = -\frac{1}{\beta};\ \beta = \frac{-1}{273};\ x = -273^0.$$

Järelikult võib ideaalse gaasi rõhk muutuda nulliks temperatuuri juures -273^0 C. Gaasi rõhk on gaasi molekulide liikumise ja nende poolt anuma seintele antud hoopide tulemus. Niiviisi tuleb välja, et -273^0 C temperatuuri juures nagu lakkaks ideaalse gaasi molekulide translatoorne liikumine. *Temperatuur -273^0 C võetakse temperatuuride absoluutseks nulliks. Absoluutsest nullist loetud temperatuuri nimetatakse absoluutseks.*

Kui temperatuurid Celsiuse järgi on -110^0; -20^0;

$+37^0$; $+100^0$; $+150^0$, siis absoluutsed temperatuurid on vastavalt: 163^0; 253^0; 273^0; 310^0; 373^0; 423^0. Üldiselt, kui temperatuur Celsiuse järgi märkida t-ga, vastav absoluutne temperatuur aga T-ga, siis nende arvude vahel on seos: $T = 273 + t$ ja $t = T - 273$. Temperatuuri -273^0 C võtmine absoluutseks nulliks põhjeneb koefitsiendi $\beta = \frac{1}{273}$ väärtusel. Koefitsiendi $\beta = \frac{1}{273}$ väärtus on saadud keskmise väärtusena mitte väga madalate temperatuuride juures; selle juures loeti gaas ideaalseks.

Pole alust eeldada, et see koefitsiendi väärtus jääb muutumatuks väga madalate temperatuuride juures. Väga madalate temperatuuride juures gaaside omadused muutuvad: gaasid võivad minna vedelasse ja tahkesse olekusse. Rahvusvahelise komisjoni otsusega 1934. aastast on võetud absoluutseks nulliks temperatuur $-273{,}16^0$ C.

On tarvis juhtida tähelepanu sellele, et absoluutne null võib tekkida eeldusel, et lakkab molekulide translatoorne liikumine. See ei tähenda veel hoopis mitte seda, et lakkab igasugune liikumine: absoluutse nulli ligidal säilib molekulides olevate veel väiksemate osakeste liikumine.

Harjutus 6.

1. Avaldage järgmised temperatuurid absoluutse skaala järgi: 1) valge hõõgumine (1200^0); 2) punane hõõgumine (1500^0); 3) vee keemistemperatuur; 4) jää sulamistemperatuur; 5) elavhõbeda tahkestumistemperatuur (-39^0); 6) laboratooriumis saadud madalaim temperatuur ($-272{,}18^0$).

2. Avaldage Celsiuse skaala järgi järgmised absoluutsed temperatuurid: 1) vesiniku tahkestumistemperatuur (16^0); 2) vedela õhu keemistemperatuur (80^0); 3) ookeanide veepinna keskmine temperatuur (290^0); 4) inimese keha temperatuur (310^0); 5) voltakaare temperatuur (3800^0).

75. Gaasi oleku valem. Boyle-Mariotte'i seadus määrab kindlaks rõhu ja ruumala vahelise sõltuvuse jääva tempera-

tuuri juures. Gay-Lussac'i ja Charles'i seadused aga annavad kas ruumala või rõhu sõltuvuse temperatuurist, kui üks nendest on jääv.

Kuid looduses ja tehnikas on tegemist protsessidega, kus muutuvad üheaegselt kõik kolm suurust.

Maapinnal soojenenud õhumasside tõusmisel muutuvad üheaegselt nii ruumala, rõhk kui ka temperatuur. Tarbijate terasballoonide täitmisel hapnikuga tehase balloonist muutub samuti üheaegselt rõhk ja temperatuur. Kütuse süttimisel sisepõlemise mootori silindris muutuvad üheaegselt kõik gaasi olekut iseloomustavad suurused.

Sellepärast on väga tähtis määrata antud gaasihulga kõigi kolme suuruse — r u u m a l a, r õ h u ja t e m p e r a t u u r i — vahelist s e o s t.

Kõikides toodud näidetes on tegemist mitte ideaalsete, vaid reaalsete gaasidega, kuid viimaste omaduste tundmaõppimisele võib asuda järk-järgult ideaalsete gaaside omaduste tundmaõppimise kaudu. Ideaalsete gaaside kohta on aga kehtivad Boyle-Mariotte'i, Gay-Lussac'i ja Charles'i seadused.

Antud gaasihulga ruumala, rõhu ja temperatuuri vahelist seost võib avaldada matemaatiliselt.

Gaasi oleku valemi tuletamine ideaalse gaasi jaoks toimub Boyle-Mariotte'i ja Gay-Lussac'i seaduste järjestikuse rakendamise teel.

Tähistame ruumala 0^0 juures V_0-ga ja vastava rõhu p_0-ga. Kui jätta rõhk p_0 muutumatuks ja soojendada sama gaasihulk temperatuurini t^0, siis tema uus ruumala V_1, selle temperatuuri juures on seotud ruumalaga V_0 Gay-Lussac'i valemi kaudu: $V_1 = V_0 (1 + \beta t)$. Kui sama temperatuuri t^0 juures viia rõhk kuni p-ni, siis võtab gaas mingi uue ruumala V ja Boyle-Mariotte'i seaduse järgi $Vp = V_1 p_0$.

Gaasi alg-, lõpp- ja vahepealse oleku andmeid võib paigutada tabelisse järgmiselt:

	Ruumala	Rõhk	Temperatuur	
Algolek	V_0	p_0	0	$V_1 = V_0 (1 + \beta t)$
Vahepealne olek	V_1	p_0	t	$Vp = V_1 p_0$
Lõppolek	V	p	t	

Asetades V_1 väärtuse viimasesse valemisse, saame:

$$Vp = V_0 p_0 (1 + \beta t) \text{ ehk } \frac{Vp}{1 + \beta t} = V_0 p_0.$$

Kuna sama arutelu võime korrata temperatuuride t^0_1, t^0_2, t^0_3 ... kohta ja iga kord saada sarnased valemid, siis:

$$\frac{V_1 p_1}{1 + \beta t_1} = \frac{V_2 p_2}{1 + \beta t_2} = \frac{V_3 p_3}{1 + \beta t_3} = \ldots\ldots = \frac{Vp}{1 + \beta t} = V_0 p_0$$

ehk:

$$\boxed{\frac{Vp}{1 + \beta t} = V_0 p_0,}$$

$$\boxed{\frac{Vp}{1 + \beta t} = C,}$$ kus C on konstantne suurus.

Gaasi ruumala korrutis rõhuga, jagatud ruumpaisumise binoomiga, annab antud gaasihulga kohta jääva suuruse.

Kuid

$$1 + \beta t = 1 + \frac{t_1}{273} = \frac{273 + t_1}{273} = \frac{T_1}{273},$$

kus T_1 on absoluutne temperatuur; samuti

$$1 + \beta t_2 = \frac{T_2}{273}.$$

Asetades saadud suurused eespool kirjutatud võrdusesse, saame:

$$\frac{273\, V_1 p_1}{T_1} = \frac{273\, V_2 p_2}{T_2} = \ldots\ldots = V_0 p_0$$

ehk peale taandamist 273-ga:

$$\frac{V_1 p_1}{T_1} = \frac{V_2 p_2}{T_2} = \ldots\ldots = \frac{V_1 p_0}{237}.$$

Kuna $V_0 p_0$ on konstantne suurus, siis ka jagatis $\frac{V_0 p_0}{273}$ on samuti konstantne suurus, mida võib tähistada B-ga; siis eelmised võrdused võtavad kuju, mis on tuntud Clapeyroni võrrandi nime all:

$$\boxed{\frac{V_1 p_1}{T_1} = \frac{V_2 p_2}{T_2}} \quad \text{ehk} \quad \boxed{\frac{Vp}{T} = B} \qquad \text{(XII-b)}$$

Antud gaasihulga kohta on ruumala korrutis rõhuga, jagatud absoluutse temperatuuriga, konstantne suurus.

Gaasi oleku võrrand lubab kergesti leida gaasi tihedust antud temperatuuri ja rõhu väärtuste järgi.

Tõepoolest, kui avaldada gaasi ruumala tema massi ja tiheduse kaudu, saame:

$$V = \frac{m}{D},$$

ja asetades saadud ruumala avaldise oleku võrrandisse, saame:

$$\frac{\frac{m}{D_1} \cdot p_1}{T_1} = \frac{\frac{m}{D_2} \cdot p_2}{T_2}.$$

Taandades massi suurusega m ja võttes ühe oleku normaalseks olekuks, võime kirjutada:

$$\frac{p_1}{D_1 T_1} = \frac{1 \text{ at}}{D_0 273},$$

kus D_0 — on gaasi tihedus normaalsetes tingimustes; on silmanähtav, et kui gaasi tihedus normaalsetes tingimustes on teada, siis viimasest võrrandist leiame tiheduse väärtuse sellele gaasile antud tingimustel p_1 ja T_1:

$$D_1 = D_0 \frac{273\, p_1}{T_1 \, 1 \text{ at}}.$$

Harjutus 7.

1. Kera, milles on 6 l normaalse rõhuga õhku, ühendatakse 4 l-se õhutühja anumaga. Missuguseks kujuneb rõhk peale anumate ühendamist?

2. Hapniku balloon, mis sisaldab 8 l hapnikku 6 at rõhu all, ühendatakse tühja anumaga, mille järele rõhk kujuneb 2 at-liseks. Missugune on ühendatud tühja anuma maht?

Vastus: 16 l.

3. Kolvis olev 0^0-ne õhk on normaalse rõhu all ja evib 3 l-st ruumala. Määrata tema ruumala 10^0 temperatuuri ja rõhu juures 74 cm Hg?

4. Vesinikul on 15^0 temperatuuri juures ruumala 2 l ja rõhk 100 cm Hg. Missuguseks kujuneb tema rõhk, kui vähendada ruumala kuni 1,5 l-ni, temperatuuri aga tõsta kuni 30^0-ni?

Vastus: 140 cm Hg.

5. Õhul on 0^0 temperatuuril ja rõhu puhul 75 cm Hg ruumala 1,2 l. Missuguse temperatuuri juures võtab ta ruumala 1 l, kui rõhk jääb normaalseks?

Vastus: -42^0.

6. Temperatuuri juures 0^0 ja normaalse õhurõhu puhul kaalub õhk kolvis 1 G. Missuguse ruumala võtab see õhk, kui temperatuur on -10^0 ja rõhk on 144 cm Hg? Õhu $d_0 = 0{,}00129 \frac{G}{cm^3}$.

Vastus: 498 cm^3.

7. Kui palju kaalub 1 cm^3 õhku 103 m sügavuses vee all, kui temperatuur on 4^0?

Vastus: 0,014 G.

8. Õhumullikesel on ruumala 0,1 cm^3 1 m sügavuses vee all, kui temperatuur on 100^0. Missuguse ruumala ta võtab, kui ta tuleb vee alt välja normaalsele rõhule ja 15^0-sele temperatuurile?

9. Leida süsihappegaasi erikaal, kui $t = 100^0$ ja rõhk on 80 cm Hg, kui $d_0 = 0{,}02 \frac{G}{cm^3}$.

Vastus: $0{,}0015 \frac{G}{cm^3}$.

10. Leida süsihappegaasi kaal gaasiballoonis, kui tema ruumala on 30 l, rõhk 40 at ja temperatuur 15^0.

Vastus: 2275 G.

11. Hapnikul on gaasiballoonis 18 l-ne ruumala, rõhk 32 at ja temperatuur 15^0. Leida hapniku kaal ja määrata, missuguse temperatuuri juures selle rõhk saab 40 at-ks (ruumala ei muutu); $d = 0{,}00143 \frac{G}{cm^3}$.

12. Määrata vesiniku kaal, mis täidab õhupalli, ruumalaga 3000 m^3, kui rõhk on 72 cm Hg, temperatuur —5° ja $d_0 = 0{,}00009 \frac{G}{cm^3}$.

Vastus: 260 kG.

13. Joonis 67 kujutab kõverjoont gaasi rõhu jaoks, mis tekib püssirohu põlemisel püssitoru õõnes. Seletada rõhu kõverjoone käiku. Kui suur on rõhk punktides *B* ja *F*? Missugusel kaugusel punktist *A* joonise mõõdete järgi on rõhk 1000 at?

76. Gaasi molekulaar-kineetiline teooria. Iga gaas, nagu iga teinegi keha koosneb molekulidest. Gaasi võime täita kiiresti kogu võimalik ruum, näitab ühelt poolt tema molekulide väikest kohesioonijõudu, teiselt poolt seda, et gaasi molekulid liiguvad translatoorselt suure kiirusega.

Gaasi molekulide liikumist võib sarnastada kihulaste parve liikumisega ilusal suveõhtul. Kogu parv, sarnaselt gaasile anumas, säilitab kaua mingi kindla ruumala, kuid üksikud kihulased temas tormavad korrapäratult igas suunas. Molekulid muudavad oma sirgjoonelist liikumist kokkupõrkamise tõttu teiste molekulidega ja anuma seintega, mille juures nemad põrkavad tagasi nagu elastsed kuulid.

Need alatiselt korduvad loendamatu arvu molekulide põrked moodustavadki rõhumise, mida avaldab gaas anuma seintele ja kehadele, mis on asetatud gaasi. Meie meelte organid ega ka mõõteriistad pole võimelised märkima üksikute molekulide erisuguste impulssidega [1] toimuvaid lööke. Tajutakse mingit impulsside keskmist, mis määrabki gaasi rõhumise.

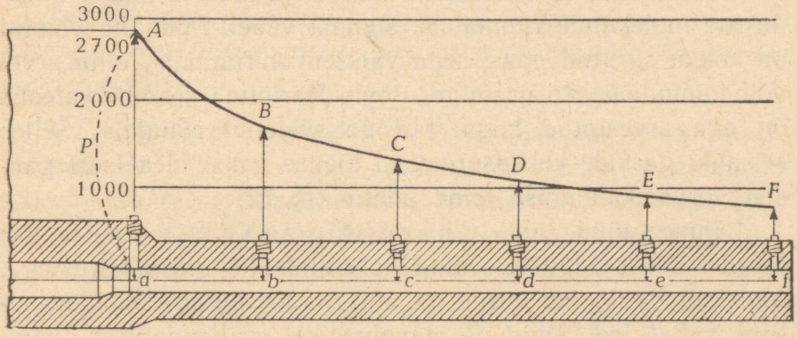
Molekulide suure arvu ja korrapäratu liikumise tõttu toimub igas suunas ühesugune arv lööke, mispärast gaasi rõhumine kõikidele seintele ongi ühesugune. Liikumise sama korrapäratus viib keskmiselt sellele, et kõikide löögijõudude resultandid, mis mõjuvad seinale, peavad olema risti seinaga või mingi teise pinnaga gaasi sees.

---

[1] Impulssi mõõdetakse jõu ja tema mõjumise aja korrutisega.

Kuidas seletada Boyle-Mariotte'i seadust selle teooria põhjal?

Ruumala vähenemisega lühenevad üksteisele järgnevate löökide teed vastu seina, ühtlasi väheneb ka molekulaarse pommitamise alla kuuluv pind, seega löögid järelikult tihenevad ja ühes sellega suureneb rõhumine. Ruumala suurenemisel toimub vastupidine nähtus.



Joon. 67.

Molekulid ei põrku mitte üksi anuma seintega, vaid ka omavahel. Teoreetiliste arvutuste põhjal keskmine kahe põrkumise vaheline molekuli vaba jooks $\lambda\,0^0$ juures ja rõhu puhul 1 at väljendub järgmiste arvudega: H_2 jaoks $\lambda = 11{,}2 \cdot 10^{-6}$ cm, 0_2 jaoks $\lambda = 6{,}5 \cdot 10^{-6}$ cm, N_2 jaoks $\lambda = 6{,}0 \cdot 10^{-6}$ cm [1].

Vesiniku molekulid saavad $15{,}1 \cdot 10^9$ vastastikust hoopi sekundis, hapniku molekulid $6{,}55 \cdot 10^9$ ja lämmastiku molekulid $7{,}55 \cdot 10^9$. Vesiniku molekuli vaba jooksu kestus on $0{,}66 \cdot 10^{-10}$ sek., hapniku oma $1{,}52 \cdot 10^{-10}$ sek. ja lämmastiku oma $1{,}32 \cdot 10^{-10}$ sek.

Suurte rõhkude juures täheldatakse kõrvalekaldumist Boyle-Mariotte'i seadusest. Gaasi ruumala suurel vähenemi-

[1] Kõik arvud selles ja järgmistes paragrahvides on toodud tutvumiseks, aga mitte päheõppimiseks.

sel muutuvad molekulidevahelised kaugused niivõrd väikesteks, et hakkab ilmnema nende vastastikune mõjutus, mis on vähe märgatav harilikel tingimusil.

Teiselt poolt, igal molekulil on kindel ruumala. Nii võrdub vesiniku molekuli diameeter $2{,}3 \cdot 10^{-8}$ cm, hapniku oma $2{,}9 \cdot 10^{-8}$ cm, lämmastiku oma $3{,}1 \cdot 10^{-8}$ cm. Tõeliselt võib kokkusurumine toimuda ainult selle ruumala osa arvel, mis moodustab vahe gaasianuma ruumala ja kõikide gaasis sisalduvate molekulide ruumalade summa vahel. Mida tugevamini on kokku surutud gaas, seda väiksem on ruumala, mille arvel võib toimuda kokkusurumine. Boyle-Mariotte'i seaduse valemis on aga arvestatud kogu gaasiga täidetud ruumala. Selles seisabki gaaside kokkusurumisel tõelise gaasi ideaalsest gaasist kõrvalekaldumise teine põhjus (§ 72).

Lähme nüüd üle Charles'i seaduse seletamise juurde. See seadus on seotud molekulide liikumiste kiirustega. Molekuli keskmine kiirus ū, millega ta liigub löökidevahelisel vabal teel lühimail ajavahemikel, väljendatakse, nagu näitavad teooria ja vahetu katseline mõõtmine, järgmiste arvudega: vesiniku jaoks $\bar{u} = 1845 \frac{m}{sek}$, hapniku jaoks $\bar{u} = 460 \frac{m}{sek}$, lämmastiku jaoks $\bar{u} = 493 \frac{m}{sek}$ 0^0 ja 1 at rõhu juures.

Temperatuuri tõusmisel kasvab molekulide kiirus. Kui gaas soojeneb jääva ruumala juures, suurenevad tema molekulide kiiruste kasvamisel seinte vastu toimuvate löökide impulsid ja rõhk järelikult suureneb, millest räägibki Charles'i seadus.

Lisame öeldule ühe märkuse molekulaarse liikumise kiiruse kohta. Kui jutt on molekulidest, siis ei tohi mõtelda, et kõikidel molekulidel on täiesti ühesugused kiirused. Korrapäratutel kokkupõrkamistel võivad ühtede molekulide kiirused suureneda, teiste kiirused väheneda, kuid üldiselt toimuvad kõik nähtused nii, nagu oleksid kõikide molekulide kiirused ühesugused. Tõepoolest näitavad ligikaudsed teoreetilised arvutused, et kui näiteks mingi tempe-

ratuuri juures keskmine kiirus võrdub $485\frac{m}{sek}$, siis 1% kõikidest molekulidest evib kiirust, mis on madalamal kui $100\frac{m}{sek}$, umbes 8% — 100 ja $200\frac{m}{sek}$ vahel, 15% — 200 ja $300\frac{m}{sek}$ vahel, 20% — 300—$400\frac{m}{sek}$ vahel, 21% — 400—$500\frac{m}{sek}$ vahel, 17% — 500—$600\frac{m}{sek}$ vahel, 10% — 600—$700\frac{m}{sek}$ vahel ja 8% — üle $700\frac{m}{sek}$ vahel.

Teoreetilised järeldused näitavad samuti, *et molekuli keskmine kineetiline energia on proportsionaalne absoluutse temperatuuriga.*

77. Gaasi gramm-molekul ja molekulide arv selles. Gaasi (samuti ka mistahes aine) gramm-molekuliks nimetatakse gaasimassi, milles sisalduvate grammide arv on sama suur kui arv, millega väljendatakse antud aine molekulkaalu.

Vesiniku gramm-molekul on 2,016 g, hapniku oma 32 g, lämmastiku oma 28 g. Kuna vesiniku tihedus $D = 0{,}000090\frac{g}{cm^3}$, hapniku $D = 0{,}001429\frac{g}{cm^3}$, lämmastiku $D = 0{,}001251\frac{g}{cm^3}$, siis võib valemi $V = \frac{m}{D}$ abil arvutada, et mistahes gaasi gramm-molekul omab normaalsetes tingimustes ühte ja sama ruumala, ja nimelt $V = 22{,}41$ l.

Rea kaalutluste põhjal, mis seovad teoreetilisi järeldusi katsete teel leitud suurustega, on kindlaks tehtud, et *mistahes aine gramm-molekul sisaldab ühte ja sama molekulide arvu.*

Seda molekulide arvu aine gramm-molekulis nimetatakse itaalia füüsiku Avogadro auks, kes eespool toodud asjaolu väljendas, Avogadro arvuks.

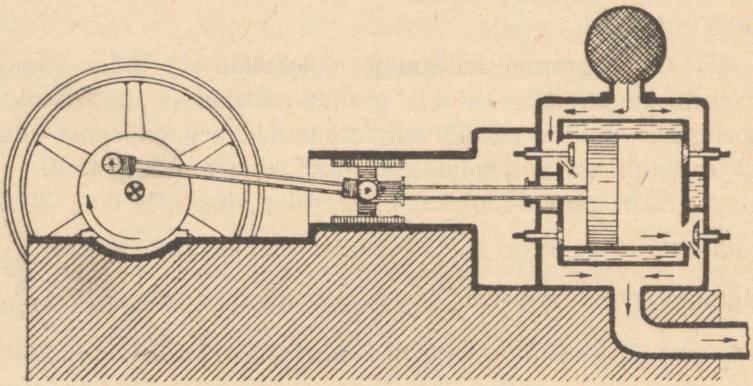
Täpseimate arvutuste järgi Avogadro arv $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$.

Siit võib saada §-s 57 toodud molekulide arvu ühes cm^3 0° temperatuuri ja üheatmosfäärilise rõhu juures, ja nimelt

$$\frac{6{,}02 \cdot 10^{23}}{22410} \approx 2{,}7 \cdot 10^{19}$$ (Loschmidti arv).

Samuti võib arvutada mistahes molekuli või aatomi massi. Näiteks vesiniku aatomi mass, mille molekul on kaheaatomiline, võrdub $\frac{2{,}016}{2 \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23}} = 1{,}67 \cdot 10^{-24}$.

78. Gaaside omaduste tehniline rakendamine. Gaasid leiavad väga laialdast rakendamist tehnikas. Kokkusurutud kujul on õhk töölistele aineks, millega pannakse käima mitmesugused niinimetatud pneumaatilised masinad ja tööriistad. Suruõhk, mida



Joon. 68. Kompressori läbilõige.

surutakse vagunite all olevatesse silindritesse, paneb liikuma vagunite õhkpidurite klopid. Tänapäeva täiuslikemateks pidurite on nõukogude leidurite Matrossovi ja Kazantsevi pidurid. Pneumaatilist pidurit rakendatakse samuti trollibustel ja suurematel veoautodel. Kokkusurutud ja hõrendatud õhu abil toimub koormuste transportimine torudes. Sellist transporti rakendatakse suuremates ettevõtetes ja isegi suuremates linnades (niinimetatud pneumaatiline post). Vastava temperatuuriga ja niiskusega õhku pumbatakse ruumide kütteks ja õhuvärskendamiseks ja samuti toorainete ning valmistoodete kuivatamiseks ja niisutamiseks ladudes. Masinaid, mis on ette nähtud õhu kokkusurumiseks või ruumide ja kaevanduste ventileerimiseks, kütuse põlemise soodustamiseks ahju-

des, pneumaatiliste tööriistade ja masinate käivitamiseks, nimetatakse õhupuhumismasinateks.

Õhu liikumist välisõhust õhujuhtmesse võib toimetada kahel viisil: imemisega (siis õhujuhtmes tekitatakse atmosfäärist väiksem rõhk ehk depressioon) või surumisega (siis on õhujuhtmes rõhk üle atmosfääri). Õhu väljapumpamine kaevandustest ja ruumidest toimub peaasjalikult ventilaatoritega; surumine toimub eriliste masinatega, mida nimetatakse kompressoriteks.

Õhupuhumismasinate võimsus on tänapäeval hiiglasuur: kuni 2000 m^3 õhku minutis ahjude jaoks ja kuni 12 000 $\frac{m^3}{min}$ kaevanduste läbituulutamiseks.

Ventilaatoritest on leidnud laialdast rakendamist tsentrifugaalventilaatorid, mis on ehituselt sarnased tsentrifugaalpumbaga (vt. I osa § 119). Labadega varustatud ratta pöörlemisel ratta labade vahel olevad õhuosakesed tõmmatakse kaasa, hakkavad liikuma ja visatakse inertsiga väljapuhumistoru kaudu välja. Nende asemele imetakse teljeavause kaudu uued õhuosad, mis kordavad sama protsessi.

Ventilaatoreid rakendatakse peale ruumide tuulutamise ettevõtetes veel tootmisprotsessis tekkinud jäätmete (gaasid, tolmud, saagmed, viilmed, sugetakud) kõrvaldamiseks, kergete materjalide (laastud, vill, karvad, lina, terad jts.) õhutranspordiks, kunstliku tõmbe tekitamiseks aurukatelde kolletes jts.

Kompressorina või surupumbana võib rakendada peaaegu iga õhuhõrenduspumpa, mille ehitus on teada algkursusest. Õhu imemisel ühest anumast sama kolb võib tekitada surumist teise. Joonis 68 kujutab kompressori läbilõiget.

Laialt rakendatakse suruõhku sõjatehnikas, nii mere kui maa kaitsevahendites. Väga mõjuvaks võitlusvahendiks võimsate soomuslaevadega on iseliikuvad torpeedod. Torpeedode väljalaskmine miinilaevast ja nende liikumine vees toimub suruõhu abil.

Suruõhuga pannakse tegevusse väga paljud mehhanismid laevadel ja eriti allveelaevadel. Allveelaeva veepinnale tõusmine teostub vee väljasurumise teel ballasttsisternidest suruõhu abil.

Sisepõlemismootori silindris kütuse põlemisest tekkinud kuumad gaasid panevad selle mootori liikuma.

Lõpuks kasutatakse gaaside survet igas tulirelvas kuuli, mürsu või miini väljapaiskamiseks. Automaatsetes relvades toimub ümber-

laadimine gaaside survega. Niinimetatud torupealsed pidurid kasutavad torust väljuvate gaaside survet tagasipõrke jõu vähendamiseks. Kokkusurutud õhk suurtüki taanduris viib oma elastsusjõuga paugust tagasipõrganud toru endisele kohale tagasi.

KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Milles seisab Boyle-Mariotte'i seadus?
2. Milles seisab Gay-Lussac'i seadus?
3. Kuidas väljendatakse gaasi oleku võrrand?
4. Missuguse valemi abil väljendatakse gaasirõhu muutumist soojenemisega, kui ruumala on jääv?
5. Mis võetakse temperatuuri absoluutseks nulliks?
6. Mida nimetatakse absoluutseks temperatuuriks ja kuidas üle minna Celsiuse järgi võetud temperatuurilt absoluutsele ja ümberpöördult?

Kirjandus. Игнатьев, Воздух и газообразные тела. Перельман, Физическая хрестоматия, вып. I. Свойства газов. Внуков, Физика и оборона страны, кн. 1, стр. 15—17.

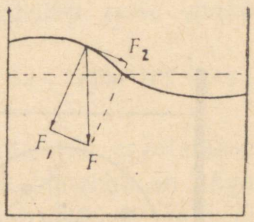
3. Vedelikkude omadused.

79. Vedeliku pinna kuju väliste jõudude toimel. Vedelikud on looduses erakordselt laialt levinud (vesi, nafta) ja leiavad laialdast rakendamist tehnikas (hüdraulilised pressid, metallivalu, vedelkütus).

Vedeliku põhiliseks väliseks tunnuseks on tema voolavus, s. o. ühtede osakeste kerge liikuvus teiste suhtes. Siit järgnevad vedela oleku mõningad iseärasused.

Kuna vedeliku osakesed kergesti liiguvad ka väikseima jõu toimel, siis vedeliku tasakaal võib saabuda ainult sel juhul, kui tema pind võtab normaalse (ristiseisva) asendi mõjuva jõu suhtes. Tõepoolest, kui mingil ajamomendil jõud F (osakese A kaal) mõjub nurga all vedeliku pinnale (joon. 69), siis võib selle jõu F lahutada kaheks komponendiks; üks pinnaga risti — normaalne komponent F_1, ja teine

pinna puutujat mööda — tangentsiaalne komponent F_2. Normaalne komponent ei saa välja kutsuda vedelikuosakese liikumist, kuna ta on suunatud ruumi, mis on täidetud teiste osakestega. Kui väike ka ei oleks tangentsiaalne komponent, ta kutsub välja osakeste liugumise mööda pinda, mis toob enesega kaasa pinna kohese muutumise. See muutumine toimub niikaua, kuni pole kadunud tangentsiaalne komponent, s. o. kuni pole vedeliku pind võtnud mõjuva jõu suhtes normaalset asendit. Suurtes veekogudes, suurtes järvedes, meredes ja ookeanides vee pind osutub kõveraks; tal on kera või täpsemini geoidi kuju, s. o. pinna kuju, mille kõikides punktides on maakera külgetõmbejõud risti pinnaga.



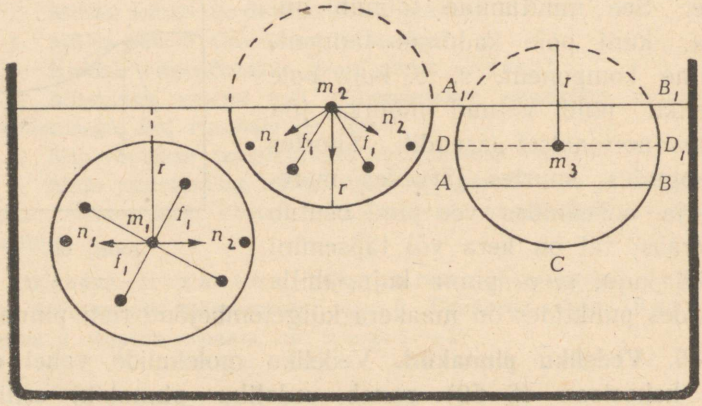
Joon. 69.

80. Vedeliku pinnakiht. Vedeliku molekulide vahel esinev kohesioon (§ 59) paneb vedeliku pinnakihi erilisse olekusse. Kui molekul m_1 (joon. 70) on sügavuses, siis tema kui tsentri ümber kujundatud molekuli mõjusfäär (§ 59) on tervikuna vedeliku sees. Iga molekuli n_1 jaoks, mis mõjutab molekuli m_1 jõuga f_1, leidub teine temaga tsentri suhtes sümmeetriline [1] molekul n_2, mis mõjutab m_1 sama suure, kuid ainult vastupidiselt suunatud tungiga f_1; kahe sümmeetriliselt asetseva molekuli ja järelikult ka kõikide sfääris olevate molekulide kogumõju tsentris asuvale molekulile m_1 on võrdne nulliga.

Kui võtta aga vedeliku ja selle auru piiril teine molekul m_2 ja ehitada tema ümber molekuli mõjusfäär, siis ainult pool mõjusfäärist asetseb vedelikus ja teine pool aurus. Vaat-

[1] Sümmeetrilisteks antud punkti suhtes nimetatakse kahte niisugust punkti, mis asetsevad antud punkti läbival sirgjoonel ja on võrdsetel kaugustel temast.

leme meie poolt valitud molekulile avaldatavat mõju ainult nende molekulide poolt, mis asetsevad alumises poolsfääris. Ülemise poolsfääri mõju jätame arvestamata, kuna see on täidetud auru molekulidega ja viimaste mõju nende suhteliselt väikese arvu tõttu võrreldes vedeliku molekulide mõjuga on kaduvväike.



Joon. 70. Molekulidevaheline vastastikune mõjutus molekuli mõjusfääri piirides. (Mastaapi pole silmas peetud.)

Iga molekuli n_1 jaoks, mis mõjutab m_2 jõuga f_1, võib leida teise, vertikaalse telje suhtes sümmeetrilise molekuli n_2, mis mõjutab m_2 sama suure jõuga f_1 ja on sama suure nurga all, kuid ainult teisel pool diameetrit. Nende resultant kui rombi diagonaal on suunatud diameetrit mööda vertikaalselt alla. Samuti on suunatud kõikide teiste sümmeetriliste molekulide resultandid.

Seega on kõikide nende kohesioonijõudude resultant, milledega mõjuvad kõik molekuli mõjusfääri alumises pooles asuvad molekulid molekulile m_2, suunatud vedeliku sisse risti pinnaga.

Niisamasugune jõud, ainult väiksem, mõjutab iga molekuli m_3, mis asub pinna all kaugusel, mis on väiksem mole-

kuli mõjusfääri raadiusest. Kahe sümmeetriliselt asetseva kihi $BADD_1$ ja $DA_1B_1D_1$, milledest üks on m_3-st ülalpool, teine allpool, mõjud molekulile m_3 hävivad vastastikku ja järele jääb ainult segmendi ACB mõju.

Seega *kogu vedeliku pinnakiht, mille paksus võrdub molekuli mõjusfääri raadiusega, avaldab ülejäänud vedeliku osale erilist rõhku, mis on suunatud vedeliku sisse pinna normaali mööda.*

Seda rõhku nimetatakse molekulaar- ehk pinnarõhuks.

Molekulaarrõhku ei saa otseselt mõõta. Ta arvutatakse teistest, katsetel saadud andmetest. Molekulaarrõhk on väga suur. Nii on ta eetril 1400 at, piiritusel 2400 at ja veel 11000 at[1].

Esimesel tutvumisel molekulaarliikumisega tekib küsimus, mispärast vee (või teiste vedelikkude) molekulaarrõhk ei lömasta temasse sukeldunud kehi.

Need jõud mõjuvad vedelikkude kihtide vahel, nad lähendavad molekulide kihte omavahel ja on selle põhjuseks, et vedelikud välisrõhu mõjul väga vähe tõmbuvad kokku, kuna nad pinnarõhu jõudude poolt on juba väga tugevasti kokku surutud (§ 81). Vastandina mistahes vedelikule avalduvale välisrõhule, ei andu molekulaarrõhk Pascal'i seaduse kohaselt edasi.

Molekulaarrõhu võrdlus magneti ja rauatüki vahelise külgetõmbejõuga aitab aru saada tema iseärasusest. Oletame, et lauale on pandud tükk vaske ja sellele on poolustega asetatud hobuserauakujuline magnet.

Rõhk lauale toimub vasetüki ja magneti kaalude summa poolt. Asendame nüüd vase samakaalulise rauatükiga ja asetame sellele sama hobuserauakujulise magneti.

---

[1] Esitatud andmed vastavad vedelikkude keemistemperatuuridele normaalse rõhu juures.

Rõhk lauale jääb endiseks, vaatamata sellele et magneti ja raua vahel mõjub suur seesmine külgetõmbejõud.

81. Vedelikkude kokkusurutavus. Vedelikkude väga väike kokkusurutavus välise rõhu suurenemise tõttu on seletatav hiiglasuure molekulaarrõhu olemasoluga vedelikus. Välisrõhk moodustab harilikult ainult tühise osa molekulaarrõhust. Nii väheneb ruumala välisrõhu suurenemisel iga atmosfääri kohta:

Veel	48	miljondiku osa	võrra (1 — 500 at piirides)
„	26	„ „	„ (2500 — 3000 at piirides)
Elavhõbedal	3	„ „	„
Eetril	146	„ „	„

On arusaadav, et väikeste rõhkude juures võib niisugust kokkusurutavust tähele panemata jätta.

Seepärast võib vedela oleku tunnuseks aine suurte hulkade puhul lugeda oma kuju puudumist ja ruumala konstantsust.

Peab tähendama, et ruumala muutumine toimub mitte ainult positiivse, vaid ka negatiivse rõhu, s. t. venituse juures. Selliseid juhtumeid täheldati vedeliku jahenemisel kinnisulatatud torudes, kus seintele kleepumise tagajärjel vedelik tõmbus kokku vähem, kui temperatuuri koefitsiendi järgi otsustades võis oodata, s. t. ta venis.

Lisarõhu kõrvaldamisel võtab vedeliku ruumala endise suuruse. Tähendab, vedelik evib mahtelastsust.

82. Pinnakihi potentsiaalne energia. Pindpinevus. Kuna rõhumine on suunatud vedeliku sisse, siis iga molekuli sattumine sügavusest sellesse pinnakihti on seotud selle rõhu ületamisega; selle rõhu ületamiseks kulutatud töö muundub potentsiaalseks energiaks, sarnaselt sellega, kuidas tõstetava keha kaalu ületamiseks kulutatud töö muundub tõstetud keha potentsiaalseks energiaks. Kuid nii nagu omaette jäetud keha

langeb madalamale nivoole, s. t. läheb üle niisugusesse asendisse, milles tema potentsiaalne energia muutub väiksemaks, niisama püüavad ka pinnakihi molekulid üle minna niisugusesse asendisse, milles nende potentsiaalne energia väheneks; potentsiaalse energia vähenemine võib aga toimuda ainult pinnakihi enda vähenemise arvel. Igal võimalikul vedeliku molekulide nihkumisel nad nihkuvad kohesiooni mõjul nii, et pinnakihi suurus väheneks. *Seepärast asub iga vedeliku pinnakiht pingsas olekus, mis püüab pinda vähendada.*

Vedeliku pinna vähenemist kohesiooni tagajärjel, mis toimub alati siis, kui vedeliku molekulid võivad liikuda, vaadeldakse kui jõu toimet, mida nimetatakse pindpinevusjõuks ehk lihtsalt p i n d p i n e v u s e k s.

Pindpinevus on suunatud pinda mööda. Kui pind on tasapind, siis on pindpinevus tasapinnas; kui vedeliku pind on kõver, siis pindpinevus on suunatud pinna puutuja sihis. Kui räägitakse pindpinevusest, siis on kokku lepitud viia see pinda ümbritseva joone pikkusühikule.

Niisiis võime anda järgmise definitsiooni: *pindpinevust mõõdetakse jõuga, mis kutsub välja pinna vähenemise: see jõud on suunatud pinna puutujat mööda ja käib pikkusühiku kohta.*

Ühikuks, millega mõõdetakse pindpinevust CGS-süsteemis, on $\frac{\text{düün}}{\text{cm}}$.

Tähistatakse pindpinevus tähega α.

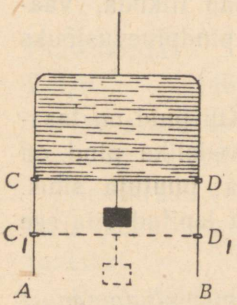
Pindpinevuse suurus on antud järgnevas tabelis $\frac{\text{düün}}{\text{cm}}$-tes 20^0 juures:

Aine	Vesi	Petrool	Elavhõbe	Piiritus	Eeter
α	72,5	24	472	22	16,5

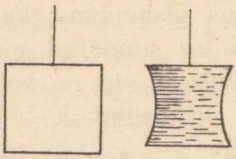
Temperatuuri tõusmisega pindpinevus väheneb, nagu nähtub järgmisest vee kohta käivast tabelist:

t	0^0	10^0	20^0	30^0	40^0	50^0	60^0	70^0	80^0
α	75,5	74	72,5	71	69,5	67,8	66	64	62

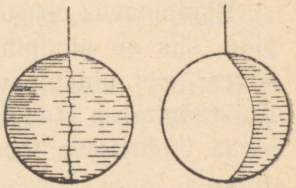
83. Katsed, milles avalduvad pindpinevuse omadused. Peatume algul katsete juures, milles avaldub otseselt pinnakihi tung kokku tõmbuda.



Joon. 71. Pinget kelme piiril võib tasakaalustada vihi kaaluga.



Joon. 72. Kelme pinge kisub ristküliku niidist küljed sissepoole.



Joon. 73. Kelme pinge tõmbab niiti pingule kaart mööda.

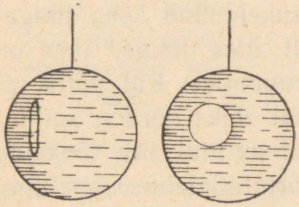
1. Traadist ristkülik, mille üks külg (*CD*) võib rõngakestel liuelda piki kaht teist külge, asetatakse seebivette seebikelme saamiseks (joon. 71). Kelme tõmbub kokku ja viib endaga kaasa liikuva külje. Seda võib hoida paigal, kui liikuvale küljele riputada vastavalt valitud koormus.

Niisuguse katse abil võib mõõta pindpinevuse suurust.

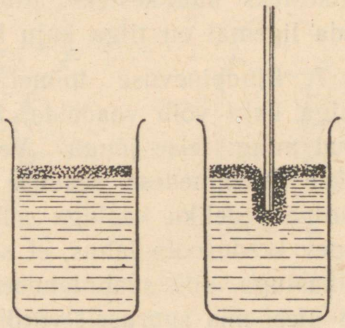
2. Ristküliku kaks külge tehakse traadist, kaks niidist (joon. 72). Õhus on niidist küljed isekeskis paralleelsed; kelme tekkimisega külgede vahel peale seebivette laskmist

painutatakse niidist küljed pindpinevuse poolt kaarekujuliselt sissepoole.

3. Traatrõngas, millele on lõdvalt külge seotud niit, tekitatakse seebikelme (joon. 73). Kui torkame kelme ühelt poolt niiti läbi, siis pindpinevus tõmbab niidi ringjoone kaare kujuliseks. Selline ringjoone kaare kuju võtmine näitab seda, et pindpinevus mõjub ühteviisi igale pikkusühikule ja on risti sellega.



Joon. 74. Pindpinevus mõjub ühteviisi igale niidi pikkusühikule ja on sellega risti.



Joon. 75. Rasvatud klaaspulk vette laskmisel painutab pinnakelmet.

4. Eelmist katset võib muuta nii, et paneme traatrõngas tekkinud kelmele kinnisõlmitud otstega niidi (joon. 74). Kui torkame niidi poolt piiratud kelme osa läbi, siis võtab niit ringjoone kuju.

5. Pinnakelme erilist omadust võib ilmutada, kui klaasi kallata vett ja raputada selle pinnale õhuke kiht karukolla (lükopoodiumi) seemneid ning torgata sinna rasvatud sõrm või klaaspulk (joon. 75). Läbi klaasi võib näha, kuidas sõrme või klaaspulga all paindub kelme. Kui sõrm või klaaspulk võtta veest välja, siis osutuvad nad kuivaks.

Järgmine katsete grupp näitab vedeliku tungi võtta selline kuju, et pind oleks kõige väiksem. Geomeetriast on teada, et antud ruumala kohta on kõikidest geomeetrilistest kujudest keral kõige väiksem pind.

Sellepärast on oodata, et vedelik võtab pindpinevuse toimel kera kuju. Me näeme tegelikult kera kuju kaste- ja vihmatilkades.

6. Klaasplaadile valatud väike elavhõbeda hulk puruneb väikesteks kuulikesteks. Mida väiksem on elavhõbeda hulk, seda ligemal on tilga kuju kera kujule.

7. Pindpinevuse toimel kujunenud suurema vedelikuhulga kuju võib vaadelda, kui tasakaalustada selle raskusjõud mingi teise jõuga. Vedelikku sukeldunud keha tõugatakse Archimedese seaduse järgi alt üles jõuga, mis on võrdne vedeliku kaaluga selle keha ruumalas. Kui võtta nii tugev keedusoola lahus, et selle erikaal oleks võrdne aniliini erikaaluga, siis saab lahusesse lastud aniliini tilk tõukejõu alt üles, mis suuruselt võrdub väljatõrjutud lahuse kaaluga; viimane aga aniliini ja lahuse erikaalude võrdumise tõttu on võrdne aniliinitilga kaaluga. Seepärast aniliinitilga kaal tasakaalustub vastupidiselt suunatud üleslükkejõuga ja tilk saab kuju pindpinevuse toimel; niisuguses lahuses võtab aniliinitilk kera kuju (joon. 76) [1].

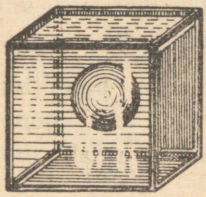
Moodustanud mitu kerakest ja lähendanud neid üksteisele, võime näha nende kokkusulamist. Kokku sulades nad säilitavad kera kuju sellepärast, et kahe kera ruumalade liitmisel ühise kera pindala on väiksem kahe liidetava kera pindalade summast.

8. Kui kelmed tekivad traadist karkasside (raamistikkude) vahele, millel on mitmesugused geomeetrilised kujud (joon. 77, 78), siis igal karkassil vedeliku kelme võtab täiesti

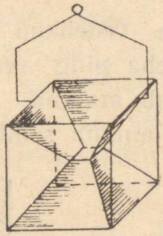
[1] See katse on tuntud Plateau katse nime all.

kindla kuju ja nimelt niisuguse, mille puhul tema pindala on väikseim kõikidest võimalikkudest kombinatsioonidest.

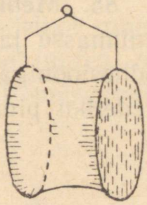
Läheme nüüd üle katsetele, mis näitavad, et antud vedeliku pindpinevus muutub, kui muutub aine, mis temaga kokku puutub, või kui temas lahustada mingeid teisi aineid.



Joon. 76. Vedeliku kuju ainult pindpinevuse toimel.



Joon. 77.



Joon. 78.

9. Puhta vee pinnale asetatud kampri või seebi tükikesed hakkavad seda mööda siksakiliselt jooksma. Pinda mööda jooksevad laiali kampri- või seebilahuse joad, ebaühtlaselt vähendades igas suunas puhta vee pindpinevust, mille tõttu tükikesed liiguvadki selles suunas, milles antud momendil on pinevus suurem.

84. Märgamine. Vedeliku kohesiooni kindlakstegemise katsetes (§ 59, 2) oli plaadi alumine osa peale vedelikust lahtikiskumist kaetud vedeliku tilkadega. Seega oli vedeliku ja antud tahke keha vaheline adhesioon tugevam kui vedeliku osakeste vaheline kohesioon.

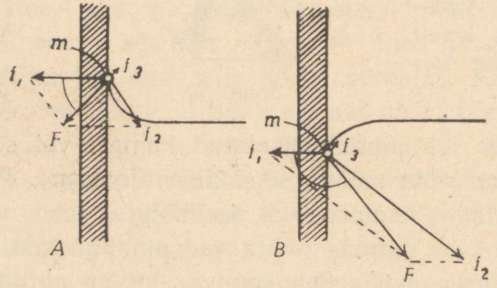
Vedelikke, mille adhesioon mingi tahke keha suhtes on suurem vedeliku enese molekulide vahelisest kohesioonist, nimetatakse antud tahket keha *märgavaiks* vedelikeks; neid aga, mille adhesioon tahke kehaga on väiksem kui molekulide endi kohesioon, nimetatakse *mittemärgavateks*. Märgavate vedelike näiteid: vesi ja piiritus puhta

klaasi suhtes, elavhõbe vase, raua, inglistina ja tsingi suhtes [1].

Mittemärgavate vedelike näiteid: vesi rasvakihiga kaetud klaasi suhtes (üldse igasuguse rasvakihi suhtes), elavhõbe klaasi suhtes.

Tahke keha ja mittemärgava vedeliku vahelist adhesiooni võib mõõta §-s 59 toodud katsele analoogilise katsega, viies näiteks klaasplaati kokkupuutumisse elavhõbedaga.

85. Menisk. Kuna vedelikud on harilikult paigutatud anumasse ja tahke keha ning vedeliku vahel on tegemist adhesiooniga, siis peab arvama, et viimane avaldab mõju vedeliku pinna kujule anuma seinte ääres.

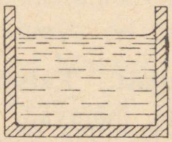


Joon. 79. Meniski tekkimine: *A* — märgamise ja *B* — mittemärgamise puhul.

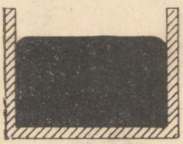
Vaatleme molekuli *m* vedeliku ja anuma seina piiril ja kujutleme selle ümber molekuli mõjusfääri. Nagu võib kujutella joon. 79 põhjal, pool sfääri tuleb tahke keha kohta, veerand vedeliku kohta ja veerand vedeliku auru kohta. Poolsfääris olevad tahke keha molekulid mõjuvad molekulile *m* resultantjõuga f_1, mis on suunatud anuma seina sisse perpendikulaarselt; vedeliku molekulid, mis asuvad alumises

[1] Eriti siis, kui neid enne väävelhappelahuses niisutatud lapiga hõõruda.

sfääri veerandis, mõjuvad molekulile m jõuga f_2, mis on suunatud vedeliku sisse pinna suhtes 45° nurga all, ja auru molekulid mõjuvad sama molekuli m peale jõuga f_3, mis on suunaga auru sisse pinna suhtes 45° nurga all. Kõikide jõudude, kaasa arvatud kaal, resultanti võib leida parallelogrammi reegli põhjal. Kuna jõud f_3 ja kaal, võrreldes teistega, on väga väikesed, siis joonise lihtsustamiseks võib piirduda ainult kahe esimese jõu resultandi leidmisega, mis ka määrab nähtuse iseloomu. Nendel juhtudel, kus vedeliku ja tahke keha vaheline adhesioon on suurem vedeliku molekulide kohesioonist, s. o. märgavate vedelikkude juures, on resultantjõud suunatud tahkesse kehasse, mittemärgavate vedelikkude juures — vedeliku sisse.



Joon. 80. Märgava vedeliku nõgus menisk.



Joon. 81. Mittemärgava vedeliku kumer menisk.

Toodud arutelu kehtib mitte üksi nende molekulide jaoks, mis asuvad piiril endal, vaid ka teiste pinnakihis asuvate molekulide jaoks paksusega mitte üle molekuli mõjusfääri raadiuse. Vedelik võib olla tasakaalus ainult sel juhul, kui tema pind on igas punktis risti selles punktis mõjuva jõuga. Seepärast *märgava vedeliku pind anuma seina ääres paindub ja tõuseb seda mööda üles* (joon. 80); *mittemärgava vedeliku pind paindub ja langeb alla anuma seina ääres* (joon. 81). Seinast teatud kaugusel on pinna kuju määratud vertikaalselt alla suunatud raskusjõuga ja pinnarõhuga; nende jõudude toimel kujuneb pind horisontaalseks. Vedeliku kõverat pinda nimetatakse m e n i s k i k s.

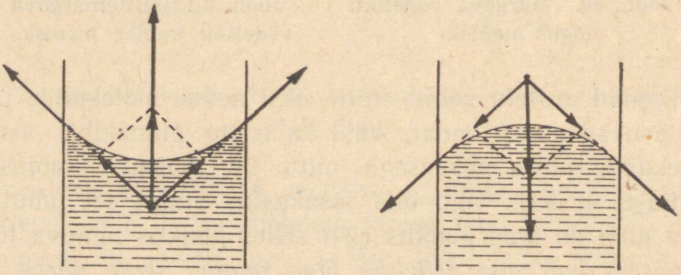
Seega on *märgavatel vedelikkudel torudes nõgus menisk ja mittemärgavatel — kumer.*

Meniski kõverus saab seda märgatavamaks, mida väiksem on vedeliku pind. Seepärast on ta suur kitsastes torudes (joon. 82) ja vähemärgatav laiades. Viimastes võib pinna kõverust märgata ainult seinte läheduses.



Joon. 82. Menisk torudes: *A* — mittemärgamise puhul; *B* — märgamisel.

86. Pinnarõhu sõltuvus meniski kujust. Katsetel täheldatavad mitmesugused meniski kujud mõjuvad pinnarõhu suurusele.



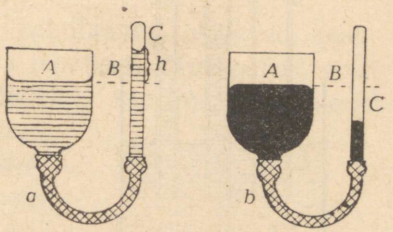
Joon. 83. Pinnarõhk sõltub meniski kujust.

Tõepoolest, kui vedelikku piirava pinna kuju on kõver, siis pindpinevusjõud, mõjudes selle vedeliku pinna piiri mööda ja olles nagu alati suunatud pinnapuutujat mööda, annavad liitumisel resultantjõu, mis on kumera meniski puhul

suunatud vedeliku sisse ja nõgusa meniski puhul väljapoole. Need jõud muudavadki vedeliku pinnarõhu suurust (joon 83). Esimesel juhul see resultantjõud vähendab molekulaarrõhku vedelikule, teisel juhul suurendab seda.

Seega on *nõgusa meniski korral pinnarõhk väiksem ja kumera puhul suurem kui tasapinnalise juures.*

87. Kapillaarsus. Kui ühendatud klaasanumatesse (torudesse), milledest üks on jäme, teine aga väga peenike, valada vett, siis veepind peenes anumas seisab kõrgemal kui jämedas (joon. 84 *a*). Analoogiline nähtus tekib iga vedelikuga, mis märgab seda ainet, millest on valmistatud anumad. Peenemas harus on nõgusal meniskil suur kõverus ja siserõhk on väiksem kui jämedamas. Sellistes anumates tekib tasakaal ainult juhul, kui peenes torus vedelik tõuseb niisugusele kõrgusele, et tõusnud samba hüdrostaatiline rõhk kompenseerib molekulaarrõhu puudujäägi.



Joon. 84. Märgava vedeliku tõus ja mittemärgava langus kapillaartorudes.

Kui samadesse ühendatud anumatesse (joon. 84 *b*) kallata elavhõbedat, siis elavhõbeda pind peenemas torus jääb madalamaks kui jämedas.

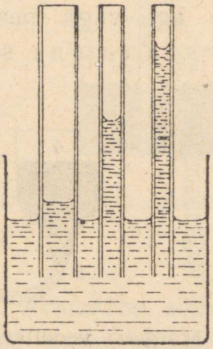
Niisamuti korralduvad iga tahke keha suhtes mittemärgava vedeliku nivood. Kumera meniski siserõhu juurdekasv surub vedeliku peenes torus niikaua madalamale, kuni see molekulaarrõhu ülejääk tasakaalustatakse jämeda toru selle osa hüdrostaatilise rõhu poolt, mille võrra on jämedama toru vedeliku nivoo kõrgemal peenema omast.

Kui laia anumasse lasta mitmesuguste diameetritega torud, siis võib näha, et peenes torus tõus või langus laia

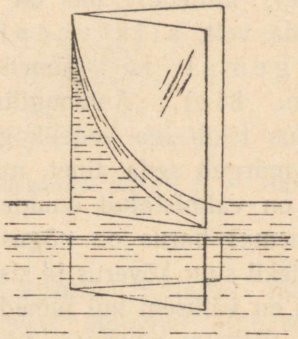
anumaga võrreldes on seda suurem, mida väiksem on toru diameeter (joon. 85).

Väga peened torud kannavad kapillaartorude nime, ladinakeelsest sõnast *kapillus* — juus.

Vedelikkude omadust tõusta või langeda kapillaartorudes, võrreldes laiade anumate nivoodega, nimetatakse kapillaarsuseks.



Joon. 85. Vedeliku tõus torus sõltub toru diameetrist.



Joon. 86. Märgava vedeliku tõus kahetahuses nurgas.

Kui lasta laia anumasse, milles on vesi, kaks klaasplaati, mis on kokku pandud kahetahuse nurga kujuliselt (joon. 86), siis võib näha, et vedelik plaatide vahel seisab kõrgemal kui väljaspool neid ja seda kõrgemal, mida ligemal servale.

Katsed lubavad püstitada järgmised kapillaarsuse seadused.

1. *Märgava vedeliku tõus ja mittemärgava langus on pöördvõrdelised toru diameetriga ja vedeliku tihedusega.*

2. *Tõusu kõrgus kahe paralleelse plaadi vahel on kaks korda väiksem kui torus, mille diameeter on võrdne plaatidevahelise kaugusega.*

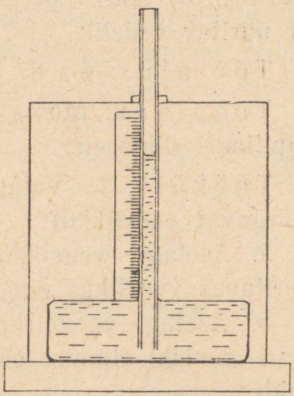
Kapillaartorus võib meniskit lugeda poolsfääriks (joon 84). Vedeliku ja toru piir on ringjoon raadiusega r (toru raadius). Seda ringjoont mööda mõjub jõud $2\pi ra$, kus a on pindpinevus, mida arvestatakse ühe pikkusühiku kohta. See jõud tasakaalustab ülestõstetud samba kaalu, kus samba kõrgus on h ja tihedus D.

Kaal on võrdne πr^2hDg.

Nende jõudude võrdsusest võib määrata a:

$$2\pi ra = \pi r^2hDg; \quad a = \frac{rhDg}{2}. \quad \text{Vee jaoks on } a = \frac{rhg}{2}.$$

Pindpinevus, märgamine ja kapillaarsus esinevad looduses alati ja neid kasutatakse ära tehnikas. Väga paljud poorsed kehad imevad endasse vedelikku. See imemine tuleneb sellest, et vedelik, olles antud tahke keha suhtes märgav, tõuseb kapillaarsuseseaduse järgi keha sees pooridest moodustunud kapillaare mööda seda suuremale kõrgusele, mida peenemad on kapillaarid. Nii imevad enesesse tugevasti vedelikke käsn, suhkur, paber (eriti kuivatuspaber), paljud riidesordid, liiv, kriit, puu ja litograafiline kivi. Samuti toimub põhjavee tõusmine pinnase kapillaare mööda. Siit saadakse kaks järeldust pinnase harimiseks. Kui on tarvis takistada põhjavee tõusmist pinnale ja selle kaudu aurumist, siis tuleb ära lõhkuda pinnase kapillaarid. Seda tehakse künniga.



Joon. 87. Pindpinevuse mõõteriist.

Niiskusvaestes ja põuastes maakohtades peab künd pinnase niiskuse säilitamiseks toimuma võimalikult vara ja sügavalt. Kui aga on tarvis välja kutsuda põhjavee tõusmist

pinnale lähemale, siis on vaja mitte üksi säilitada maapinna kapillaarid, vaid teha nende diameetrid väiksemaks, tuleb neid peenendada. Selle eesmärgiga rullitakse aia peenrad ja teatud juhtudel ka põllud rulliga üle või tambitakse kinni, mille tõttu kapillaarkäigud pinnases muutuvad peenemaks.

Taimede toitumine pinnasest saadavate soolade lahustega toimub soonte (trahheede) kaudu. Sooned on väga peenikesed kapillaarid; järelikult üheks lahuste tõusmise põhjuseks pinnasest taimede tippudesse on märgava vedeliku tõus kapillaarsuse seaduse järgi.

88. *Laboratoorne töö 9.* Pindpinevuse suuruse määramine.

Töövahendid: 1) lai klaasanum (joon. 87); 2) kapillaartoru; 3) statiiv peegelskaalaga; 4) nõel; 5) mikromeeter; 6) uuritav vedelik.

Töö alus: §-s 87 tuletatud seos.

Tööplaan: Mõõta vedeliku tõusu kõrgus kapillaaris ja kapillaari diameeter.

Töökäik. 1. Valage anumasse vett (või teist klaasi märgavat vedelikku).

2. Asetage vedelikku kapillaartoru, mille sisepind on uuritavas vedelikus enne märjaks tehtud.

3. Asetage peegelskaala anuma juurde ja mõõtke kapillaari meniski alumise osa kõrgus laia anuma vedeliku nivoo suhtes.

4. Kapillaartoru diameetri mõõtmiseks pistke toru alumise otsa avasse nõel, märkige ära koht, milleni nõel läks torusse, ja mõõtke mikromeetriga nõela diameeter märgitud kohas.

5. Tehke α arvutus valemi järgi.

6. Korrake katset sellesama või teiste torudega, leidke α keskmine väärtus, võrrelge seda tabeli omaga ja leidke protsentuaalne viga.

89. **Vedeliku molekulaar-kineetiline teooria.** Difusioon ja võõrkeha osakeste Browni liikumine vedelikus viivad kahelda-matule otsusele, et vedeliku osakesed liiguvad. Vedelikkude molekulide suur kohesioon ei luba arvata, et vedeliku molekulid saaksid läbida sirgjoonelisi teid ilma suurema teiste molekulide vastastikuse mõjutuseta, nagu see toimub gaasis. Vedeliku molekul liigub, täpsemini öeldes, väriseb ümbritsevate molekulide mõjuväljas; ühegi molekuli tee ei ole kindel ega perioodiline. Iga vedeliku molekul võib aja jooksul läbida ümbritsevate molekulide vahed ja üle minna teiste molekulide mõjuvälja.

Seega vedeliku molekulid võnguvad teatud muutlikkude tasakaalu-asendite ümber ja nihkuvad üksteise suhtes. Selle viimase omadusega ongi seletatav vedeliku liikuvus.

Kui otsida loodusest vedeliku molekulide liikumisele sarnast, siis kõige ligemal sellele on mesilaste liikumine oksale vastasunud sülemis. Mesilased sülemis peale väikeste võnkuvate liikumiste liiguvad veel aeglaselt üksteise suhtes.

Võrreldes gaaside teooriaga, on vedeliku kineetiline teooria veel puudulikult välja töötatud.

Harjutus 8.

1. Miks vees laialihargnenud pintslikarvakesed veest väljavõtmisel kokku kleepuvad?
2. Kui puhume seebimulli ja, lakanud puhumast, jätame ta toru külge, siis mispärast hakkab tema suurus vähenema?
3. Miks on puust pangekaant vee pealt kergem ära võtta serviti kui lapiti?
4. Tooge näiteid märgamise ja mittemärgamise nähtuste kohta.
5. Kuidas muutub tilga kuju joonisel 76, kui panna ta tema tsentrit läbiva telje ümber kiiresti pöörlema?
6. Kas on vee tõus 2 mm läbimõõduga kapillaartorus laia anuma nivoo suhtes ühesugune, kui vee temperatuur on kord 10^0 ja teine kord 30^0? Kui on erinev, siis missugusel juhul on vee tõus suurem?

7. Kui suur on kapillaartoru raadius, kui vesi temas seisab 2 cm võrra kõrgemal kui laias anumas?

8. Missugune on vee ja petrooli tõusu kõrguste suhe, kui muud tingimused on ühesugused?

KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Kuidas asetub vedeliku pind tasakaaluolekus väliste jõudude suhtes?

2. Mis võib öelda vedeliku kokkusurutavuse kohta välissurve mõjul?

3. Kas on vedelikkudel elastsust?

4. Missugused on vedela oleku põhilised tunnused (suuremate ainehulkade jaoks)?

5. Missugune on molekuli liikumine vedelikus?

6. Mida nimetatakse molekuli mõjusfääriks? Missugune on selle ligikaudne raadius?

7. Mis on pinna- ehk molekulaarrõhk?

8. Missuguse kuju võtab vedelik ainult molekulaarjõudude mõjul? Miks? Tooge näiteid.

9. Mis on pindpinevus, missugune on selle suund vedeliku pinna suhtes ja missuguste näidetega võib kinnitada tema olemasolu?

10. Kas sõltub vedeliku pindpinevus sellest ainest, mis on antud vedeliku pinna peal, või mis on lahustatud vedelikus?

11. Mis on tahke keha märgamine ja mittemärgamine vedeliku poolt?

12. Mis on menisk, millest ta sõltub ja missugune on ta kuju?

13. Kuidas sõltub pinna rõhk vedeliku pinna kõverusest?

14. Milles seisab kapillaarsuse nähtus?

15. Missugused on kapillaarsuse seadused?

16. Missugused kapillaarsuse näited on teada loodusest ja tehnikast?

Kirjandus. Бойс, Мыльные пузыри. Перельман, Занимательная физика, кн. I, гл. V.

4. Tahke keha omadused.

90. Kristalliline olek. Asudes tahkes olekus aine omaduste tundmaõppimisele, on kõigepealt tarvis täpsustada seda, mis on vaja mõista tahke keha all.

Selle sõna täpses tähenduses *tuleb tahke keha all mõista homogeenset keha, mis koosneb kristallidest.*

Kristalliks nimetatakse kindla geomeetrilise kujuga aineosakest, mis on piiratud loomulikkude tasapinnaliste tahkudega.

Kristallidest koosnevat keha nimetatakse kristalliliseks.

Kristalli tunnuseks pole ainult see, et ta on korrapärase, tasapinna osadega piiratud kujuga. Oluliseks tunnuseks on omaduste erinevus vastavalt suundadele. Ühe ja sama aine kristall juhib igas suunas isemoodi soojust, elektrit, laseb läbi valgust ja hakkab hõõguma löökidest.

Kui võtta klaasplaat, katta ta õhukese vahakihiga ja puudutada seda tulise traadiga, siis võib näha, et sulanud vaha moodustab ringi: traadi poolt soojendatud klaas soojenes igas suunas ühteviisi.

Kui lõigata kristallist (mis ei kuulu korrapärasesse süsteemi) plaat ja korrata temaga sama katset, siis sulanud vaha täidab ellipsi pindala — järelikult on kristalli soojusejuhtivus erinevates suundades erinev. Kristallid moodustuvad sulanud aine tahkestumisel (näiteks väävel), vedeliku aurumisel küllastunud lahust (näiteks keedusool, suhkur), aurust tahkesse olekusse üleminekul (jood, jää).

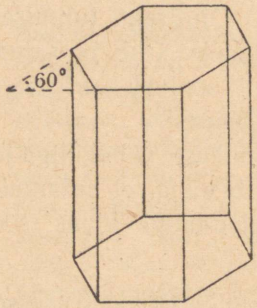
Mitmesuguste ainete kristallid on mitmekesise kujuga. Keedusoola kristall on kuubikujuline. Jääkristallid, mis moodustavad kummalise kujuga lumehelbeid, kujutavad enesest korrapäraseid kuuetahulisi prismasid (joonis 88); islandi pao kristall on romboeedrikujuline (joon 89).

Mõnedel ainetel on omadus kristalliseeruda mitmesugustes kristallikujudes. Näiteks võiks olla väävel (kollane, mida leitakse looduses, ja punane, mis saadakse sulanud väävli tahkestumisel, erinevad oma kristallide poolest) ja süsinik (teemandi ja grafiidi kristallid on erinevad).

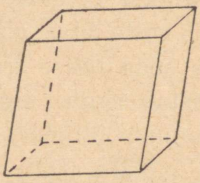
Kehade omadust moodustada kaks või rohkem liiki ühesuguse keemilise koostisega kristallilisi kujusid nimetatakse polümorfismiks (mitmekujususeks).

Üks nendest kujudest osutub mõnikord mittepüsivaks ja läheb iseenesest teise üle.

Ühtede kristalliliste kehade kristallid on suured ja neid saab kergesti eraldada palja silmaga, teistel aga niivõrd väikesed, et neid võib näha ainult mikroskoobis või ilmsiks teha



Joon. 88. Jää kristall.



Joon. 89. Islandi pao kristalli kuju — romboeeder.

veel peenemate vahenditega. Keha kristalli suurus võib aja jooksul muutuda. Nii lähevad üle suurteks väikesed raua ja terase kristallid. Seda üleminekut kiirendavad löögid ja raputamised. See toimub alati raudtee rööbastes, vaguni telgedes ja terassildades, mispärast nende seadmete tugevus aja jooksul väheneb.

91. Amorfsus. Tahkete kehade hulka mittetäpses, tingivas mõttes kuuluvad samuti kehad, mis on amorfses [1] olekus.

Amorfsust iseloomustab kristallide puudumine ja omaduste ühesugusus igas suunas.

[1] Kreeka keeles *amorfos* — kujuta.

Amorfsete kehade näideteks on: klaas, opaal, vaigud, merivaik, bituumen, liim, pigi ja vaha. Amorfsete kehade juures on kokkusurutavus, soojusejuhtivus, elektrijuhtivus, valguse kiirus ja mehaanilised omadused igas suunas ühesugused. Murrukoht on karpjas, aga mitte tasapinnaline nagu kristallide juures.

Sulamisel lähevad amorfsed kehad vedelasse olekusse järk-järgult (§ 101), ilma et rikutaks temperatuuri tõusu pidevust, kusjuures võib märgata suurt „pehmenemise intervalli", klaasi jaoks näiteks 500°-st kuni 1000°-ni. Vastupidises protsessis võib märgata „ülejahtumist", s. o. vedela oleku säilimist allapoole neid temperatuuri piire, milles toimus sulamine. Edaspidisel jahtumisel aine, jäädes vedelasse olekusse, pakseneb, tema viskoossus, s. o. kihtidevaheline sisemine hõõrdumine, tugevasti suureneb, molekulid kaotavad oma liikuvuse ja jäävad korraldamata, millest tekibki amorfne olek.

Amorfne olek on ülejahutatud vedeliku olek (vt. § 101-a); see on ligemal vedelale kui tahkele, kristallilisele olekule. Tõepoolest, nii nagu vedelikudki enda kaalu mõjul võtavad anuma kuju, nii ka amorfsed kehad muudavad oma raskuse mõjul oma kuju. Pikk klaastoru, asetatult otstega tugedele, kõverdub oma kaalu mõjul; lehtrisse visatud pigitükid vajuvad laiali ja tulevad lehtri torust välja pulga kujul. Kui asetada anuma põhjale tükk korki, sellele raputada pigitükikesi, pigi peale aga asetada tükk seatina, siis mõne aja pärast pigitükid ühinevad ühtlaseks horisontaalse pinnaga kehaks, seatina laskub sellest läbi põhja peale ja korgitükk ujub pinnale. Sellised kujumuutused toimuvad temperatuuri tõusmisel kiiremini.

Kuna amorfses olekus molekulid ei jõudnud võtta kristallilisele olekule omast korraldatud olekut ja sulamissoojust sellejuures ei eraldunud, siis amorfse aine energia tagavara

on suurem kui kristallilisel ainel. Kuid ilma välise mõjuta võib keha energia muutuda ainult vähenemise suunas. *Seepärast on amorfne olek mittepüsiv ja läheb soodsatel tingimustel üle kristallilisse olekusse.*

Pikema või lühema aja pärast tekivad amorfses klaasis kristallid — klaas tuhmub; amorfne klaasitaoline karamell kattub suhkru kristallidega jne.

92. Kristalli ruumvõre. Kristalli välise kuju korrapärasus andis juba XIX sajandi keskpaigas põhjust oletusele, et aine molekulid või aatomid, mis moodustavad kristalli, asetuvad neis korrapäraste ja võrdsetel kaugustel asetsevate ridadena.

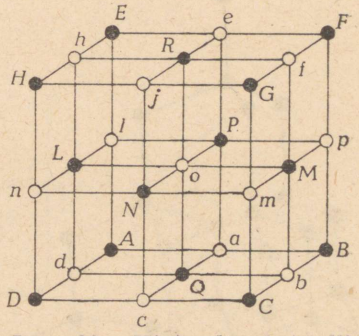
1891. aastal tuletas silmapaistev vene teadlane J. Fjodorov [1] teoreetiliselt seadused, mille järgi võivad korralduda ruumis kristalle moodustavad osakesed. Kakskümmend üks aastat hiljem — 1912. a. — leiutati vahetu eksperimentaalse uurimise meetodid kristalli sisemise ehituse uurimiseks rönt-

---

[1] Jevgraf Stepanovitš Fjodorov (1853—1919) on kristallide õpetuse teoreetiliste aluste loojaks. Tema tegi teaduses esimesena kindlaks, et kristalle moodustavad osakesed võivad üksteisega kombineeruda mitte rohkem kui 230-l viisil (seadusel); igale seadusele vastavalt võivad kristalliseeruda ainult teatud keemilised ained. J. Fjodorov lõi kristallokeemilise analüüsi, mis annab võimaluse, väljudes kristalli välisest vormist, määrata tema keemilist koostist ja teha teatud järeldusi tema sisemise struktuuri kohta. J. Fjodorov teostas originaalse pöörde ka kristallide eksperimentaalses uurimises. Tema poolt väljatöötatud niinimetatud teodoliitsed meetodid kristallograafias andsid teadlastele rikkalikemad võimalused aine uurimiseks. Kõik geoloogid ja kristallograafid tunnevad *„Fjodorovi goniomeetrit"* ja *„Fjodorovi universaallauakest"*. J. Fjodorov uuris paljude Uurali rajoonide geoloogilist ehitust. Ta oli Peterburi Mäeinstituudi professoriks ja direktoriks; pidas loenguid Moskva Põllumajanduse Instituudis (praegune Timirjazevi-nimeline Põllumajanduse Akadeemia).

genikiirte[1] abil. Nende meetodite väljatöötamisel mängis tähtsat osa teine vene teadlane J. Wulf. Määratu hulk kõige mitmekesisemaid struktuuri uurimusi kinnitasid hiilgavalt J. Fjodorovi väiteid. J. Fjodorovi poolt antud kristallilise ehituse seadused on tänapäeval vankumatuks aluseks, millele ehitab oma hoone nüüdisaja õpetus kristallidest ehk kristallograafia ja ühes sellega ka tänapäeva õpetus aine ehitusest.

Vaatleme kivisoola kristalli (joon. 90). Ta kujutab endast kloori ja naatriumi keemilist ühendit — NaCl.



Jon. 90. Kivisoola kristalli ruumvõre: ● — naatriumi ioonid, ○ — kloori ioonid.

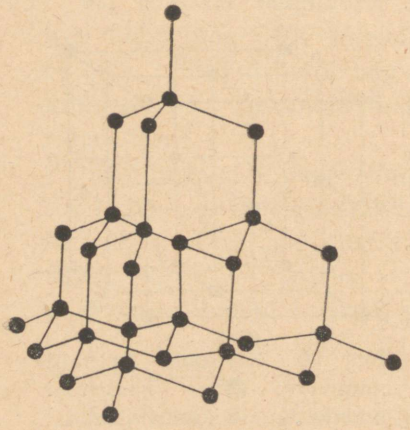
Kivisoola kristall koosneb üksikutest kloori ja naatriumi aatomitest, misjuures nende aatomid pole neutraalsed, vaid kannavad võrdseid ja vastupidiseid laenguid. Elektrilaenguga aatomit nimetatakse iooniks (vt. III osa). Seega naatriumkloriidi kristall nagu paljude teistegi soolade kristallid koosneb ioonidest; naatriumi ioonil on positiivne elektrilaeng, kloori ioonil on positiivsele laengule suuruselt võrdne negatiivne laeng. Kloori ja naatriumi ioonid on igas kolmes suunas asetatud vaheldumisi võrdsetel kaugustel. Nii naatriumi ioon (joonise valge ring) kui ka kloori ioon (joonise must ring) asetsevad teise elemendi kuue iooni keskel.

Jõud, millega ioonid mõjuvad vastastikku ja mis annavad kristallile tugevuse, pole midagi muud kui elektriliselt

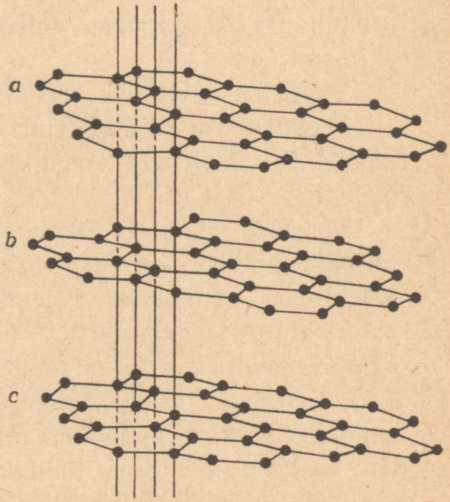
---

[1] Kuna enne röntgenikiirte õppimist (III osa) pole võimalik seletada selle uurimise meetodit, siis peab siin piirduma ainult uurimise tulemuste esitamisega.

laetud kehade vastastikused mõjud (vt. III osa 1. ptk). Ioonide, molekulide või aatomite poolt tekitatud ridade lõikepunktid moodustavad ruumis niinimetatud r u u m v õ r e. Iga kahe rea lõikumine annab võre sõlme — iooni, molekuli või aatomi asukoha.



Joon. 90-a.



Joon. 90-b.

Kristalliseerumise momendil korraldavad kohesioonijõud molekulid tihedamalt ühtedes suundades ja hõredamalt teistes suundades. Molekulid või nende osad — ioonid — korralduvad peaasjalikult paralleelsetes tasapindades; mitmesugused paralleelsete tasapindade grupid võivad lõikuda ruumis mitmesuguste nurkade all, millest tekivadki kristallide mitmesugused kujud.

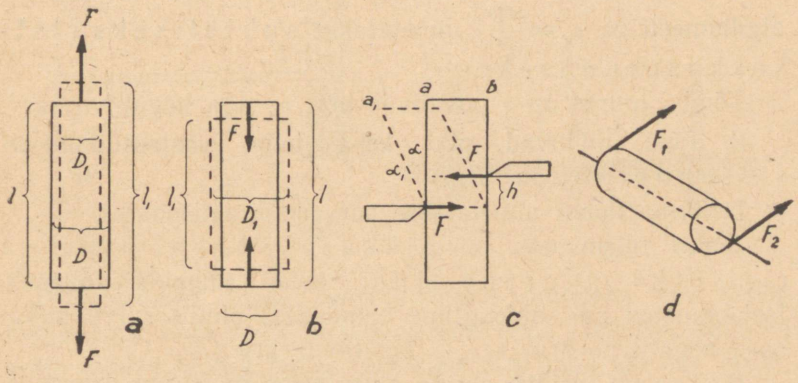
Kristallide kujude mitmekesisus nähtavasti mõjutab kristalliliste ainete füüsiliste omaduste mitmekesisust. Nii on teemandi kristalli ruumvõrel joonisel 90-a kujutatud väli-

mus, aga teine süsiniku eriliik — grafiit — koosneb kristallidest, mille ruumvõre näeb nii välja nagu joonisel 90-b.

Nagu teada on grafiidil teemandist väiksem kõvadus.

93. Deformatsioon. Igasugusel kehade vastastikusel mõjutusel tekib kuju või ruumala muutus, või kuju ja ruumala muutus korraga mõlema mõjutuse osalisel.

Keha kuju või ruumala muutust nimetatakse deformatsiooniks [1].



Joon. 91. Deformatsiooni põhiliikide skeem.

Deformatsiooni tundmaõppimisel mõistame tahke keha all tahket keha tavalises mõttes, mitte ainult kristallilist keha.

Kujutleme tahket keha varvakujulisena. Olenevalt deformeerivate jõudude suunast varva suhtes, võivad tekkida järgmised deformatsiooni liigid.

1. Jõud mõjuvad piki keha telge vastassuunaliselt v ä l j a p o o l e (joon. 91 *a*).

Deformatsiooni nimetatakse tõmbedeformatsiooniks. Tõmbe puhul keha p i k e n e b p i k i s u u n a s ja v ä h e n e b r i s t s u u n a s; keha ruumala suureneb.

---

[1] *Deformatio* — tähendab ladina keeles kuju muutust

Tõmbedeformatsiooni iseloomustus:

a) Kui algpikkus on l, pikkus peale tõmmet l_1, siis $\Delta l = l_1 - l$ nimetatakse absoluutseks pikenemiseks; absoluutse pikenemise suhet algpikkusega $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ nimetatakse suhteliseks pikenemiseks.

b) Kui varva algdiameeter on D, peale tõmmet — D_1, siis $\Delta D = D_1 - D$ nimetatakse absoluutseks ristkokkusurumiseks; absoluutse ristkokkusurumise suhet algdiameetriga $\varepsilon_q = \frac{\Delta D}{D}$ nimetatakse suhteliseks ristkokkusurumiseks.

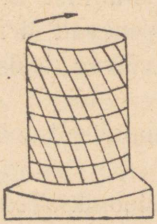
Tõmbe juures on ε positiivne arv, ε_q aga negatiivne arv.

2. Jõud mõjuvad piki keha telge vastassuunaliselt sissepoole (joon. 91 *b*).

Deformatsiooni nimetatakse survedeformatsiooniks.

Surve tulemuseks on pikkuse vähenemine ja ristlõike suurenemine; keha ruumala väheneb. Iseloomustus on analoogiline eelmisega, ainult surve puhul on ε negatiivne arv ja ε_q — positiivne arv.

Poisson leidis, et iga aine jaoks on teatud deformatsiooni piirides *suhe* $\frac{\varepsilon}{\varepsilon_q}$ *konstantne suurus.*



Joon. 92. Väänatud silindri moodustajad asetsevad kruvijooneliselt.

3. Jõud mõjuvad varva pikiteljega risti, on üksteisest väikesel kaugusel ja suunatud keha sisse (joon. 91 *c*).

Deformatsiooni nimetatakse nihkeks.

Nihke juures nihutatakse ühte kihti teiste suhtes; kui keha ühtsus rikutakse, siis tekib lõige. Nihke puhul muutuvad nurgad (täisnurgad muutuvad teravateks ja nürinurkadeks). Keha ruumala ei muutu.

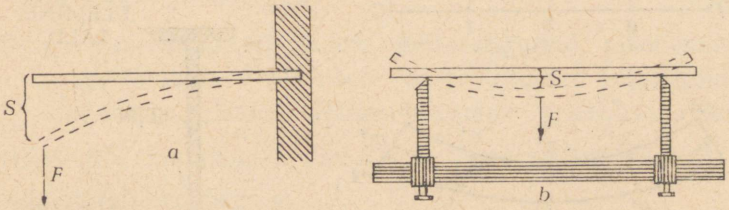
4. Jõud pööravad varva otsi pikitelje ümber vastupidistes suundades (joon. 91 *d*).

Deformatsiooni nimetatakse väändeks (joon. 92).

Vääne tekib masinate võllides, kruvides, puurides, kruvikeerajates jts.

5. Deformatsiooniga, mida nimetatakse paindeks, on tegemist siis, kui varb (palk) pannakse otstega aluste peale ja koormatakse teda keskelt, või kinnitatakse ta ühest otsast ja koormatakse teisest otsast.

Iseloomustab painet läbipaindumine S (joon. 93).



Joon. 93. Paine.

Et määrata prussi vastupidavust paindele, on tarvis teada mitte üksi seda, missugune on tema ristlõige, vaid ka seda, kuidas jaotub temas materjal. Kui laud asetada lapiti, siis painutab teda koormus rohkem kui serviti asetamisel, kuigi mõlemal juhul on materjali hulk ühesugune.

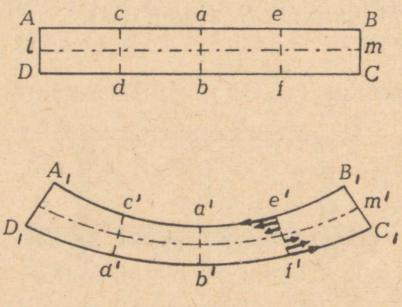
Painde puhul tõmmatakse ainet kumeral poolel, nõgusal poolel aga surutakse teda. Painutatava keha keskel peab olema kiht, mis ei allu ei tõmbele ega survele ja mida nimetatakse neutraalseks. Selles kihis ja tema lähemas ümbruses tekivad deformeerumise korral ainult tühiselt väikesed elastsusjõud.

Seega on prussi kihid seda suurema pinge all, mida kaugemal nemad asuvad neutraalsest kihist (joon. 94).

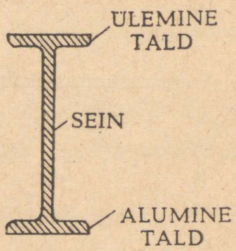
Seepärast sama suure materjali hulga juures on toru vastupidavam paindele kui täisvarb (varva keskmine osa ei ole pinge all, keskmises osas asetsev materjal ei kanna koormust ja osutub ülearuseks). Meie luukere

luud, olles torud, hoiavad meid ülal paremini kui siis, kui nad oleksid sama suurest massist täisvarvad.

Kõrreliste varred (kõrred) on torulised; selle tõttu nad panevad välistele jõududele, näiteks tuulele, paremini vastu kui sel juhul, kui kogu kõrre mass oleks kontsentreerunud täisvarresse.



Joon. 94. Deformatsioon painde puhul: punktiirjoon on neutraalne kiht, noolekesed lõikes $e'f'$ on selles lõikes mõjuvad välisjõud.



Joon. 95. I-raua läbilõige.

I-raud (joon. 95) täidab samuti seda tingimust, et materjali peamass asetseb väljaspool, võimalikult kaugemal keskjoonest: mõlemad tallad, mis tegelikult kannavad kogu koormust, on ühendatud õhukese, kuid siiski küllalt tugeva seinaga, mis ei lase painde puhul taldasid nihkuda teineteise poole.

94. Deformatsiooni suuruse sõltuvus deformeerivast jõust. Iga deformatsioon sõltub materjali omadustest, koormuse suurusest (deformeerivast jõust) ja koormamise viisist (alaline, muutlik, löögitaoline).

Et välja selgitada deformatsiooni sõltuvust koormuse suurusest, valime ühe mingi deformatsiooni liigi. Peatume tõmbel. Koormust hakkame iseloomustama erilise suurusega,

mida nimetame p i n g e k s. *Pinge on suurus, mis on mõõdetav ühele pinnaühikule mõjuva jõuga.*

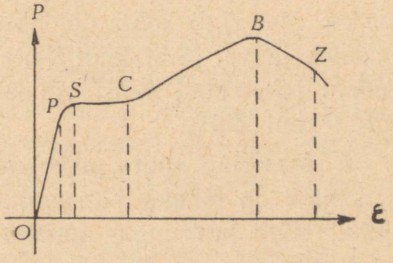
Kui jõudu tähistada tähega F, pindala tähega S ja pinget tähega p, siis:

$$p = \frac{F}{S}.$$

CGS-süsteemis on pinge ühiku nimetuseks $\frac{\text{düün}}{\text{cm}^2}$; tehnikas kasutatakse ühikut $\frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$.

Pinge suurendamisel saame mitmesuguseid pikenemisi; igale pinge suuruse väärtusele vastab teatud pikenemine (Δl). Uurimuse tulemusi võime kujutada graafiliselt, kui abstsissteljele kanname s u h t e l i s e pikenemise ($E = \frac{\Delta l}{l}$) ja ordinaatteljele pinge p.

Valatud terase jaoks on graafik kujutatud joonisel 96. Graafik võimaldab eraldada järgmised staadiumid, mida läbib uuritav aine (metall) koormuse suurenemisel.



Joon. 96. Valatud terase suhtelise pikenemise ε sõltuvuse graafik koormusest p.

1. Muutumine O-st kuni punktini P. Graafik kujutab sirget joont. Sirgjoon on võrdelisuse tunnus. Järelikult nendes piirides on *suhteline pikenemine võrdeline pingega.*

Deformatsiooni, mille juures on tegemist võrdelisusega deformatsiooni mõõtva suuruse ja deformatsiooni väljakutsuva pinge vahel, nimetatakse e l a s t s e k s d e f o r m a t s i o o n i k s. Elastsete deformatsioonide juures taastatakse peale koormuse kõrvaldamist täielikult esialgne kuju või ruumala.

Elastseteks jõududeks nimetataksegi neid molekulidevahelisi jõude, mis tekivad kehas deformatsiooni puhul ja mis taastavad esialgse kuju või ruumala.

2. Edaspidisel pinge surenemisel (kõvera osa *PS*) pikenemine kasvab kiiremini kui pinge juurdekasv; võrdelisus on rikutud. Katse näitab, et sel juhul koormamise lakkamisel ei kao deformatsioon täielikult. Sellist deformatsiooni nimetatakse mitte-elastseks deformatsiooniks (jäävaks deformatsiooniks).

Seda suurimat pinget, mille puhul deformatsioon jääb veel elastseks, nimetatakse elastsuse piiriks. Graafikus kujutab teda punkti *P* ordinaat.

3. Graafiku osa *SC* on peaaegu paralleelne abstsisstelljega. See tähendab seda, et pikenemine jätkub vaatamata sellele, et pinge ei suurene. Materjali omadust jätkata pikenemist teatud konstantse pinge juures nimetatakse voolavuseks. Materjali kohta öeldakse, et ta „voolab", s. o. kiiresti pikeneb jääva (*S*-st kuni *C*-ni) või vähe suureneva koormuse juures (*C*-st kuni *B*-ni) või isegi väheneva koormuse juures (*B*-st kuni *Z*-ni).

4. Materjali suure pikenemise juures tekib selle suur kitsenemine ja lõpuks katkemine mingil kohal. Pinget, mille puhul tekib katkemine, nimetatakse katkemispingeks. Katkemispinge tundmisel on suur tähtsus konstruktsioonide materjalide valikul. Sellepärast iga materjali omadused uuritakse hoolikalt läbi laboratooriumides.

95. Sitkus, rabedus, plastilisus. Kui toimetada analoogilisi uurimusi mitmesuguste materjalidega, näiteks nahaga, betooniga, marmoriga, ja ehitada samasugused graafikud kui terasegi jaoks, siis ilmneb, et graafiku kuju ja tema üksikute osade suurused on väga erinevad. Sellepärast jaotatakse tahked kehad nende käitumise järgi koormuse suurenemisel järgmistesse liikidesse.

1. *Sitked ained.* Ainet nimetatakse sitkeks, kui ta näitab voolavust enne katkemist. Niisuguste ainete juures ilmneb teravalt piirkond, kus deformatsioon ja pinge on võrdelised. Järelikult nendel ainetel on lai elastsete deformatsioonide piirkond. Seepärast nimetatakse selliseid aineid ka elastseteks. Sellesse liiki kuuluvad paljud metallid, nende hulgas on esimesel kohal teras.

2. *Rabedad ained.* Ainet nimetatakse rabedaks, kui tema juures ei ilmne voolavust enne katkemist. Rabedate ainete juures on deformatsiooni ja pinge võrdelisust märgata väga piiratud ulatuses; järelikult on nad vähe elastsed. Tuleb silmas pidada seda, et rabedus ei tähenda elastsuse täielist puudumist: ka rabedate ainete juures on tegemist elastsete deformatsioonidega õige väikeste koormuste piirides.

Rabedate ainete hulka kuuluvad näiteks malm, betoon ja klaas.

3. *Plastilised ained.* Ainet nimetatakse plastiliseks, kui ta säilitab muutunud kuju. Plastiliste ainete juures saadakse juba väikeste koormuste puhul märgatavad jäävad deformatsioonid; elastseid deformatsioone ei esine peaaegu sugugi. Plastilise aine näiteks on toores savi, vaha, hõõgumaaetud raud.

Küllaldaste koormustega võib elastsematele kehadele anda soovitud kuju kas külmas või hõõguvas olekus. Nii saadakse kindla kujuga valtsidega kuumvaltsimise juures mitmesuguseid profiilraua sorte (nurkraud, T-raud jts.) ja terasröörpaid; külmstantsimise abil valmistatakse metallraha, mitmesugustest sulamitest medaleid jne.

Toodud klassifikatsioon ei ole absoluutselt täpne. Ka rabedaid aineid nagu marmor ja klaas võib viia plastilisse olekusse, kui neid panna suure rõhu alla. Nende ainete omaduste muutumisega hiiglasuurte rõhkude all on seletatav mitmesuguste kivimite tekkimine.

96. Lubatud pinge. Seda pinge suurust keha hädaohtlikumas kohas, mille juures võib keha lugeda küllaldaselt tugevaks ja kestvaks, nimetatakse *lubatud pingeks*. Hädaohu vältimise otstarbel kasutab ehitustehnika ehitustel ainult lubatud pingeid.

Allpool toodud tabel annab materjalide kohta tõmbe ja surve purustavad (katkemis-) pinged ja lubatud pinged (andmed on võetud raamatust Проф. Худяков, Сопротивление материалов, 1930).

Purustavate ja lubatud pingete tabel tõmbel ja survel:

Materjali nimetus	Tõmbepinge $\frac{kG}{mm^2}$-es		Survepinge $\frac{kG}{mm^2}$-es	
	Katkemispinge	Lubatud	Purustav	Lubatud
Raud valtsimisel	33—40	6—7,5	—	—
Valatud raud	34—44	—	35—55	12—6
Valatud teras	45—100	9—10	70—150	15—8
Malm	12—18	2—2,5	70—85	9—6
Punane vask, taotud	20—22	7—9	40—70	9—6
Valgevask	15	—	7,5	0,75
Nahkrihm	2,8—3,5	0,2—0,28	—	—
Kanepiköis	3,5—6	1	—	—
Tellis	—	—	1—3	0,07—0,1
Betoon	—	—	0,8—2,5	0,05

Katkemispinge suhet lubatud pingega nimetatakse tugevuse varuks ehk kindluse astmeks.

97. Hooke'i seadus. Eelnevast käsitelust on näha, et aine deformatsiooni seaduspärasus koormuse suurenemisel osutub mitmekesiseks ja keerukaks.

Kõige lihtsam on seaduspärasus selles deformatsiooni piirkonnas, mida nimetatakse *elastseks deformatsi-*

ooniks. Elastse deformatsiooni seaduse avastas inglise füüsik Hooke (1635—1702) juba 1676. a.: *suhteline deformatsioon on võrdeline pingega.*

See seadus on kehtiv kõikide deformatsiooniliikide kohta, kuid ainult väikeste deformatsioonide puhul selle osa jaoks, milles graafikuks on kalduseisev sirgjoon (piirkond *OP* joonisel 96).

Tõmbe või surve jaoks saab Hooke'i seadus järgmise matemaatilise kuju, kui võrdetegurit tähistada $\frac{1}{E}$-ga, suhtelist pikenemist ε-ga ja pinget p-ga:

$$\varepsilon = \frac{p}{E}. \qquad \text{(XIII-a)}$$

Suurust E nimetatakse elastsus- ehk Young'i mooduliks (mõõduks).

Kui asendada ε ja p nende väärtustega, siis võib Hooke'i seaduse valemit arendada järgmiselt:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{ES} \quad \text{ehk} \quad \boxed{\Delta l = \frac{Fl}{ES}} \qquad \text{(XIII-b)}$$

Sel kujul sõnastatakse seadust nii: *absoluutne pikenemine on võrdeline deformeeriva jõuga ja keha pikkusega ning on pöördvõrdeline tema ristlõike pindalaga.*

Missugune füüsikaline mõte on elastsusmoodulil?

Sellest saame kujutluse, kui võtame $\Delta l = 1$ ja

$$S = 1; \text{ siis } \frac{\Delta l}{l} = 1 \text{ ja } E = F.$$

Järelikult *elastsusmoodul on arvuliselt võrdne pingega, mille puhul oleks absoluutne pikenemine võrdne algpikkusega* (sel tingimusel muidugi, et Hooke'i seadus oleks kehtiv mistahes suurusega deformatsioonide jaoks). Elastsusmoodulit avaldatakse nendes ühikutes, mis on kindlaks määratud pinge jaoks.

Tuleb märkida, et pole võimalik E-d mõõta vahetult venitatava aine pikkuse kahekordistamise kaudu sellepärast, et iga varb katkeb enne pikkuse kahekordistumist.

Määratakse E mistahes pikenemistest valemi $E = \frac{Fl}{\Delta lS}$ järgi.

Antud E puhul võib arvutada iga suurust, mis kuulub valemisse XIII-b.

98. ***Laboratoorne töö 10.*** **Deformatsiooni suuruse ja deformeeriva jõu suuruse vahelise sõltuvuse uurimine.**

Töövahendid: 1) millimeetrijaotustega joonlaud; 2) spiraalvedru horisontaalse osutiga ja konksuga alumises otsas; 3) võrdsete koormuste kogu; 4) statiiv.

Töö eesmärk: muutes deformeeriva jõu suurust ja mõõtes saadud pikenemised, leida nende suuruste vaheline seos.

Töökäik. 1. Kinnitage statiivile vertikaalselt joonlaud ja ülemises otsas olevale naelale riputage vedru.

2. Märkige skaalal jaotus, millele näitab horisontaalne osuti, ja kirjutage see tabelisse kohale, mis vastab koormusele 0.

Katse nr.	Koormuse suurus F	Osuti näitamised koormamisel	Osuti näitamised koormusest vabanemisel	Kahe osuti näitamise keskmine	Vedru pikkuse juurdekasv Δl	Pikkuse juurdekasv ja koormuse suhe $\frac{\Delta l}{F}$

3. Riputage vedru alumisele konksule üks võrdsetest koormustest ja märkige ära osuti näitamine.

4. Lisage järk-järgult ühe koormuse kaupa vedrule raskust juurde, kirjutades tabelisse kogu koormus ja vastavad osuti näitamised.

5. Riputanud üles 6—12 koormust (sõltuvalt vedru omadustest), võtke koormused ära ühekaupa ja kirjutage iga kord tabeli vastavasse lahtrisse see skaala jaotus, mille kohale jäi peatuma horisontaalne osuti.

6. Iga koormuste arvu jaoks arvutage osuti näitamiste keskmine, mis on saadud koormuste lisamisel ja äravõtmisel.

7. Lahutades igast tabeli viienda lahtri arvust sama lahtri järgnev arv, arvutage antud koormusele vastav vedru pikkuse juurdekasv.

8. Arvutage iga rea jaoks saadud pikkuse juurdekasvu suhe mõjuva jõuga, väljendage see seos sõnadega ja võrrelge saadud sõnastust Hooke'i seaduse sõnastusega.

99. Energia muundumine deformatsioonide juures. Kuna igasuguse deformatsiooni juures tekivad deformatsiooni takistavad elastsusjõud, siis nende takistuse ületamisel tuleb deformatsiooni peale kulutada tööd. See töö muundub deformeeritava keha potentsiaalseks energiaks: iga kokkusurutud või väljavenitatud vedru, kokkukeeratud teraslint, kokkusurutud gaas või vedelik on ise võimelised tegema tööd nende endise oleku taastamise juures elastsusjõudude poolt.

Kui keha juures on toimunud elastne deformatsioon, siis kogu kulutatud töö muundub potentsiaalseks energiaks, mis tulebki ilmsiks deformeeriva jõu kõrvaldamisel.

Plastilise deformatsiooni juures saadakse keha jääv deformatsioon ja deformeeriva jõu kõrvaldamisel antakse ainult osa deformatsioonile kulutatud energiast elastse keha poolt tagasi. Ülejäänud energia kulutatakse keha soojenemiseks jääva deformatsiooni juures. Tõepoolest soojenevad deformatsiooni juures seatina, separaud ja teised pehmed kehad.

100. Tahke keha molekulaar-kineetiline teooria. Tahkete kehade kuigi aeglane difusioon ja mõnede juures märgatav aurumine näitavad, et nende ruumvõre sõlmedes asetsevad

aatomid või ioonid liiguvad. Kuna kristallilisel kehal aga on muutumatu kuju, siis aatomite liikumine võib olla ainult võnkuv liikumine [1].

Kristallilises kehas on peaaegu kõikidel aatomitel teatud tasakaalu-asendid ja ühed ei liigu gruppide kaupa teiste suhtes (erinevalt vedelikust). Kristallilise keha aatomid ainult võnguvad tasakaalu-asendi ümber ja ei liigu translatoorselt (erinevalt gaasidest).

Nende võnkumiste keskmine energia on konstantse temperatuuri juures kindel ja suureneb temperatuuri tõusmisel.

Kui katsuda leida midagi sarnast tahke keha aatomite olekule, nagu see oli tehtud gaaside ja vedelikkude jaoks, siis suurimat sarnasust pakub metslooma liikumine, kes kargab puuris nurgast nurka; tema võnkumiste mõõted on piiratud puuri mõõdetega.

Harjutus 9.

1. Elektrolüütvasest traat pikkusega 1,5 m ja ristlõikega 3 mm^2 pikenes 20 kG-se jõu mõjul 0,9 mm võrra. Leida Young'i moodul.

Vastus: 11 100 $\frac{kG}{mm^2}$.

2. Missugust jõudu on tarvis ümmarguse duuralumiiniumist varva katkirebimiseks, kui diameeter on 0,8 cm ja tugevuse piir katkemise vastu 40 $\frac{kG}{mm^2}$?

Vastus: $\approx$ 2000 kG.

3. 2,4 m pikkuse malmsamba ristlõige on 1500 cm^2. Leida 10 000 kG-sest koormusest tekkinud kokkusurumise suurus, kui Young'i moodul on 8000 $\frac{kG}{mm^2}$.

Vastus: $\approx$ 0,02 mm.

---

[1] Ei puudu võimalus, et eri juhtudel mõned aatomid lähevad välja naaberaatomite mõju alt ja liiguvad translatoorselt: nii toimub tahkete kehade aurumine.

4. Missuguse pikenemise saab raudtraat, mille pikkus on 1,8 m ja diameeter 0,5 mm, 1,5 kG-selt koormuselt? Young'i moodul on $20\,000\ \frac{kG}{mm^3}$.

Vastus: $\approx$ 0,7 mm.

5. Kas ületatakse elastsuspiir $40\ \frac{kG}{mm^2}$, kui eelmise ülesande traadile riputada 4 kG-ne koormus?

6. Kas kannatab ülesandes 5 traat koormust 10 kG, kui tugevus katkemise vastu on $60\ \frac{kG}{mm^2}$?

7. Noolutatud terase elastsuspiir on $58{,}3\ \frac{kG}{mm^2}$, Young'i moodul aga $20\,000\ \frac{kG}{mm^2}$. Kas on tegemist elastse või jääva deformatsiooniga, kui traat, mille pikkus on 2 m ja ristlõige 0,8 mm^2, pikeneb 6 mm võrra?

8. Arvutada telliskorstna suurim lubatud kõrgus, kui survetugevus on $100\ \frac{kG}{mm^2}$, tugevuse varu on 10 ja tellise erikaal on $1{,}6\ \frac{G}{cm^3}$.

Vastus: 62,5 m.

9. Missugust jõudu on tarvis, et raudvarba, mille pikkus on 1,6 m ja ristlõige 0,8 mm^2, venitada ilma temperatuuri muutmiseta sama palju, kui ta võib pikeneda soojenemisel 0^0-st kuni 40^0-ni?

Vastus: $\approx$ 8 kG.

10. Missugune on väikseim pikkus, mille juures vasktraat võib katkeda oma enese raskusest, kui traadi tõmbetugevus on $4200\ \frac{kG}{cm^2}$ (vase erikaal on $8{,}9\ \frac{G}{cm^3}$)?

Vastus: 4720 m.

11. Missugune ristlõige tuleb anda 1 m pikkusele tammest varvale, et ta 4 kG koormuse juures pikeneks 1 mm võrra? Young'i moodul on $1000\ \frac{kG}{mm^2}$.

Vastus: 4 mm^2.

KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Missuguseid kehi nimetatakse tahketeks selle sõna täpses tähenduses?
2. Mida nimetatakse kristalliks?
3. Millega seletatakse kristallilise kuju korrapärasust?
4. Mida nimetatakse aine elastsuseks?
5. Missuguse elastsuse liigiga on tegemist aine juures tahkes, vedelas ja gaasilises olekus?
6. Mida nimetatakse elastseks ja mida mitteelastseks deformatsiooniks?
7. Milles seisab Hooke'i seadus elastsete deformatsioonide jaoks?
8. Mida nimetatakse elastsuse piiriks?
9. Mida nimetatakse materjali pingeks, katkemispingeks ja lubatud pingeks?
10. Mille poolest erinevad üksteisest sitked, rabedad ja plastilised ained?
11. Mida nimetatakse elastsusmooduliks ja missugune on selle füüsikaline tähendus?
12. Missugustes ühikutes mõõdetakse elastsusmoodulit?
13. Missugused energia muundumised võivad esineda deformatsioonide juures?

Kirjandus. Перельман, Занимательная физика ч. I, статья из гл. V. Вульф, Симметрия и её проявления в природе. Ходаков, Архитектура кристаллов.

IV. Aine agregaatoleku muutumine.

1. Sulamine ja tahkestumine.

101. Sulamise ja tahkestumise temperatuur. Sulamise ja tahkestumise nähtused esitati põhijoontes juba mittetäieliku keskkooli kursuses. Tuletame meelde põhilisi fakte ja reegleid.

Sulamiseks nimetatakse keha ülemineku tahkest olekust vedelasse, kui kehale antakse soojust.

Tahkestumiseks nimetatakse üleminekut vedelast olekust tahkesse, kui keha soojust ära annab.

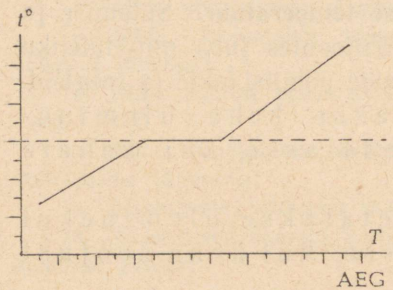
Iga kristallilise aine jaoks on jääva välisrõhu juures kindel sulamistemperatuur, viimane osutub ka tahkestumistemperatuuriks.

Sulamistemperatuuri normaalrõhu juures nimetatakse sulamispunktiks.

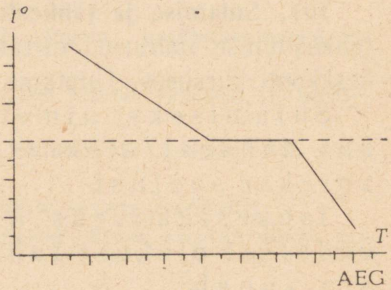
Amorfsed kehad — klaas, pigi, vaha, parafiin — pehmenevad soojenemisel järk-järgult, muutudes ikka vähem sitketeks ja nad *ei evi kindlat sulamistemperatuuri.* Samuti toimub tahkestumisprotsess.

Puhtkristalliliste ainete *sulamine ja tahkestumine* normaalrõhu juures toimub kindlatel temperatuuridel, mis on iseloomustavad igale ainele.

Kui katseklaasi panna naftaliini või mõnda teist kristallilist ainet, paigutada sellesse termomeeter, aeglaselt soojendada katseklaasi ja võrdsete ajavahemikkude järel üles märkida temperatuur, siis näitavad kõik vaatlused, et niipea kui on alanud sulamine, jääb sulatatava keha temperatuur muutumatuks, vaatamata soojuse juurdevoolule. Suurem või väiksem soojuse juurdevool võib sulamiskäiku kiirendada või aeglustada, kuid ei muuda sulamistemperatuuri. Kui kogu tahke keha on sulanud, tõstab edasine soojuse juurdevool moodustunud vedeliku temperatuuri.



Joon. 97.



Joon. 98.

Kui kujutada graafiliselt aine temperatuuri sõltuvust ajast, mille jooksul temale antakse soojust, kandes koordinaattelgedele aja ja temperatuuri, siis graafik näeb välja nii, nagu on kujutatud joon. 97, kusjuures horisontaalne lõik osutab temperatuuri konstantsusele sulamise ajal.

Vastupidine käik — vedeliku jahenemine, tahkestumine ja tahke keha jahenemine on kujutatud joon. 98.

Kõikidest sama liiki katsetest võib tuletada seaduse:

Kristallilise aine kogu sulamise ja tahkestumise ajaks jääb temperatuur konstantseks.

Sulamid sulavad peaaegu alati madalama temperatuuri juures kui nende koostismetallid. Näit. sulab inglistina 238°,

seatina 327° juures; inglis- ja seatina sulam (vahekord 1 : 2) sulab umbes 170° temperatuuri juures.

Peale sulamistemperatuuri muutumise muutuvad ka sulamite teised omadused, võrreldes puhaste metallide omadustega. Suureneb näiteks tugevus. Lennukiehituse juures on väga levinud alumiiniumi ja magneesiumi sulamid vasega, rauaga jt. nende suure tugevuse ja samaaegse kerguse pärast.

Teistel juhtudel saadakse sulameid, mis on kõvad nagu teemant, sulameid, mis ei oksüdeeru isegi mitte kokkupuutumisel hapetega (roostekindel teras), sulameid, mis peaaegu ei paisu (invar) jms.

101-a. Vedeliku ülejahutamine. Vedelikku võib mõnel juhul jahutada mõne kraadi võrra alla sulamispunkti, ilma et ta tahkestuks. Seda nähtust nimetatakse ülejahutamiseks. Seda võib kergesti saada sulatatud hüposulfitiga. Hüposulfiti sulamispunkt on 48°. Hüposulfit sulab katseklaasis ja jääb temas vedelasse olekusse isegi toatemperatuurini jahenemisel. Kui visata katseklaasi hüposulfiti kristallike või lihtsalt raputada klaasi, siis algab aine kiire kristalliseerumine ja tema temperatuur tõuseb sulamistemperatuurini. Sulatatud aine üleminekul kristallidesse tema energia väheneb; vabanenud energia jaotub kogu massile ja tõstab tema temperatuuri.

See ülejahutamine toimub ka looduses. Udutilgakesed võivad jääda jäätumatuks isegi tugevate külmade puhul. Niisugused tilgakesed moodustavad maha langedes kiilasjää. Nad on ka hädaohtlikud lennukeile, kuna nad kutsuvad esile lennukite jäätumist.

Ülejahutatud vedelikuks on ka harilik klaas, kuna tema kristalliseerumine ei saa tekkida tema viskoossuse kiire suurenemise tõttu temperatuuri langemisel.

102. Sulamissoojus. Tahke keha temperaturi tõus näitab soojenemisel tahke keha molekulide võnkliikumise energia suurenemist.

Edasine soojuse juurdevool väljastpoolt, kui temperatuur saavutab sulamispunkti, kulutatakse aine molekulide[1] vaheliste seoste muutmisele, tööks kohesioonijõudude vastu. Soojuse kulu seoste muutmise töö peale ei tõsta molekulide liikumisenergiat ja järelikult ei ole avastatav termomeetriga, ta läheb täielikult oleku muutmiseks. Sellepärast selle soojuse osa endiseks nimetuseks oli varjatud soojus.

Mitmesugused ained erinevad üksteisest selle soojushulga poolest, mis on vajalik igaühe sulatamiseks võrdsetes tingimustes. Seepärast on selle aine iseloomustamiseks sisse toodud eri suurus, mida nimetatakse sulamissoojuseks.

Sulamissoojus on suurus, mida mõõdetakse selle soojushulgaga, mis on vajalik tahke keha 1 g sulatamiseks sulamistemperatuuril.

1 g vedeliku tahkestumisel eritub tahkestumistemperatuuril soojushulk, mis võrdub sulamissoojusega.

Sulamissoojuse ühikuteks on $\frac{\text{cal}}{\text{g}}$ ja $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$.

Kui tähistada sulamissoojust λ-ga, sulatatava keha massi m-ga ja sulamiseks vajalikku soojushulka Q-ga, siis

$$\boxed{Q = \lambda m.} \qquad \text{(XIV)}$$

Tänapäeval pole ühtegi harilikes tingimusis tahket keemilist elementi, mida ei saaks muuta vedelaks. Isegi süsinikku, mis normaalrõhu juures temperatuuri tõusmisega läheb tahkest olekust otse üle gaasilisse, oli saadud juba 1915. a.

---

[1] Ehk ioonide vahel.

vedelas olekus 22-atmosfäärilise rõhu ja umbes 8000° temperatuuri juures.

103. Soojusliku tasakaalu võrrand sulamisel või tahkestumisel. Vaatame, missuguse kuju saavad soojushulga arvutamisvalemid oleku muutumisel.

Olgu vedela aine mass m erisoojusega c_v ja temperatuuriga t kallatud veemassi m_2, mille temperatuur on t_1 ja mis asub kalorimeetris; kalorimeetri mass olgu m_1 ja tema erisoojus c_1. Missugune on aine sulamis- (tahkestumis-) soojus, kui tema sulamistemperatuur on t_0 ja erisoojus tahkes olekus cm? Segu lõplik temperatuur — Θ.

Vedela aine poolt jahenemisel äraantud soojus temperatuurist t tahkestumistemperatuurini t_0:

$$Q = c_v m\,(t - t_0).$$

Aine poolt tahkestumisel äraantud soojus ilma temperatuuri muutuseta (sulamissoojus):

$$Q_1 = \lambda m.$$

Tahke aine poolt tahkestumisel äraantud soojushulk tahkestumistemperatuurist t_0 kuni segu temperatuurini Θ:

$$Q_2 = c_t m\,(t_0 - \Theta).$$

Soojushulk, mida saab kalorimeeter soojenemisel algtemperatuurist t_1 kuni lõpptemperatuurini Θ:

$$Q_3 = c_1 m_1\,(\Theta - t_1).$$

Soojushulk, mida vesi saab soojenemisel algtemperatuurist t_1 kuni lõpptemperatuurini Θ:

$$Q_4 = c_2 m_2\,(\Theta - t_1).$$

$$Q + Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4.$$

$$c_v m\,(t - t_0) + \lambda m + c_t m\,(t_0 - \Theta) = (c_1 m_1 + c_2 m_2)\,(\Theta - t_1).$$

Siit määrame sulamissoojuse:

$$\lambda = \frac{(c_1 m_1 + c_2 m_2)\,(\Theta - t_1) - c_v m\,(t - t_0) - c_t m\,(t_0 - \Theta)}{m}$$

104. Keha ruumala muutumine sulamisel ja tahkestumisel. Kehade rõhuv enamus (väga väheste eranditega, nagu jää, malm ja mõned teised) paisub sulamisel ja tõmbub kokku tahkestumisel.

Kui sulatada klaasis natuke parafiini ja lasta tal tahkestuda, siis me näeme, et tahkestunud parafiini pind muutub tasase asemel nõgusaks. Tahkestunud parafiini nõgusus seletub sellega, et parafiini ruumala on vähenenud. Nõgusat pinda võib täheldada ka terase- ja seatinatükkidel, mis on seletatav, nagu parafiinigi juures, nende ruumalade vähenemisega tahkestumisel.

Jää ja malm sellevastu tõmbuvad sulamisel kokku, vesi ja vedel malm paisuvad tahkestumisel.

Tahkestumisel suureneb ruumala ka vismuti juures, mis kuulub trükitähtede metalli koostisesse.

Kui täita klaaspudel veega, tihedalt sulgeda ja asetada külma kätte, siis vee külmumisel pudel lõhkeb; järelikult külmumisel vesi suurendab aga mitte ei vähenda oma ruumala. Külmumisel toimub vee ruumala suurenemine sellise suure jõuga, et isegi paksuseinalised veega täidetud ja tihedalt suletud malmballoonid lõhkevad vee külmumisel nendes.

Auru- või veeküttega ja veevärgiga majades esineb suurte külmade ajal nii veevärgi kui ka küttesüsteemi torude lõhkemisi vee külmumise tagajärjel torudes.

Veevärgi ja kanalisatsiooni torude panemisel peab arvestama vee paisumist tahkestumisel; et vältida lõhkemist vee külmumisel, peab maa-aluseid torusid panema niisugusesse sügavusse, kus temperatuur ei lange alla nulli. Torude välised osad peavad talvisel ajal olema kaetud soojust isoleerivate materjalidega.

Vee paisumine tahkestumisel avaldab hiiglasuurt mõju Maa kujule. Vesi, mis tungib kivimite väiksemaisse pragudesse mäeharjadel, külmub nendes, suurendades oma paisumisega pragusid, kuni tekivad kaljude purunemised, libisemi-

sed ja varisemised; nii toimub päevast päeva mägede alanemine ja orgude täitumine laguainetega.

105. Rõhu mõju sulamispunktile. Ühe ja sama aine sulamise uurimine mitmesuguste rõhkude all näitas, et ained selles suhtes jagunevad nendekssamadeks kaheks grupiks. Nendel ainetel, mille ruumala sulamisel suureneb, tõuseb sulamistemperatuur rõhu tugevnemisel, rõhu nõrgenemisel ta langeb.

Sel juhul rõhk takistab ruumala suurenemist sulamisel, sellepärast on tarvis tugevamat molekulide võnkumist, s. o. kõrgemat temperatuuri, et ikkagi toimuks ruumala suurenemine suurenenud rõhule vaatamata.

Niisugustel ainetel, mille ruumala sulamisel väheneb, langeb rõhu tugevnemisel sulamistemperatuur, rõhu nõrgenemisel ta tõuseb.

Sel juhul aitab rõhk kaasa ruumala vähenemisele, mis toimub sulamisel, sellepärast saabub sulamine varem, s. t. madalamal temperatuuril kui normaalrõhu juures.

Jää puhul langeb sulamistemperatuur 0,0075° võrra iga juurdetulnud atmosfääri kohta.

106. *Laboratoorne töö 11.* Jää sulamissoojuse määramine.

T ö ö v a h e n d i d: 1) kalorimeeter; 2) kaalud vihtidega; 3) termomeeter; 4) peeneks raiutud jää; 5) vesi.

T ö ö k ä i k. 1. Kaaluge ära kalorimeeter. 2. Kandke kalorimeetri mass ja teised andmed tabelisse.

Katse nr.	Kalorimeetri mass m	Vee mass M	Jää mass m_1	Vee temperatuur t	Segu temperatuur Θ	Jää sulamissoojus

3. Määrake vee mass ja valage vesi kalorimeetrisse.

Märkus. Vett peab kalorimeetrisse valama nii palju, et elavhõbedasambakest termomeetris oleks kergesti näha.

4. Mõõtke ja kirjutage üles vee temperatuur kalorimeetris just enne jää vette laskmist.

5. Võtke väikesed jäätükid, kuivatage nad filterpaberiga ja visake nad kalorimeetri vette.

6. Segades segajaga vett jääga, jälgige, millal sulavad viimased jäätükikesed. Kirjutage üles jää sulamise lõpul täheldatud temperatuur.

7. Kaaluge nüüd ära vesi kalorimeetris ja määrake lahutamise teel jää mass.

8. Võttes tabelist kalorimeetri metalli erisoojuse, määrake kalorimeetri ja vee poolt jää sulamise ajal äraantud soojushulk.

9. Kui palju soojust läks jääst tekkinud vee soojendamiseks nullist kuni lõpptemperatuurini?

10. Kui palju läks soojust jää sulamiseks?

11. Arvutage jää sulamissoojus.

12. Võrrelge saadud resultaat sulamissoojusega, mis on antud tabelis 1, raamatu lõpus, ja arvutage viga. Millega seletada töö resultaatide ja tabeli andmete vahet?

Harjutus 10.

1. 600 g 0^0-st jääd muudeti soojendamisega 30^0-seks veeks. Kui palju kulutati soojust?

2. 8 kg jääd temperatuuriga -30^0 muudeti soojendamisega 20^0-seks veeks. Kui palju kulus soojust?

Vastus: 920 kcal.

3. Kui palju jääd temperatuuriga $t_1 = 0^0$ on vaja lasta 5 l vette temperatuuriga $t_2 = 40^0$, et saada 0^0-st vett?

Vastus: 2,5 kg.

4. 2 l vett temperatuuriga $t_1 = 90^0$ on vaja kiiresti jahutada 10^0-ni. Määrake, kui palju 0^0-st jääd peab selleks viskama vette?

Vastus: 1,8 kg.

5. Kui palju on tarvis soojust, et sulatada 10 kg vaske, mille temperatuur on $t = 10^0$?

6. 150 g sulatatud inglistina sulamistemperatuuriga kallatakse 300 g vette temperatuuriga $t = 12^0$. Arvutada lõpptemperatuur segunemisel.

Vastus: $\approx 25^0$.

7. 5 kg seatina on tarvis sulatada jootmislambi abil. Kui palju petrooli kulutatakse sulatamise ajal, kui lambi kasutegur on 30%, seatina algtemperatuur aga 17^0.

Vastus: ≈ 22 g.

8. Haavlite valmistamisel jookseb sulatatud seatina sulamistemperatuuris jugadena vette. Määrata, missuguseks kujuneb 20 l vee temperatuur, kui tema algtemperatuur $t = 10^0$ ja temaga jahutatakse 50 kg haavleid?

Vastus: $\approx 44^0$.

9. Tänava sõidu- ja kõnniteelt, mille pindala on 10 000 m^2, on lumi koristatud lumesulatajate abil. Määrata, kui palju on selleks kulutatud puid, kui lumekatte paksus on 10 cm, lume erikaal 0,1, lume temperatuur -20^0, puude küttevääртus $3200 \frac{cal}{kg}$, lumesulatajate kasutegur 70%.

Vastus: ≈ 4000 kg.

10. Kevadiste hommikukülmade ajal eritub taimedele härmatis. Kas härmatise eritamine soodustab taime jahenemist või takistab seda?

KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Mida nimetatakse sulamiseks ja mida tahkestumiseks?
2. Kuidas toimub kristallilise ja kuidas amorfse keha sulamine?
3. Mida nimetatakse sulamis- ehk tahkestumispunktiks?
4. Milles seisab sulamis- ja tahkestumistemperatuuri jäävuse seadus?

5. Millega seletada temperatuuri konstantsust sulamise ja tahkestumise ajal?

6. Mida nimetatakse sulamissoojuseks?

7. Missugustes ühikutes mõõdetakse sulamissoojust?

8. Missuguse valemiga väljendatakse soojushulka, mis on vajalik keha antud massi sulatamiseks?

9. Kuidas määrata sulamissoojust kalorimeetrilise meetodi abil?

10. Kuidas koostatakse kalorimeetriline võrrand sulamise jaoks?

11. Kuidas muutub keha ruumala sulamisel ja kuidas tahkestumisel?

12. Kuidas sõltub sulamispunkt välisrõhust?

2. Auru tekkimine.

107. Auru tekkimine. Aine üleminekut auruks nimetatakse *auru tekkimiseks*.

Auru tekkimine toimub kahel teel — aurumise ja keemise kaudu.

108. Aurumine. Oma igapäevastest elukogemustest teab igaüks, et vesi, piiritus, eeter, bensiin, petrool ja iga mistahes vedelik aja jooksul kahaneb ja võib täiesti *kaduda lahtisest anumast*. Kuna aga aine ei saa hävida, siis järelikult ta läks vedelast olekust teise olekusse, mida nimetame *auruks*.

Needsamad igapäevase elu vaatlused lubavad, ilma et tarvitaksime eriliste laboratoorsete katsete abi, kindlaks teha järgmised aurumise välised tunnused: 1) aurumine toimub igasuguse temperatuuri juures, 2) aurumine toimub ainult vedeliku pinnalt.

Kerge on samuti leida igapäevastest vaatlustest näiteid, mis lubavad tuletada aurumist soodustavaid tingimusi ja nimelt: aurumine on seda suurem, mida suurem on 1) vedeliku vaba pind, 2) vedeliku temperatuur ja 3) vedeliku pinnal tekkinud auru eemaldumise kiirus.

Erinevatel ainetel on aurumiskiirus erinev: nii aurub eeter kiiremini kui piiritus, vesi ja paljud teised vedelikud; elavhõbe on väga aeglaselt auruv vedelik. Lõpuks on võimalik katseliselt näidata, et aurumiskiirus suureneb rõhu vähenemisega.

Tahkete kehade aurumine. Aurumine toimub ka tahkete kehade pinnalt: auruvad jää, jood, kamper, naftaliin ja teised tahked kehad.

Ruumala küllastamine aurudega. Laboratoorsed uurimused näitavad, et aurumine toimub kõige kiiremini tühjuses või õhupumba kupli all; õhus ta toimub kiiremini tuule käes, sest tuul viib ära tekkinud aurud. Kinnises anumas aurumine vedeliku peal olevasse ruumi järk-järgult aeglustub ja saabub moment, kus auru hulk ja vedeliku hulk enam ei muutu. Sellistes tingimustes nimetatakse auru ruumi küllastavaks[1] auruks.

Kui antud ruumis võib veel muutuda aurude hulk, siis nimetatakse niisugustes tingimustes auru mitteküllastavaks auruks.

109. Aurumise seletamine molekulaar-kineetilise teooria abil. Molekulaar-kineetilise teooria põhjal on vedeliku molekulid alalises liikumises, misjuures erinevatel molekulidel on erinev kiirus. Vedeliku pealispinnal suure kiirusega liikuvad molekulid võivad sealt välja lennata niisugusele kaugusele (väljapoole molekuli mõjusfääri), millisel lakkab mõjumast temale teiste pealispinna molekulide kohesioon; nendest saavad siis auru molekulid. Kui vedeliku pind on suur, siis on ka suur nende molekulide arv, mis lendavad välja vedeliku pealispinnalt, ja auru tekkimine toimub kiiremini. Kui vedeliku temperatuur tõuseb, siis suureneb molekulide liikumise keskmine kiirus, läheb suuremaks vedelikust

[1] Mõnes raamatus nimetatakse niisugust auru küllastunud auruks.

väljalennanud molekulide arv ja jällegi toimub kiiremini auru tekkimine. Kui vedelik on suletud kinnisesse anumasse, siis tema auru molekulid tormavad sirgjoonelisi teid mööda vedeliku peal olevas ruumis, põrkuvad kokku omavahel ja anuma seintega. Nende põrkumiste juures molekulide liikumiste suund võib nii muutuda, et nad satuvad pealispinna molekulide mõjusfääri ja astuvad uuesti vedelikku moodustavate molekulide hulka.

Aurumise alguses on vedelikust väljalendavate molekulide arv suurem nende molekulide arvust, mis vedelikku tagasi satuvad. Auru molekulide arvu suurenemisega suureneb vedelikku tagasiminevate molekulide arv. Tekib loomulikult moment, kus aurust vedelikku tagasi minevate molekulide arv saab võrdseks vedelikust aurusse lendavate molekulide arvuga. Sellest momendist peale ei suurene enam auruhulk; aur on saanud küllastavaks. *Küllastamise korral molekulide väljalend ei lakka,* vaid väljalendavate molekulide arv saab sama ajavahemiku jooksul naasvate molekulide arvuga võrdseks. Sellist vedeliku ja auru vahekorda nimetatakse d ü n a a m i l i s e k s (liikuvaks) tasakaaluks. Järelikult *küllastavaks auruks nimetatakse auru, mis on oma vedelikuga dünaamilises tasakaalus.* Sama aine vedelikuga kinnises ruumis koosolev aur on alati küllastav.

110. Aurumissoojus. Auru tekkimisel auru molekulid liiguvad vastu kohesioonijõude, ületades nende jõudude takistust. Igasuguse takistuse ületamiseks on tarvis kulutada energiat. Auru tekkimisel vajalik energia võetakse kas välisest soojusallikast või kogu auruva vedeliku korrapäratult liikuvate molekulide kineetilisest energiast.

Aurumisel lendavad vedelikust välja suurimat kiirust evivad molekulid, neil on järelikult ka suurim kineetiline energia. Vedelikku jäävad aeglasemad molekulid, mille kineetiline energia on väiksem. Molekulaar-kineetilise teooria järgi

on keha molekulide kineetiline energia ja keha temperatuur omavahel seotud. Molekulide kineetilise energia vähenemine vastab keha temperatuuri langemisele. Järelikult, kui keha aurub ilma soojust väljastpoolt juurde saamata, siis ta peab jahenema.

Igasuguse aurutekkimisega käib kaasas soojuse neelamine ja igasuguse aurumuundumisega vedelikuks (kondensatsioon, tihenemine) soojuse eritamine. Ühesugustel muudel tingimustel vajab iga vedelik isesugust soojushulka aurutekkimisel. Selle kehade omaduse iseloomustamiseks on tarvitusele võetud eriline suurus, mida nimetatakse aurumissoojuseks.

Aurumissoojus on suurus, mida mõõdetakse soojushulgaga, mis on vajalik 1 g vedeliku muutmiseks auruks aurutekkimise temperatuuris.

Aurumissoojuse ühikuteks on

$$\frac{\text{cal}}{\text{g}} \text{ ja } \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}.$$

Kui tähistada aurumissoojust r-ga, auruva vedeliku massi m-ga, aurutekkimiseks vajalikku soojushulka Q-ga, siis

$$\boxed{Q = rm.} \qquad \text{(XV)}$$

Kondenseerumisel eritab iga gramm auru niisuguse soojushulga, mis oleks vajalik sama temperatuuri juures 1 g vee muutmiseks auruks.

Vaatlused annavad palju näiteid temperatuuri vähenemise kohta aurumisel või tema suurenemise kohta kondenseerumisel: 1) märg käsi on kuivast käest külmem; 2) ta läheb veel külmemaks, kui temaga vehkida või teda hoida tuule käes; 3) külmatunne suureneb, kui keha teha märjaks kiiresti auruva vedelikuga, nagu näiteks eetriga, lõhnaõliga; 4) kõrgemat temperatuuri talub inimene kergemini kuivas

õhus, mille puhul tekib higi aurumine, kui niiskes õhus, kus puudub aurumine; 5) palavates maades vesi säilib jahedana poorsetes anumates, tungides läbi pooride, niiskuse kiht aurub, alandades anuma ja järelejäänud vee temperatuuri; 6) vee või piima jahutamiseks mässitakse anum märga riidesse; 7) tuulevaikse ilmaga võivad vihm või lumi takistada temperatuuri alanemist soojuse eritumise tagajärjel auru kondenseerumisel sademeteks; 8) aurukeskkütte juures, mida rakendatakse enamasti vabrikuhoonetes, saunades jms., saadakse soojust aurukondenseerumisest veeks.

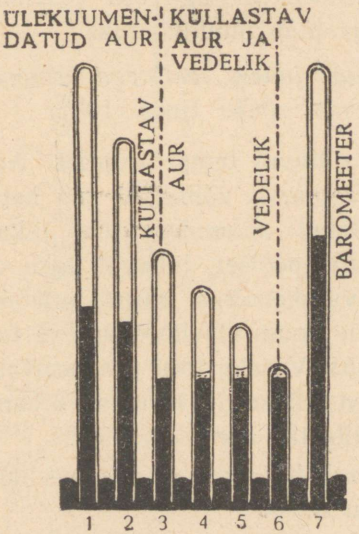
Jahenemist aurumise juures võib näidata katseliselt, kui niisutada käsna või vatti eetriga ja lasta eetril auruda. Siis ilmub käsnale härmatis: eeter ja ümbritsev õhk jahenevad aurumisel kuni 0°-se ja madalama temperatuurini ja õhust eritub härmatise näol temas sisalduv niiskus.

111. Auru ruumala ja rõhu vaheline sõltuvus konstantsel temperatuuril. Et uurida auru ruumala ja rõhu vahelist sõltuvust, peab tekitama auru mingis kinnises ruumis ja mõõtma tema rõhku mitmesuguste ruumalade juures. Seda on sobiv teha Torricelli toru elavhõbedapealses ruumis.

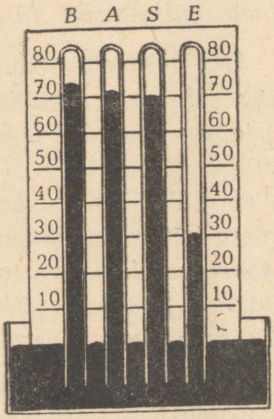
Võtame kaks elavhõbebaromeetrit ja laseme ühesse neist painutatud pipeti abil üks-kaks tilka uuritavat vedelikku, näit. eetrit (joon. 99).

Vedeliku tilk tõuseb elavhõbedapealsesse ruumi ja aurub seal. Auru rõhul elavhõbe langeb. Selle toru ja baromeetri nivoode vahe annab auru rõhu elavhõbedasamba sentimeetrites (joon. 99, asend 1 ja 7). Kui torus ei osutu mingeid vedeliku jälgi, siis võib auru pidada mitteküllastavaks. Tõstame esimest toru anumast ülespoole ja sellega suurendame auru ruumala. Võrreldes elavhõbedasambaid uuritavates ja baromeetri torudes, meie näeme, et ruumala suurenemisel auru rõhk väheneb. Toru langetamisega ruumala vähendades täheldame rõhu suurenemist (joon. 99, asendid 2 ja 7).

Edasisel ruumala vähenemisel täheldame õhima vedelikukihi tekkimist (joon. 99, asend 3). Vedeliku ilmumine on ruumi auruga küllastamise tunnuseks. Toru ja baromeetri elavhõbeda nivoode vahe annab küllastava auru rõhu. Katse näitab, et jääva temperatuuri juures on küllastava auru rõhk suurem mitteküllastava auru rõhust.



Joon. 99. Auru rõhu muutumine sõltuvalt ruumala muutumisest ja mitteküllastava auru üleminek teatava temperatuuri juures küllastavaks auruks.



Joon. 100. Mitmesuguste küllastavate aurude rõhud on erinevad: torus *A* — vesi, torus *S* — piiritus, torus *E* — eeter; torus *B* — elavhõbe.

Edasine ruumala vähenemine (joon. 99, asendid 4, 5, 6) ja igakordne elavhõbeda nivoode võrdlus näitab, et: 1) ruumala vähenemisega kondenseerub aurust ikka suurem ja suurem hulk vedelikku, 2) aur jääb küllastavaks ja 3) küllastava auru rõhk jääb konstantseks sõltumata ruumalast.

Analoogilistest uurimustest saadakse järgmised järeldused:

1. *Mitteküllastava auru rõhu sõltuvust ruumalast väljendab Boyle-Mariotte'i seadus, kusjuures seda täpsemalt, mida kaugemal asub aur küllastamisest.*

2. *Küllastava auru rõhk ühe ja sama temperatuuri juures ei sõltu ruumalast,* kuna ruumala vähenemisel osa auru muutub vedelikuks, ruumala suurenemisel aga osa vedelikust muutub auruks ja auru tihedus jääb muutumatuks.

3. *Ühe ja sama temperatuuri juures tekitavad erinevate ainete küllastavad aurud erinevaid rõhke* (joon. 100).

112. Küllastava auru rõhu sõltuvus temperatuurist. Auru rõhu sõltuvuse uurimist temperatuurist võib läbi viia katseriistaga, mis koosneb ühendatud anumatest ühe liikuva haruga (joon. 101). Tõstes parempoolset, liikuvat haru nii, et elavhõbe läheks kraanini vasakpoolses harus, suletakse kraan, langetatakse parempoolne anum elavhõbedaga ja tekitatakse vasakpoolses torus tühjus. Vasaku toru peal asuvasse lehtrisse kallatakse uuritavat vedelikku ja lastakse kraanist niipalju vedelikku, et tekiks küllastav aur.

Küllastav aur madaldab elavhõbeda nivood vasakus harus ja tõstab teda parempoolses harus.

Vasakpoolset, auruga haru ümbritsetakse jäämeda klaastoruga, lastakse sellest vett läbi ja muudetakse selle temperatuuri (joon. 101).

Teades õhurõhumist ja mõõtma haru elavhõbedasammaste vahet, saab arvutada auru rõhku.

Moodustub nivoode vahe, mis on võrdne elavhõbedasamba kõrgusega h. See kõrgus h cm Hg (keemispunktist kõrgema temperatuuri juures) mõõdab, kuipalju on küllastava auru rõhk suurem õhurõhust.

Mõõtes baromeetriga õhurõhku H cm Hg, saame arvutamisel küllastava auru rõhu võrdse $(H + h)$ cm-ga Hg.

Küllastavate aurude rõhkude tabel (cm Hg).

Temperatuur	Väävel-eeter	Alkohol	Vesi
0	18,6	1,3	0,46
10	29	2,4	1,9
20	44	4,5	1,7
30	64	7,9	3,1
35	76	—	—
40	92	13,4	5,5
50	127	22	9,2
60	174	35	14,7
70		56	23,2
78		76	—
80		83	35,3
90		120	52,4
100		167	76
120			2 at
150			4,7 „
200			15,2 „

Mõõtes igale temperatuurile vastava küllastava auru rõhu, võime saada andmed, mis on kokku võetud eespool antud tabelis.

Mõõtmisandmetest võib teha järgmised järeldused:

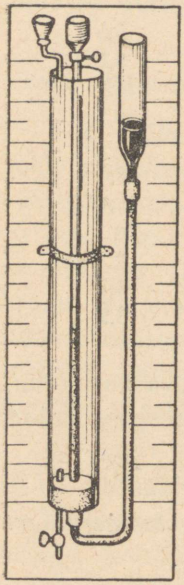
1. *Küllastava auru rõhk suureneb temperatuuri tõusmisega.*

2. *Küllastava auru rõhk keemistemperatuuri juures on võrdne õhurõhuga.*

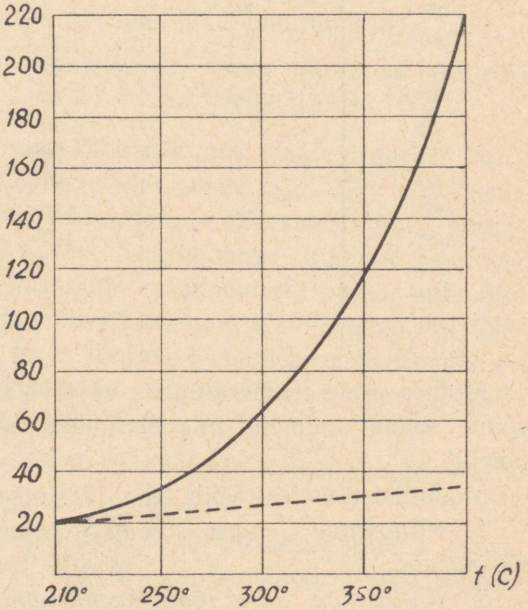
Auru ruumala, rõhu ja temperatuuri vahelist sõltuvust võib kergesti seletada molekulaar-kineetilise teooria abil.

1. Auru ruumala suurenemisega suureneb vedelikust väljalendavate molekulide arv, s. o. auru hulk; ruumala vähenemisel aga osa auru molekule lendab vedelikku tagasi ja auru hulk väheneb; mõlemal juhul jääb dünaamilise tasakaalu tingimus samaks: sõltumata küllastatud ruumi suurusest võrdub konstantse temperatuuri juures vedelikust välja-

lendavate molekulide hulk sisselendavate molekulide hulgaga; seni kui temperatuur jääb konstantseks, jäävad konstantseteks nii auru molekulide liikumise keskmine kiirus kui ka molekulide arv küllastava auru 1 cm³-is; seepärast jääbki auru rõhk (tema molekulide löögid anuma seinte pindala ühiku pihta) muutumatuks.



Joon. 101. Katseriist auru rõhkude mõõtmiseks mitmesuguste temperatuuride juures.



Joon. 102. Pideva kõverjoonega on kujutatud auru rõhu muutumine, punktiirjoonega ideaalse gaasi rõhu muutumine temperatuuri tõusmisel.

2. Temperatuuri tõusmisega kasvavad molekulide liikumise kiirused; samal ajal suureneb väljalendavate molekulide hulk, mis moodustavad auru, ja rõhk kasvab.

Küllastava auru rõhk kasvab temperatuuri tõusmisel kiiremini kui ideaalse gaasi rõhk (joon. 102). Ideaalse gaasi rõhk suureneb temperatuuri tõusmisel ainult molekulide kasvavast kiirusest.

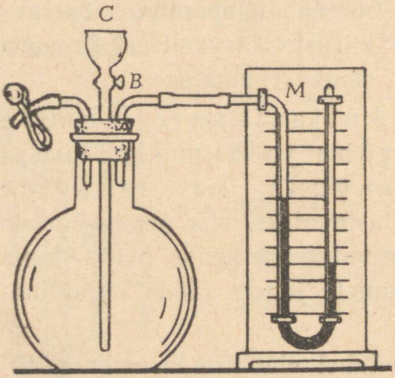
Küllastava auru rõhk aga suureneb temperatuuri tõusmisel kahel põhjusel: molekulide kiiruste kasvamisest ja auru molekulide arvu suurenemisest samas ruumalas.

Niisiis on ruumi küllastavate aurude jaoks massi ruumala rõhu ja temperatuuri vaheline seos teistsugune kui gaaside jaoks; kui aurud jäävad küllastavateks, siis nende aurude ruumalade igal muutumisel muutub ka nende mass, kuna gaasi mass võib nende muutumiste juures jääda muutumatuks.

Küllastava veeauru rõhu p tabel elavhõbedasamba millimeetrites —20° kuni 30°-ni 1° tagant ja 30° kuni 150°-ni 10° tagant on antud leheküljel 189.

113. Daltoni seadus. Senini vaatlesime auru tekkimist tühjuses. Tõeliselt aga toimub aurumine õhku, s. t. teiste gaaside või aurudega täidetud ruumi. Et seda nähtust uurida, võtame laia kaelaga kolvi (joon. 103) ja suleme tema avause korgiga, mida läbistab kolm toru. Üks toru (B) on ühendatud manomeetriga M, teine (C) lõpeb kraaniga ja lehtriga, kolmas lõpeb kummitorukesega, mille küljes on näpits. Pumpame välja teatud hulga õhku ja märgime ära elavhõbeda kõrguse manomeetritorus. Avades kraani C, laseme sisse näit. piiritust niisugusel hulgal, et kogu katse ajal tema kiht jääks põhja. Ja kohe algab manomeetri vasakpoolses harus elavhõbeda aeglane alanemine, mis näitab piirituse järkjärgulist aurumist. Oodates nii kaua, kuni see elavhõbeda alanemine lakkab, s. t. kuni saabub ruumi küllastumine auruga, mõõdame õhu temperatuuri ja elavhõbeda kõrguste vahe vähenemise manomeetri mõlemas harus, mis annab

piirituse küllastavate aurude rõhu. Kui õhu temperatuur võrdub 20°-ga, siis osutub see elavhõbeda kõrguste vahe vähenemine võrdseks 4,5 cm-ga. Kui vaatame tabelisse, siis näeme, et see arv langeb ühte piirituse küllastava auru rõhuga, mis on tekkinud sama temperatuuri juures tühjuses. Jätkates katset, täidame lehtri eetriga ja laseme anumasse piirituse peale kihi eetrit. Siis näeme elavhõbeda järkjärgulist alanemist vasakus harus ja uut elavhõbeda kõrguste vahe vähenemist.



Joon. 103. Katseriist gaaside ja aurude segu rõhu mõõtmiseks.

Analoogilistest katsetest võib teha järeldused:

1. Aurumine mingi gaasi või auruga täidetud ruumi toimub aeglasemalt kui tühjusesse.

2. Iga auru rõhk teiste gaaside ja aurudega täidetud ruumis osutub sama suureks kui siis, kui antud aur üksi täidaks kogu ruumala.

3. *Aurude ja gaaside segu rõhk võrdub segusse kuuluvate aurude ja gaasi osarõhkude summaga.* (Daltoni seadus.)

Daltoni seadus on rakendatav ainult niisuguse segu puhul, mille koosteosad ei reageeri keemiliselt ja mida vedelik ei neela.

114. Keemine. Küllastava auru omaduste põhjal saab seletada vedeliku keemist. Anumasse kallatud vedelik sisaldab õhku; soojendamisel õhk eritub, moodustades pisimaid mullikesi.

Nendesse sisemistesse õhumullikestesse toimub aurumine niisama nagu õhkugi vedeliku pinna kohal. Kuid sisemised

mullikesed muutuvad varsti küllastunuteks vedeliku auruga. Vedeliku soojendamisel kasvab lakkamatult küllastava auru rõhk õhumullikeste sees. Lõpuks saavutatakse temperatuur, mille juures küllastava auru rõhk muutub võrdseks välisrõhuga. Nüüd piisab väikseimast rõhu juurdekasvust, et aur sisemistest mullikestest paiskuks välja.

Küllastavate veeaurude rõhu *p* tabel (Hg millimeetrites).

t^0	*p* mm	t^0	*p* mm	t^0	*p* mm	t^0	*p* mm	t^0	*p* mm	t^0	*p* mm	t^0	$p \frac{kG}{cm^2}$
—20	0,77	—10	1,95	0	4,58	10	9,21	20	17,54	30	31,82	110	1,46
—19	0,85	— 9	2,13	1	4,93	11	9,84	21	18,65	40	55,32	120	2,03
—18	0,94	— 8	2,32	2	5,29	12	10,52	22	19,83	50	92,5	130	2,76
—17	1,03	— 7	2,53	3	5,69	13	11,23	23	21,07	60	149,4	140	3,69
—16	1,13	— 6	2,76	4	6,10	14	11,99	24	22,38	70	233,7	150	4,86
—15	1,24	— 5	3,01	5	6,54	15	12,79	25	23,76	80	355,1	200	15,85
—14	1,36	— 4	3,28	6	7,01	16	13,63	26	25,21	90	525,8	240	34,13
—13	1,49	— 3	3,57	7	7,51	17	14,53	27	26,74	100	760,0	280	65,4
—12	1,63	— 2	3,88	8	8,05	18	15,48	28	28,35			300	87,6
—11	1,78	— 1	4,32	9	8,61	19	16,48	29	30,04			360	190,3

Auru eritumist vedeliku sisemusest nimetataksegi vedeliku keemiseks.

Kõigest öeldust järgneb:

1. *Keemine tekib nitsugusel temperatuuril, mille juures küllastava auru rõhk saab võrdseks välisrõhuga.*

2. *Iga vedelik võib keeda ainult antud rõhule vastava temperatuuri juures.*

Keemistemperatuuri normaalrõhu juures nimetatakse keemispunktiks.

3. *Välisrõhu vähenemisel alaneb keemise temperatuur; rõhu suurenemisel ta suureneb.*

Mida kõrgemal maapinnast, seda madalama temperatuuri juures hakkab vesi keema.

Vee keemine aurukatlas, kus tekkiv aur avaldab vedelikule ühest atmosfäärist suuremat rõhku, toimub 100 kraadist kõrgemate temperatuuride juures.

4. Katsete abil on leitud, et vedeliku keemispunkt sõltub anuma materjalist, tema puhtuse astmest ja lahustunud gaasi liigist; keeva vedeliku aurude temperatuur seevastu üldse ei sõltu nimetatud asjaoludest; sellepärast *võetakse keeva vedeliku aurude temperatuur vedeliku keemistemperatuuriks.*

5. *Vedeliku keemistemperatuur jääb konstantseks kogu keemise aja jooksul.*

Selle nähtuse seletus on analoogiline sellele, mis on antud sulamistemperatuuri jäävuse jaoks.

6. *Auru ruumala on suurem selle vedeliku ruumalast, millest ta tekkis, ühe ja sama temperatuuri juures.*

Vee aur 100° juures täidab umbes 1700 korda suurema ruumala, kui vesi, millest ta tekkis.

7. *Lahuse keemistemperatuur on kõrgem kui puhta lahustaja vedeliku keemistemperatuur* ja tõuseb lahuse kontsentratsiooni suurenemisega. Nii tõuseb 6,6 g keedusoola lahustamisel 100 g vees lahuse keemistemperatuur 101°-ni, 25,5 g soola lahustamisel 100 g vees aga kuni 105°-ni.

8. **Keemissoojuste tabel.**

Vesi	539	Väävelsüsinik	80
Elavhõbe . . .	68	Piiritus	205
Väävel	362	Eeter	85

9. *Keemissoojus väheneb keemistemperatuuri tõusmisel.* Nii on vee jaoks:

Keemistemperatuur	0	50	100	150	200
Keemissoojus	595	568	539	506	468

115. Soojusliku tasakaalu võrrand auru tekkimisel ja kondenseerumisel.

Koostame soojusliku tasakaalu võrrandi järgmise nähtuse jaoks: kalorimeetri veest lastakse läbi vee küllastunud aur.

Kokkupuutumisel külmema veega aur kondenseerub, eritades soojust. Kalorimeetri vee segunemisel jätkub kondenseerumisest saadud vee jahenemine. Auru kondenseerumisel ja vee jahenemisel eritatud soojusest soojenevad kalorimeeter ja vesi selles.

Ühtede kehade kondenseerumisel ja jahenemisel äraantud soojushulk peab võrduma kõikide soojenevate kehade poolt saadud soojushulgaga.

Olgu kalorimeetrisse, mille mass $m_1 = 80$ g, aga erisoojus $C_1 = 0{,}09 \frac{\text{cal}}{\text{g.kraad}}$ valatud $m_2 = 100$ g vett algtemperatuuriga $t_1 = 20^0$.

Veest lastakse läbi $m = 6$ g veeauru keemistemperatuuriga $t = 100^0$. Leida keemissoojus r, kui segu lõpptemperatuur $\Theta = 52{,}8^0$.

Kondenseerumisel auru poolt äraantud soojus ilma temperatuuri muutuseta:

$$Q = rm;$$

jahenemisel aurust tekkinud *vee poolt* äraantud soojus temperatuurist t kuni Θ:

$$Q_1 = cm\,(t - \Theta)$$

Kalorimeetri poolt saadud soojus:

$$Q_2 = c_1 m_1\,(\Theta - t_1);$$

Vee poolt:

$$Q_3 = cm_2\,(\Theta - t_1).$$

$$Q + Q_1 = Q_2 + Q_3;$$

$$rm + cm\,(t - \Theta) = (c_1 m_1 + cm_2)(\Theta - t_1);$$

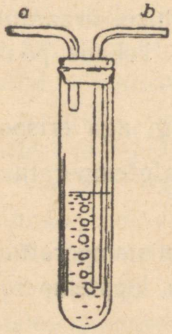
$$r = \frac{(c_1 m_1 + cm_2)(\Theta - t_1) - cm\,(t - \Theta)}{m};$$

$$r = \frac{(0{,}09 \cdot 80 + 1 \cdot 100)\,(52{,}8 - 20) - 1 \cdot 6\,(100 - 52{,}8)}{6};$$

$$r = 539\,\frac{\text{cal}}{\text{g}}.$$

116. *Laboratoorne töö 12.* Keemissoojuse määramine kalorimeetri abil.

Töövahendid: 1) kalorimeeter; 2) keedukolb; 3) termomeeter; 4) kaalud vihtidega; 5) statiiv rõngaga ja näpitsaga; 6) aurukuivataja.



Joon. 104. Aurukuivataja.

Märkus. Aurukuivataja on selleks, et eemaldada vee osakesi, mida aur võtab kaasa keedukolvist; need osakesed jäävad aurukuivataja põhja. Aurukuivatajaks võib olla katseklaas suletud korgiga, mille kahte avausse on paigutatud kaks klaastoru, millest üks ulatub peaaegu põhjani; selle toru ots *b* ühendatakse keedukolvi toruga, kuid teise toru ots *a* ühendatakse kalorimeetri vette viiva toruga (joon. 104).

Töökäik: 1. Kaaluda kalorimeeter ja valada temasse 200—300 g toatemperatuuriga vett. Määrata vee mass täpsusega kuni 0,5 g. Mõõtmiste ja arvutuste resultaadid kirjutada tabelisse:

Katse nr.	Kalorimeetri mass m_1	Kalorimeetri mass koos veega $m_1 + m_2$	Vee mass m_2	Vee temperatuur t_1	Vee temperatuur θ pärast auru läbilaskmist	Läbilastud auru mass m	Keemissoojus r

2. Ühendada keedukolb aurukuivatajaga ja panna vesi keema.

3. Kui aurukuivataja torust hakkab tugeva joana tulema auru, lasta toru ots kalorimeetri vette ja märkida üles vee temperatuur just enne toru sisselaskmist.

4. Segades segajaga vett, lasta läbi auru, kuni vee temperatuur kalorimeetris tõuseb 10—15° võrra, siis toru välja võtta.

5. Vesi korralikult läbi segada ja üles kirjutada kõige kõrgem temperatuur.

6. Kalorimeetri vee kaalumise kaudu määrata kalorimeetrisse tulnud auru mass.

7. Arvutada, kui palju on vaja soojust, et soojendada kalorimeeter ja vesi selles algtemperatuurist t_1 kuni lõpptemperatuurini Θ.

8. Kui palju soojust eritab aurust tekkinud vesi jahenemisel 100°-st kuni temperatuurini Θ ?

9. Kui palju soojust eritas aur üleminekul veeks?

10. Kui palju soojust eritab 1 g auru üleminekul vedelasse olekusse temperatuuril $t = 100°$?

11. Võrrelda saadud resultaat tabeli andmetega.

117. Mitteküllastavate aurude küllastavateks muutmise viisid. Avades toru kraani (joon. 101), tõstame liikuvat haru, kuni elavhõbe liikumatus harus tõuseb kraanini; pärast seda suleme kraani ja laseme anumal elavhõbedaga langeda, et tekitada kraaniga varustatud torus tühjust.

Kallame kraani peal olevasse lehtrisse natuke vett või mõnda teist vedelikku (piiritust, eetrit); avades veidi kraani, laseme torusse nii palju tilku, kui palju on vaja selleks, et pärast aurumist saada mitteküllastavat vee, piirituse või eetri auru. Kui nüüd tõsta elavhõbedaga täidetud katseriista liikuvat toru ja elavhõbedasamba rõhuga kokku suruda aur, siis võib saavutada niisugust rõhku, mille juures baromeetritorus ilmub vedeliku kiht ja aur muutub küllastavaks: ruumala vähenemisel piisab samast auruhulgast, et küllastada

uut vähendatud ruumi. Kui vastupidi, liikuval torul lasta langeda, siis hakkab vedelik auruma, vedeliku kiht väheneb, kuni ta lõpuks täiesti kaob; edasisel toru langetamisel rõhk väheneb, auruga täidetud ruumala suureneb ja aur muutub mitteküllastavaks. Kui nüüd, olles tunduvalt suurendanud mahtu, s. o. viinud auru olekusse, mis on kaugel küllastamisolekust, katkestada liikuva toru nihkumist ja hakata jahutama baromeetritoru auruga täidetud otsa jää või külma vette kastetud lapi abil, siis võime küllaldasel jahutamisel jällegi avastada vedeliku kihi tekkimist, s. o. küllastava auru ilmumist. Järelikult võib mitteküllastavat auru jahutamisega viia niisuguse temperatuurini, mille juures tema rõhk saab võrdseks rõhuga küllastamisel ja aur muutub küllastavaks; edasine jahutamine toob endaga kaasa küllastava auru muutumise vedelikuks, s. o. veeldumise ehk auru kondenseerumise. Seega saab auru muuta vedelikuks kahel viisil: 1) pannes auru suurema rõhu alla teda kokku surudes; 2) alandades auru temperatuuri teda jahutades.

118. Kriitiline temperatuur. Mitte iga temperatuuri juures ei ole võimalik muuta auru vedelikuks ainult rõhu suurendamise teel. 1869. a. sai selgeks, et *iga vedeliku jaoks on olemas temperatuur, millest kõrgemal tema auru pole võimalik ühegi rõhuga muutа vedelikuks.* Sellist temperatuuri nimetatakse kriitiliseks.

Kriitilisest kõrgema temperatuuri juures ei leidu ühtegi ainet vedelas olekus, olgu rõhk kuitahes suur.

Rõhku, mille all peab olema kriitilist temperatuuri eviv aine, et kaoks erinevus vedeliku ja auru vahel, nimetatakse kriitiliseks rõhuks.

Seda olekut, milles on vedeliku ja selle küllastunud auru segu kinnises anumas kriitilise rõhu ja temperatuuri juures, nimetatakse kriitiliseks olekuks.

Kui aine on kriitilises olekus, siis muutuvad tema vedeliku ja tema auru tihedus ühesugusteks. Menisk, mis lahutab vedelikku selle aurust, kaob kriitilise oleku saabumisel, pindpinevus muutub võrdseks nulliga ning vedelik ja selle aur muutuvad eraldamatuteks.

Keemissoojus kriitilise temperatuuri juures muutub võrdseks nulliga.

Vee kriitiline temperatuur on 374,2°, piirituse oma 243,1°, eetri oma 193,8° ja süsihappe oma 31,1°. Kui nende ainete temperatuur ületaks kriitilist temperatuuri, siis nad jääksid igasuguste rõhkude juures gaasilisteks ja neid loetaks gaasideks.

119. Gaaside veeldamine. Gaaside sarnasus harilikkude vedelikkude mitteküllastavate aurudega viis mõttele, kas ei saaks ka gaase muuta vedelikuks, rakendades sellejuures ühte või teist aurude veeldamise viisi. Tõepoolest muudeti esimene gaas (ammoniaak) vedelikuks juba 1799. a. Eriti tugevasti edenesid tööd gaaside veeldamise alal suure füüsiku Faraday (1791—1867) ajast peale, kelle meetodi järgi gaasi veeldamine toimub gaasi jahutamise ja samaaegse komprimeerimise kaudu. Möödunud sajandi teiseks pooleks jäi kõikidest tol ajal tuntud gaasidest ainult kuus [1], mida ei saanud veel muuta vedelikuks. Nende veeldamine viibis veel veerand sajandit sellepärast, et temperatuuri madaldamise tehnika ei olnud veel küllaldasel kõrgusel. Tol ajal, kui rõhu suurendamiseks olid juba olemas masinad, mille abil võis rõhud viia kuni mitme tuhande, hiljem aga ka kümnete tuhandete atmosfäärideni, piirdus madalate temperatuuride saamine temperatuuriga umbes 110° alla 0°. Kuid nende kuue gaasi veeldamiseks ei piisanud ainult

[1] Lämmastik, vesinik, hapnik, lämmastikhapend, süsinikoksüüd, metaan ehk soogaas; neid nimetati püsivateks (permanentseteks) gaasideks.

rõhust ilma edasise temperatuuri madaldamiseta alla nulli, sest nad jäid veel ikka temperatuuride juurde, mis ületasid nende kriitilisi temperatuure.

Tõepoolest on hapniku kriitiline temperatuur —188,8°, lämmastiku oma —147,1° ja vesiniku oma —239,9°. Kui XIX saj. lõpul suudeti madaldada nende temperatuuri alla kriitilise, siis muudeti kõik need kuus gaasi üksteise järel vedelaks ja 100 aastat pärast esimest gaasi veeldamist, 1899. a., viidi viimane nendest püsivatest gaasidest — vesinik — tahkesse olekusse. 1908. a. muudeti heelium vedelaks ja 1925. a. tahkeks. Niisiis ei ole olemas teravat piiri vedeliku ning selle auru ja gaasi vahel. Aine olek on tingitud tema tihedusest ja ruumalast, rõhust ja temperatuurist. Tingimisi on kombeks nimetada gaasideks niisuguste vedelikkude aurusid, millised normaalrõhu ja harilikkude temperatuuride juures alati jäävad väga kaugele küllastamisest.

120. Madalate temperatuuride saamise viisid. Madalate temperatuuride esialgne saamise viis on külmutuslahuste valmistamine. Kui segada lund ja keedusoola kaalulises vahekorras 3 : 1, siis võib temperatuuri madaldada kuni —20° [1]. Lume ja soola segunemisel toimub sulamine; sulamine nõuab soojusekulu; kiire sulamise juures, kui soojuse juurdevool väljastpoolt puudub, võetakse soojust sulavatelt kehadelt enestelt ja toimub tunduv temperatuuri alanemine.

Edasine jahutamine saadi värskelt veeldatud gaasi aurumisel ja keemisel madala rõhu all. §-s 110 selgitati, et igasugune aurumine toimub soojuse neelamisega. Madaldatud rõhu juures aurumine muutub intensiivsemaks ja algab keemine tavalisest madalama temperatuuri juures. Keemissoojus suureneb madalamate temperatuuride jaoks. Kui ei ole soojuse juurdevoolu väljastpoolt, võetakse soojus keevalt vedeli-

[1] On teada umbes kümmekond teisi segusid, mis annavad temperatuuri madaldamist 15° kuni 50°-ni alla nulli.

kult eneselt. Sellepärast annavad madala keemistemperatuuriga vedelikud õhupumba kupli all keedes suure temperatuuri langemise. Süsihappegaasist (kriitiline temperatuur +31° C) toatemperatuuri juures komprimeerimisel saadud vedel süsihape aurub anumast väljalastult üheatmosfäärilise rõhu juures nii kiiresti, et jahenemisest muutub tahkeks süsihappeks. Tahke süsihappe ja eetri segu jaheneb imevpumba kupli all nii kiiresti ja niisuguse soojusneelamisega, et tema temperatuur langeb kuni —110°. Edasine temperatuuri madaldamine põhineb paljude gaaside sellel omadusel, et nad paisudes jahenevad. Õhu temperatuur näiteks langeb 0,26° C võrra iga atmosfääri kohta.

Kui gaas paisub, siis paisumisel üksteisest eemalduvad gaasi molekulid teevad kohesioonijõudude ületamiseks tööd. Gaasi kiirel paisumisel ei saa ta soojust väljastpoolt; paisumise töö toimub gaasi enese energia arvel, millest ongi tingitud tema temperatuuri alanemine.

Et saada selle võttega temperatuuri alanemist, gaas komprimeeritakse kuni 200 atmosfääriga ja jahutatakse kõige külmema olemasoleva külmutuslahusega (näiteks kuni —110°); selle järel gaasi rõhku kiiresti vähendatakse; selle paisumise juures gaas jahtub veel niivõrd, et võib üle minna vedelasse olekusse.

Niipea kui mingit gaasi (näiteks hapnikku) saadi esimest korda küllaldasel hulgal vedelas olekus, asetati ta imevpumba kupli alla ja pandi madaldatud rõhu all keema; vedela gaasi temperatuur langes veel rohkem ja seda vedelikku kasutati kui jahutajat järgmise permanentse gaasi (näiteks lämmastiku) veeldamisel. Lämmastiku keemistemperatuur normaalse rõhu juures on —196°; madalama rõhu juures on see veel madalam. Madala rõhu all keev lämmastik võib olla vesiniku jahutajaks jne. Madaldatud rõhu all keemise juures on temperatuuri langemine nii suur, et osa vedelast gaasist läheb tahkesse olekusse. Hiljuti õnnestus

saada temperatuuri veel ainult 0,005° ülalpool absoluutset nulli (teiste, siin kirjeldamata jäänud võtetega).

Alljärgnevas tabelis on toodud nende ainete keemis- ja tahkestumistemperatuurid, mis harilikult on gaasid.

Gaasid	Hapnik	õhk	Lämmastik	Vesinik	Heelium
Keemistemperatuur	—183	—193	—196	—253	—269
Tahkestumistemperatuur	—218	—	—210	—259	—271,9[1]

Vedela õhu jaoks, mille temperatuur on peaaegu 190° võrra 0°-st madalam, on teda ümbritsev õhk temperatuuriga $t = 20°$ väga tuliseks kehaks. Sellise õhuga kokkupuutumisel vedel õhk hakkab keema ja kiiresti aurduma. Et säilitada vedelat õhku võimalikult kaua, tuleb takistada soojuse juurdevoolu ümbritsevatelt kehadelt. Selle eesmärgiga kasutatakse vedela õhu säilitamiseks erilisi, nn. D e w a r i anumaid, mis kujutavad endast kahekordsete seintega klaasanumaid. Seinte vahelt on õhk välja pumbatud (soojuse levimise vältimiseks juhtivuse teel); seinad on hõbetatud (kiirgamise vähendamiseks); anumad tehakse peenikeste kaeltega; neid hoitakse lahtiselt (joon. 105).



Joon. 105. Dewari anum.

121. Vedelate gaaside kasutamine. Gaaside veeldamisel on tehniline ja teaduslik tähtsus. Tehnika mõttes kergendab gaaside veeldamine gaaside transportimist, milliseid kasutatakse tehnikas, meditsiinis jts., kuna vedelas olekus on samas ruumalas rohkem ainet. Nii toimetatakse vedel süsihape terasballoonides gaseeritud jookide tööstustesse.

[1] 26-atmosfäärilise rõhu juures.

Vedelate gaaside aurumisel tekkinud külmust kasutatakse kergestiriknevate ainete transportimisel.

Juba 1897. aastal avastati, et vedela õhu ja puusöe segu annab suurepärase lõhkeaine.

Lõhkepadrunid täidetakse söepuruga või kiiselguuriga (ränihiib), mis niisutatakse petrooliga; osa padrunist täidetakse vatiga. Tarvitamise kohal asetatakse padrun puurauku, lastakse sisse vedelat õhku ja pannakse kohe süütenööri abil lõhkema. Töökohal lõhkemata jäänud padrunid ei ole sugugi kardetavad, nii nagu dünamiit- ja teised padrunid, kuna vedel õhk aurub kiiresti.

Samal viisil kasutatakse vedelat õhku kändude juurimisel, pinnase kobestamisel jne.

Vedela õhu abil saab kergesti puhast hapnikku selle tõttu, et lämmastiku keemispunkt on madalamal kui hapniku oma ja lämmastik aurub enne hapnikku. Vedel õhk on vahendiks paljude teiste vedelikkude ja gaaside saamiseks tahkes olekus.

Mis puutub gaaside veeldamise teaduslikku tähtsusse, siis enne kõike kinnitab see veelkord kehade ehituse ühtsust, näidates, et keha olek sõltub tema temperatuurist ja rõhust ega ole määratud antud kehale alatiseks. Gaaside veeldamisel saadud madalad temperatuurid avardasid suuresti teaduslikkude uurimuste piire ja võimaldasid avastada paljude omaduste muutust temperatuuridel 200—270° alla 0°.

Nii muutuvad elastsed kehad nagu kautšuk, või pehmed kehad nagu puuvili neil temperatuuridel rabedaks kui klaas. Elavhõbe muutub taotavaks; vedela õhuga niisutatud puuvill (vatt) muutub lõhkevaks nagu püssirohi. Väga paljud ained (piiritus, munakoor ja teised) hakkavad kiirgama mitmesugustes värvustes (peaasjalikult rohekates), kui neid kiiritada valge valgusega. Tugevasti muutuvad mõned metallide omadused, näiteks nende elektrijuhtivus. Kõik need uurimused lubavad sügavamini tungida aine ehituse olemusse. Eriti

väärtuslikke tulemusi madalate temperatuuride alal on saavutatud viimastel aastatel NSV Liidu Teaduste Akadeemia Füüsikaprobleemide Instituudis.

Harjutus 11.

1. Kui palju on vaja soojust, et soojendada 10^0 juures olevat klaasi vett (250 cm^3) keemiseni ja keeta temast välja auruna 20 g?

2. 20 g veeauru temperatuuriga $t_1 = 100^0$ lastakse läbi 800 g veest, mille temperatuur $t = 10^0$. Määrata segu temperatuur.

Vastus: 25^0.

3. 2 l vett, mille temperatuur $t = 10^0$, soojendatakse kuni 80^0-ni, lastes temasse 100^0-st veeauru. Kuipalju veeauru tuli läbi lasta?

Vastus? 250 g.

4. 500 g vette on lastud 63 g 100^0-st veeauru. Peale auru läbilaskmist saab temperatuur 80^0-seks. Millega oli võrdne vee esialgne temperatuur?

5. 250 g vette, mille temperatuur $t = 16^0$, lastakse 12 g eetri auru eetri keemistemperatuuri juures; vee temperatuur tõusis kuni $20{,}7^0$-ni. Arvutada eetri keemissoojus.

KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Mille poolest erineb keemine aurumisest?
2. Mis on keemissoojus?
3. Missugustest tingimustest sõltub vedeliku aurumise kiirus?
4. Mida nimetatakse küllastavaks auruks?
5. Kuidas seletatakse molekulaar-kineetilise teooria järgi vedeliku aurumist ja ruumi küllastamist auruga?
6. Kuidas seletada molekulaar-kineetilise teooria põhjal vedeliku aeglasemat aurumist õhus kui tühjuses?
7. Kas tahked kehad auruvad?
8. Tooge näiteid temperatuuri alanemise kohta aurumisel.
9. Kas sõltub küllastava auru rõhk ruumalast?
10. Mis juhtub siis, kui küllastava auru ruumala vähendada? suurendada?
11. Kas sõltub küllastava auru rõhk temperatuurist?

12. Mis juhtub vedelikuga, kui tema küllastava auru rõhk saab võrdseks õhurõhuga?

13. Kuidas muutub vedeliku keemistemperatuur, kui välisrõhk suureneb? väheneb?

14. Kas mitteküllastava auru rõhk sõltub ruumalast?

15. Missugusel viisil on võimalik muuta mitteküllastavat auru küllastavaks ja viimast vedelikuks?

16. Mis on kriitiline temperatuur?

17. Kuidas veeldatakse gaase?

18. Milles seisab Daltoni seadus?

Kirjandus. Григорьев, Холод в природе и технике. Перельман, Физическая хрестоматия, кн. I, стр. 153—175.

3. Õhu niiskus.

122. Õhu niiskus. Maa peal tekib pidevalt veeauru: toimub aurumine kõikidelt veekogudelt, taimkattelt, auru hingavad välja loomad. Kuna veeauru tihedus on väiksem õhu tihedusest (veeauru tihedus on 0,62 õhu tihedusest), siis aur tõuseb Maa pinnalt üles ja levib õhkkonnas.

Õhurõhk on kuiva õhu rõhu ja temas sisalduva veeauru rõhu summa. Antud temperatuuri juures õhus oleva veeauru rõhku nimetatakse absoluutseks niiskuseks.

Kuid enamik niiskusega ühenduses olevaid nähtusi, nagu näiteks aurumise kiirus, riide kuivamine, taimede närtsimine ja looma organismide seisukord, ei sõltu mitte õhus olevast auru hulgast, vaid sellest, kui ligidal on antud hulk küllastamisele. 6 mm elavhõbedasambale vastav veeauru rõhumine on palaval juulikuu päeval veel väga kaugel küllastamisest, kuna jahedal sügispäeval võib ta küllastada õhku. Õhu niiskuse iseloomustamiseks on peale absoluutse niiskuse veel tarvitusele võetud relatiivne (suhteline) niiskus. Relatiivseks niiskuseks nimetatakse protsentides avaldatud absoluutse niiskuse suhet

nende aurude rõhuga, mis antud temperatuuri juures õhku küllastavad. Küllastava veeauru rõhumine, nagu eespool öeldud, on korralikult läbi uuritud ja selle rõhu kohta mitmesuguste temperatuuride jaoks tabelid koostatud (vt. tabelit §-s 114). Kui näiteks õhu temperatuur on $t = 20^0$ ja õhus oleva veeauru rõhk, nagu eespool oli antud, on $f = 6$ mm Hg, siis annab tabel §-s 114 küllastava auru rõhu 20°-se temperatuuri juures $F = 17{,}54$ ja relatiivne niiskus on siis $\frac{6 \cdot 100}{17{,}54} = 34\%$.

Üldse, kui absoluutne niiskus on f mm, küllastava auru rõhk õhu temperatuuri juures on F mm, relatiivne niiskus on B, siis:

$$B = \frac{f}{F} \cdot 100\%.$$

Kuna F väärtus iga temperatuuri jaoks saadakse tabelist, siis relatiivse niiskuse määramine kujuneb absoluutse niiskuse f leidmiseks.

Teades veeauru rõhku, on kerge arvutada auru massi ühes ruumala ühikus. 1 m³ kuiva õhu mass 0°-se temperatuuri ja normaalrõhu 760 mm Hg juures on 1293 g. Rõhu H mm juures on ta mass $\frac{1293 \cdot H}{760}$ (§ 68), temperatuuri t^0 ja rõhu H mm juures on 1 m³ õhu mass $\frac{1293 \cdot H}{760\,(1 + \beta t)}$ (§ 55). Veeauru tihedus õhu suhtes on 0,622. Seepärast avaldub 1 m³ veeauru mass rõhu F ja temperatuuri t juures

$m = \frac{1293 \cdot 0{,}622}{760} \cdot \frac{F}{1 + \beta t}$ kaudu, kus β võib võtta võrdseks $\frac{1}{293} = 0{,}00366$. Pärast arvulisi teisendusi $m = \frac{1{,}0582}{1 + \beta t} \cdot F$. Murd $\frac{1{,}0582}{1 + \beta t}$ on harilikkude õhutemperatuuride juures ühe lähedal.

Õhu 1 m^3-s sisalduva veeauru mass grammides ja selle rõhk elavhõbedasamba millimeetrites on peaaegu kokkulangevad arvud, nagu seda näha võib ligilisatud tabelist.

Temperatuur t^0	Rõhk p Hg mm-tes	Veeauru mass grammides õhu 1 m^3-s
0	4,58	4,84
10	9,21	9,4
20	17,54	17,3
30	31,82	30,3

Absoluutset niiskust võib anda grammides avaldatud veeauru massiga, mida sisaldab 1 m^3 õhku.

123. Kastepunkt. Absoluutse niiskuse määramise üks viisidest põhjeneb kastepunkti määramisel. Kastepunktiks nimetatakse sellist temperatuuri, mille puhul õhus leiduv aur muutub küllastavaks. §-s 117 oli märgitud, et mitteküllastavat auru saab teha küllastavaks temperatuuri madaldamise kaudu. Kaste jälgede ilmumine jahutatavate esemete peale on küllastamise tunnuseks; kaste ilmumise temperatuuri märgitakse kastepunktina.

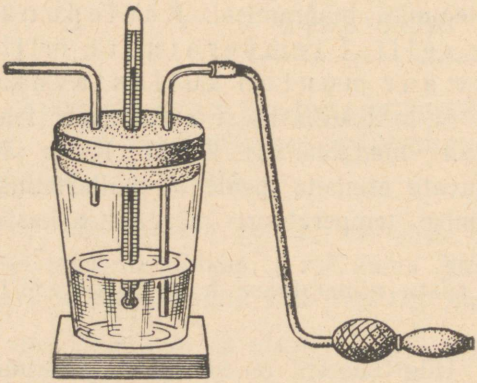
Niiskuse mõõtmise riistu nimetatakse hügromeetriteks[1].

124. Hügromeeter. Hügromeetril on seade temperatuuri madaldamiseks ja termomeeter selle mõõtmiseks. Temperatuuri madaldamist võib esile kutsuda eetri kiire aurumisega, mis võtab vajaliku soojuse anumalt ja ümbritsevalt õhult. Seepärast võib lihtsaimaks hügromeetriks olla mistahes anum, millesse on kallatud eetrit ja pistetud termomeeter (joon. 106). Kui eetrisse pistetud toru kaudu puhuda õhku, siis võib tekitada niisugust temperatuuri alanemist, et õhus

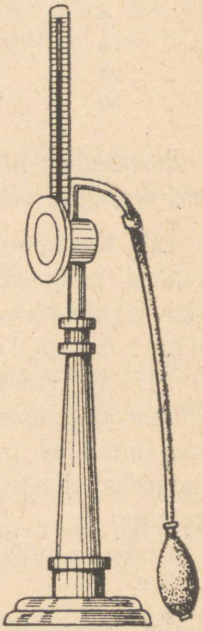
[1] Kreekakeelsest sõnast *hygros* — niiske.

olev veeaur muutub küllastavaks ja moodustab anumale õhukese niiskuse kihi. Temperatuur kaste ilmumise esimesel momendil ongi kastepunkt. Siis leitakse tabelist kastepunktis õhku küllastava veeauru rõhk *f*; see rõhk on õhus olemasoleva auru rõhk antud temperatuuri juures, s. o. õhu absoluutne niiskus.

Laboratoorsed hügromeetrid erinevad kirjeldatud hügromeetritest selle poolest, et nad võimaldavad kaste ilmumise momenti täpsemalt määrata. Joonisel 107 on näha Lambrechti laboratoorse hügromeetri välimus.



Joon. 106. Lihtsaim hügromeeter.



Joon. 107. Lambrechti hügromeeter.

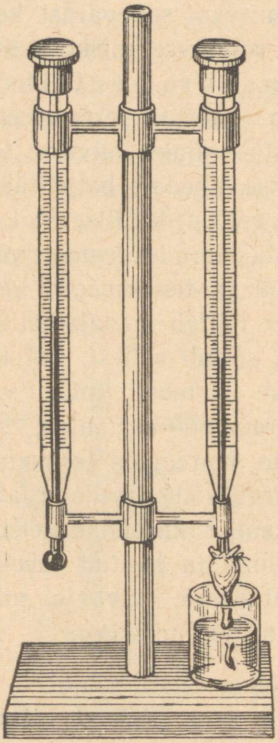
Karpi on kallatud eetrit ja sellesse pistetud termomeeter. Läbi eetri puhutakse kummipirni abil õhku. Kaste ilmub hästi poleeritud ja kullatud karbi seinale. Et täpsemini oleks võimalik märkida kaste ilmumist, on karbi seina külge tehtud samast metallist raam, mis pilu abil on altpoolt eraldatud. Kuna raam jaheneb aeglasemalt kui karbi seinad, siis

kahe pinna — karbi seina ja raami — oleku võrdlemine võimaldab täpsemalt ära märkida kaste ilmumise momenti.

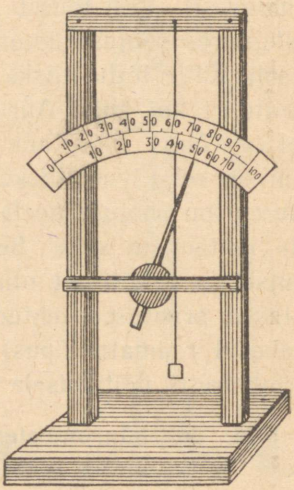
125. Psühromeeter. Eespool kirjeldatud hügromeetri tüüp ei ole sobiv niiskuse kiireks määramiseks; sellepärast kasutatakse meteoroloogilistes jaamades relatiivse niiskuse määramiseks riistu, mida nimetatakse *psühromeetriteks*. *Augusti* psühromeeter koosneb kahest termomeetrist (joon. 108), milledest üks jääb vaatluse ajaks kuivaks; teise termomeetri kuulikese ümber seotakse tihedalt batistitükike, mille ots lastakse klaasis olevasse vette (destilleeritud või vihmavesi). Vesi tõuseb batisti mööda, aurudes temast, võtab sellejuures soojust ümbritsevalt õhult ja termomeetri kuulikeselt, mille tõttu niiske termomeeter näitab madalamat temperatuuri kui kuiv. Aurumise kiirus sõltub sellest, kui kaugel on õhus olev aur küllastamise astmest: mida väiksem on relatiivne niiskus, seda kiirem on aurumine, seda suurem on soojuse neelamine ja seda suurem on termomeetrite näitamiste vahe. Selle vahe järgi võib arvutada absoluutset ja relatiivset niiskust. Määramise kiirendamiseks on sellised arvutused tehtud varem valmis ja kantud tabelisse (tabel 4 raamatu lõpus), mis annab igale kuiva ja niiske termomeetri näitamisele vastava relatiivse niiskuse.

126. Juushügromeeter. Veel lihtsam riist põhjeneb inimese juuksekarva omadusel muuta oma pikkust niiskuse muutumisel ja nimelt pikeneda niiskuse suurenedes ja lüheneda niiskuse vähenedes. Rasvavabaks tehtud ja muul viisil vastavalt töödeldud inimese juus kinnitatakse ühte otsa pidi raami külge (joon. 109) ja teise otsa riputatakse väike vihike. Et teha juukse pikkuse muutumine nähtavaks, visatakse juus üle ploki, mille külge on kinnitatud pikk osuti. Juukse pikenemisel keerab vihike oma raskusega plokki ühes suunas, kuid juukse lühenedes teises suunas. Plokiga ühenduses olev osuti liigub kaart mööda, millele on kantud rela-

tiivse niiskuse suurused protsentides. Jaotus 0 pannakse õhu täieliku kuivuse juures; jaotus 100 — küllastamise korral; 0 ja 100 vahemik jaotatakse sajaks võrdseks osaks.



Joon. 108. Psühromeeter.



Joon. 109. Juushügromeeter.

Harjutus 12.

1. Miks puhutakse hügromeetri eetrist õhku läbi?
2. Miks tõuseb vesi üles psühromeetri batistis?
3. Millal on ühe ja sama absoluutse niiskuse juures relatiivne niiskus suurem, kas suvel või talvel, päeval või öösel?
4. Miks prillikandja inimene peab talvel väljast tuppa tulemisel pühkima prille?

5. Leida absoluutne ja relatiivne niiskus, kui õhu temperatuur $t = 20^0$ ja kastepunkt $t_0 = 9^0$.

Vastus: 51%.

6. Määrata kastepunkt, kui õhu temperatuur on 18^0 ja relatiivne niiskus $B = 60\%$.

Vastus: $10{,}1^0$.

7. Määrata kastepunkt, kui õhu temperatuur on 20^0, 24^0 või 16^0 ja relatiivne niiskus 50%, 60% või 80%.

8. Missuguse õhutemperatuuri juures on kastepunkt $t_0 = 7^0$, kui $B = 75\%$?

Vastus: $11{,}2^0$.

9. Päeval on õhu temperatuur $t = 22^0$; $B = 60\%$. Kas tekib öösel kastet, kui maapinna temperatuur saab 10^0-seks?

10. Õhu temperatuur on 0^0, relatiivne niiskus $B = 70\%$. Kas öösel tekib härmatist, kui maapinna temperatuur langeb -5^0-ni?

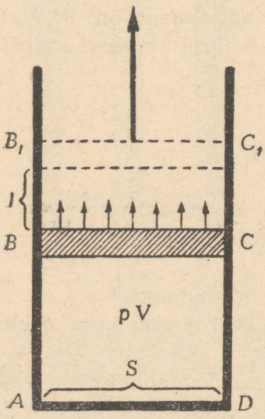
11. Psühromeetri kuiva termomeetri näitamised on: 10^0, 12^0, 18^0, 24^0, 30^0. Märja termomeetri vastavad näitamised on: 8^0, 9^0, 14^0, 18^0, 22^0. Leida raamatu lõpus oleva tabeli 4 järgi relatiivne niiskus iga juhu jaoks.

KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Mida nimetatakse õhu absoluutseks niiskuseks?
2. Mida nimetatakse õhu relatiivseks niiskuseks?
3. Mida nimetatakse kastepunktiks?
4. Missuguse meetodiga saab määrata kastepunkti?
5. Missugused katseriistad on ette nähtud kastepunkti leidmiseks?
6. Kuidas määrata relatiivset niiskust, kui kastepunkt on teada?
7. Mis on psühromeeter ja kuidas teda kasutada?

V. Gaasi ja auru töö.

127. Gaasi töö konstantse rõhu juures. Gaaside omaduste peatükis oli selgitatud, et gaasi rõhk suureneb komprimeerimisest ja soojendamisest. Et suurendada gaasi rõhku, tuleb kulutada tööd komprimeerimiseks või soojust soojendamiseks. Seepärast on atmosfäärist kõrgema rõhu alla viidud gaasil potentsiaalse energia tagavara ümbritseva õhu suhtes. Selle potentsiaalse energia ülejäägi arvel võib gaas sooritada tööd, kui talle antakse võimalus paisuda.



Joon. 110.

Gaasi paisumisel gaasi poolt tehtud töö arvutamise ülesanne seisab selles, et avaldada see töö sõltuvuses rõhust, mille all on gaas, ja ruumala muutusest. Arvutame algul gaasi paisumise töö lihtsamal juhul, kus paisumine toimub konstantse rõhu all.

Sellise paisumisega on tegemist, kui gaas on suletud silindrisse, mis on kaetud kerge, gaasi mitteläbilaskva, hõõrdumiseta liikuva kolviga (joon. 110). Aeglase soojenemise juures hakkab gaas nii paisuma, et tema rõhk igal momendil on võrdne õhurõhuga, s. o. jääb konstantseks. Tähistame gaasi esialgse ruumala silindris *ABCD* *V*-ga ja rõhu *p*-ga.

Soojenemisel ja paisudes tõstab gaas kolvi ja võtab ruumala AB_1C_1D, võrdse V_1-ga. Kolvi tõstmisel teepikkusel $BB_1 = l$ tehakse tööd, mis on võrdne jõu F ja teepikkuse korrutisega. Kui kolvi pindala on S ja rõhk p, siis kolvile mõjuv jõud on

$$F = pS.$$

Kolvi tõstmise töö on võrdne

$$A = pSl.$$

Kuid Sl kujutab endast ruumala juurdekasvu gaasi paisumisel:

$$Sl = V_1 - V = \Delta V.$$

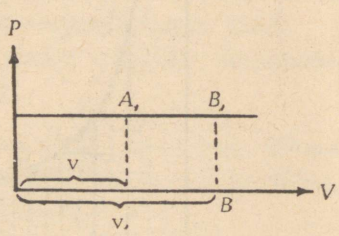
Siit

$$A = p \cdot \Delta V.$$

Seega gaasi tööd paisumisel konstantse rõhu juures mõõdetakse rõhu ja ruumala juurdekasvu korrutisega.

128. Gaasi paisumise töö graafik. Muutuva ruumala ja konstantse rõhu vahelist sõltuvust võib kujutada graafiliselt ning graafiku järgi arvutada sooritatud tööd.

Võtame abstsisstelje ruumala teljeks ja kanname temale rea võrdseid lõike, millest igaüks vastab ruumala ühikule. Ordinaattelje võtame rõhu teljeks. Igale ruumala väärtusele vastab antud juhul üks ja sama rõhu jääv väärtus. Kõikidest abstsisstelje punktidest püstitatud ordinaadid on omavahel võrdsed (joon. 111).



Joon. 111.

Seepärast asuvad gaasi olekut kujutavad punktid tasapinnal kõik ühel sirgjoonel, mis on rööpne abstsissteljega.

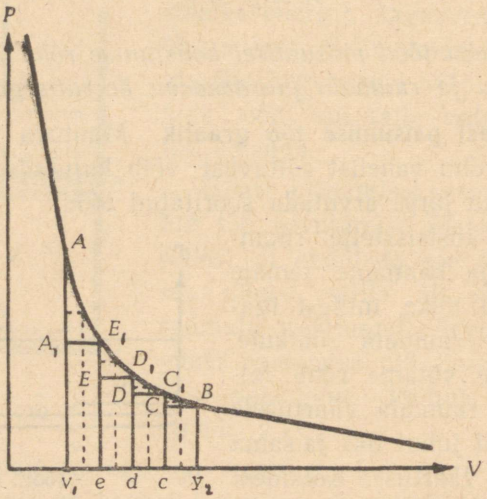
Konstantse rõhu juures nimetatakse gaasi ruumala muu-

tumise protsessi isobaariliseks ja seda protsessi kujutavat graafikut isobaariks.

Kuidas aga graafiku järgi arvutada gaasi paisumise tööd? Abstsissi lõik AB annab ruumala muutuse $V_1 - V = \Delta V$; ordinaat AA_1 kujutab rõhku p. Korrutis $p \cdot \Delta V$ annab graafikul pindala AA_1B_1B väärtuse; samal ajal on korrutis $p \cdot \Delta V$ gaasi poolt tehtud töö mõõduks.

Siit saame: *konstantse rõhu puhul on gaasi paisumise töö arvuliselt võrdne pindalaga, mida piiravad abstsisstelg, isobaar ja ruumala alg- ning lõppväärtusele vastavad ordinaadid.*

128-a. Gaasi töö muutuva rõhu juures. Kas ei ole võimalik gaasi oleku muutumise graafiku järgi mõõta tööd ka teiste protsesside, näiteks isotermilise juures (joon. 112)?



Joon. 112. Gaasi paisumise töö mõõtmine gaasi oleku muutumise graafiku järgi.

Et oleks võimalik kasutada eelmist tulemust, asendame kõvera osa AB murdjoonega $BCC_1DD_1EE_1A_1A$. Selline asen-

dus tähendab seda, et ruumala muutumisel B-st kuni C-ni, C_1-st kuni D-ni, D_1-st kuni E-ni ja selle järel E_1-st kuni A_1-ni jääb rõhk muutumatuks, punktides CDE ja A_1 äkki kasvab. Sellise tegeliku paisumise asendamise juures kujuteldavaga avaldub gaasi paisumise töö V_1-st kuni V_2-ni arvuliselt ristkülikute $A_1E_1eV_1$, eED_1d, dDC_1c ja $cCBV_2$ ruumalade summaga. See summa kujutab seda täpsemalt tegelikku paisumist, mida ligemal on murdjoon kõverjoonele. Kui jagame vahemikud ed, dc jt. pooleks ja keskpunktidest püstitame abstsissteljega risti olevad jooned, siis, nagu on näha joonisest, saame uue rea ristkülikuid, millede pindalade summa läheb ligemale pinnale, mida piirab kõverjoon, abstsissi osa ja äärmised ordinaadid. Kui lõputult suurendada murdjoone lülide arvu, siis, nagu geomeetriast teada, murdjoone pikkus läheneb kõverjoone pikkusele kui piirile. Seepärast me tuleme järgmisele lõppjäreldusele: *gaasi paisumise töö on arvuliselt võrdne pindalaga, mida piiravad abstsisstelg, gaasi oleku muutumise käiku kujutav kõverjoon ja gaasi ruumala alg- ning lõppväärtusele vastavad ordinaadid.*

Põhinedes sellel järeldusel, võib gaasi või auru oleku muutumise graafiku järgi arvutada soojusmasinate tööd.

Enne kui üle minna soojusmasinate graafiku saamisele, meenutame masinate eneste ehitust.

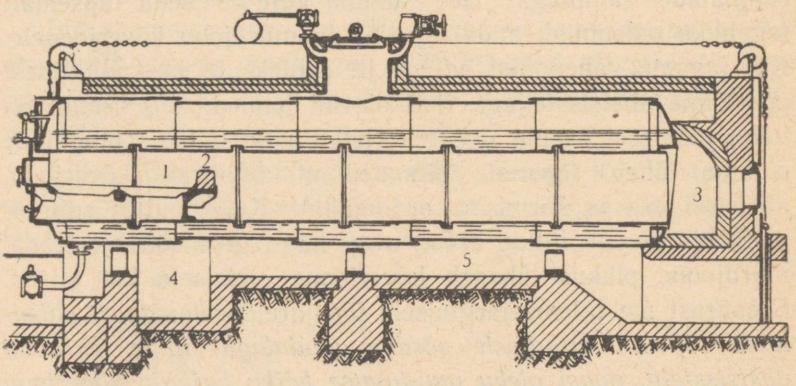
129. Aurujõu-masinad. Masinad, mis muudavad kütuse energia veeauru energiaks, viimase aga mehaaniliseks tööks, nimetatakse aurujõu-masinateks.

Veest tekkinud küllastav aur võtab normaalrõhu juures enda alla 1700 korda suurema ruumala kui vesi, millest ta on tekkinud.

1 tehnilise atmosfääri ($1\frac{kG}{cm^2}$) juures on vee keemise temperatuur 99,1°, 5 tehnilise atmosfääri juures — 151°; 10 juures — 179°; 15 juures — 197°; 20 juures — 211° jne.

Aurujõu-masinaid ehitatakse kahte liiki: aurumasinad ja auruturbiinid.

Kuna aurujõu-masinad töötavad auru abil, siis iga aurujõu-masina juures peab olema aurutekitaja — katel (joon. 113) ühes küttekoldega, kus toimub kütuse keemilise energia muundumine soojuseks.



Joon. 113.

130. Küttekolle. Küttekolde ehitus sõltub kütuse liigist. Tahke kütuse jaoks ehitatakse küttekolle kas katla alla tellismüüri sisse niinimetatud „müüritisse", millesse on müüritud ka katel, või katla sisse tuletorusse (joon. 113). Kütus asetatakse küttekoldes restile (1), mis koosneb paralleelsetest vahedega eraldatud malmvarbadest.

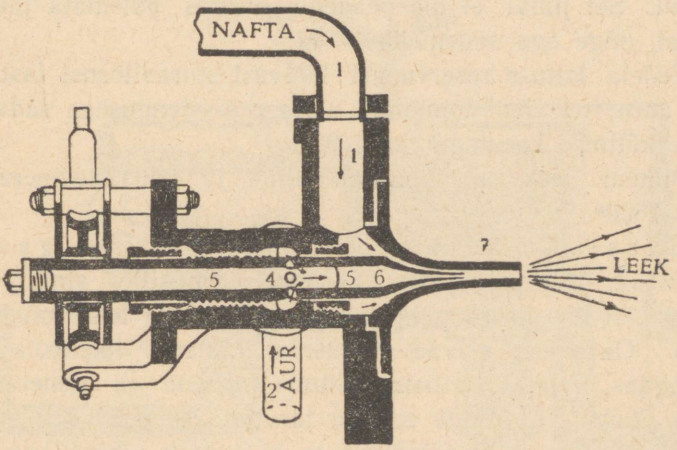
Küttekolde alumisest osast, t u h a k a s t i s t ehk t õ m b e a u g u s t tuleb läbi resti pilude põlemiseks vajalik õhk. Põlemise saadused lähevad välja õhku suitsutorude (3) kaudu.

Kogu kütuses sisalduv energia ei muundu auruenergiaks. Küttekoldes on suuri energiakadusid ja nimelt:

1) ei toimu kütuse t ä i e l i k k u ä r a p õ l e m i s t. Tahke kütuse korral osa temast kukub läbi resti tuhakasti, sadestub nõgi, suur osa kütusest lendab korstnasse mitte täiesti

oksüdeerunud ühendite, nagu süsinik-oksüüdi (vingugaasi CO) ja süsivesinikkude näol, see kadu võib ulatuda 10%-ni.

2) Tunduv osa soojusest läheb välja õhku ühes põlemissaadustega, mis tulevad katla alt temperatuuriga 300—400°; selle kao suurus ulatub 15%-ni; tänapäeva tehnika püüab seda osa ära kasutada katla toitevee soojendamiseks;



Joon. 114. Pihusti.

3) Osa soojust kaob kiirgamise teel.

Üldine kadu ulatub kuni 30%.

Vedelatest kütustest kasutatakse katelde kütmiseks peaasjalikult naftat või masuuti, s. o. nafta jätteid.

Vedela kütuse põletamise viisidest on suurim praktiline tähtsus põletamisel pihustatud olekus.

Vedela kütuse pihustamine toimub katlast võetava auru abil riistas, mida nimetatakse pihustiks (forsunka) (joon. 114).

Vedel kütus voolab toru 1 kaudu koonusesse 7, millesse ka toru 2 kaudu, avause 4 kaudu ja aurutoru 5 kaudu tuleb aur, mis suure kiirusega voolab tüüsist 6 tüüsi 7, haarates kaasa ja pihustades kahe tüüsi vahel olevat vedelikku. Joonisel kujutatud kruvid ja kraanid on vedela kütuse ja auru juurdevoolu reguleerimiseks.

Vedela kütusega küttekolded, kus kütused pihusti abil pihustatakse, on kõige täiuslikumad mehaaniliste küttekollete tüübid. Sel juhul ei ole peaaegu olemas põlemata jäänud kütust, nõge ega sädemeid.

Vedela kütuse reservuaari läbivast spiraaltorust lastakse läbi auru; sel viisil toimunud nafta eelsoojendusega säavutatakse kütmise kasutegur kuni 90%.

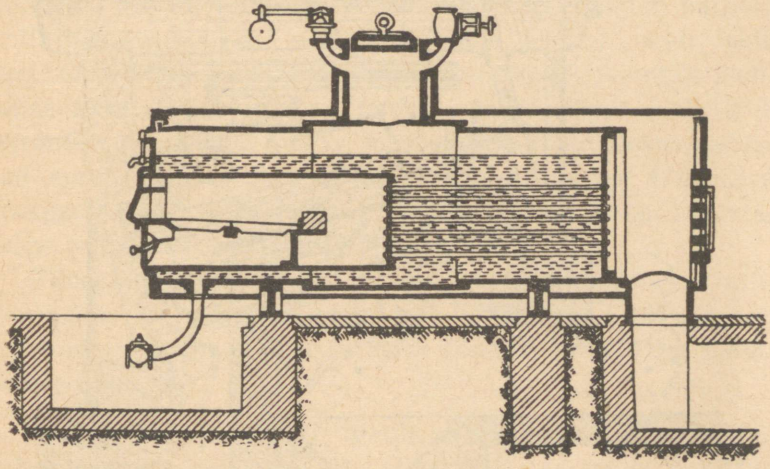
Pihusti leek on koonusekujuline ja tema temperatuur kuni 1600°.

Gaasilise kütuse põletamisel tarvitatakse gaasipõletit, mis põhijoontes sarnaneb pihustile, ainult selle vahega, et ühe toru kaudu antakse küttegaasi, teise kaudu — õhku. Gaasidest evivad kütusena tähtsust looduslik ehk naftagaas, metallurgiliste ahjude gaasid ja generaatorgaas (kunstlik). Muide viimast tarvitatakse peamiselt gaasimootorite juures. Gaasipõletitega ja samuti pihustitega kütmise kasutegur on suur. Seepärast on sotsialistliku ülesehituse arendamiseks esikohale tõstetud söerajoonide gasifitseerimise probleem. Gasifitseerimine seisab kivisöe ümbertöötamises gaasiks kohapeal, kaevandustes, sel viisil saadud gaasi edasiandmises gaasijuhtmete kaudu tarvitamise kohtadesse ja tema põletamises nendes kohtades aurukateldes või gaasimootorites.

Ikka suuremat tähtsust omandab viimasel ajal meie maa paljudes rajoonides (Saraatovi, Stalingradi, Lvovi oblast) maa sisemuses suurel hulgal leiduva loomuliku küttegaasi (metaani) tootmine. 1946. a. seltsimees Stalini näpunäidete järgi ehitatud gaasijuhe Saraatov — Moskva kindlustab pea-

linnale odava loodusliku gaasi saamist, sellega väga suurel hulgal kokku hoides juurdeveetavat kütust.

131. Katel. Põletatava kütuse energia, välja arvatud kadu küttekoldes, läheb vee soojendamiseks katlas. Lihtsaim katla liik on raudplekist kokkuneeditud ja sissemüüritud silinder (joon. 113). Katelt läbistab lai leektoru (mõnikord on neid kaks või kolm), milles asub küttekolle.

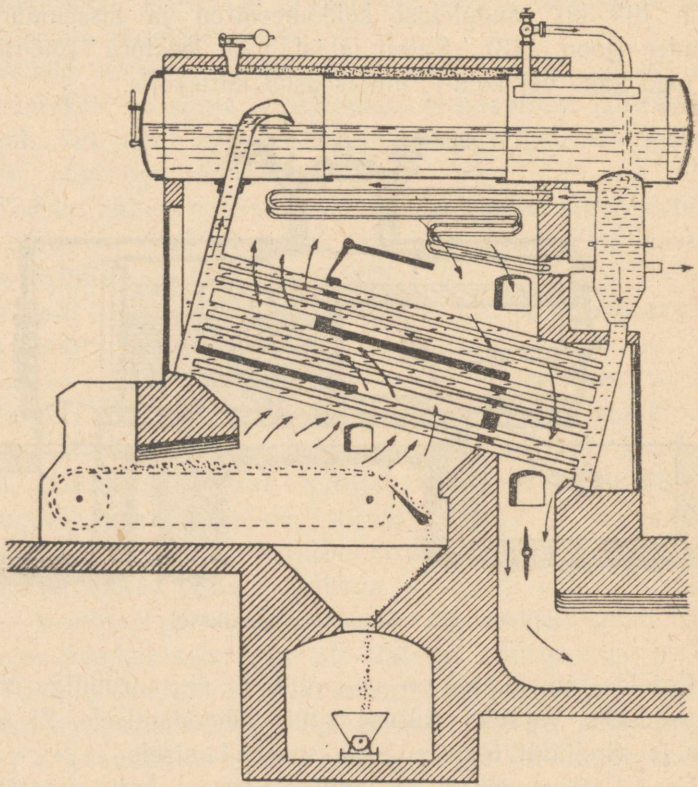


Joon. 115. Suitsutoru-aurukatel.

Katelde täiustamine on suunatud: 1) ühe auruhulga ühiku tekitamiseks vajaliku kütuse kulu vähendamisele, 2) auru rõhu ja järelikult tema energia suurendamisele.

Need täiustamised on mitmesugusel kujul teostatud suitsutorudega (joon. 115) ja veetorudega (joon. 116) aurukateldes. Suitsutorukatel kujutab endast silindrit, mille sisse on mahutatud mitusada kaunis peenikest suitsutoru. Küttegaasid läbivad neid torusid. Veetorukatel koosneb kahest reservuaarist, mille vahelt käivad läbi torud. Reservuaarid ja torud on täidetud veega. Küttegaasid soo-

jendavad esmajärjekorras torusid ja ülemist reservuaari, seejärel alumist reservuaari. Eriti tähtsat osa katlaehitamise arengus etendasid tuntud vene inseneri V. Šuhhovi[1] tööd. Tema lõi veetorukatla erilise konstruktsiooni, mis paistis



Joon. 116. Veetoru-aurukatel.

[1] Šuhhov, Vladimir Georgievitš (1853 — 1939) oli tuntud vene insener ja leidur ning NSV Liidu Teaduste Akadeemia auliige. V. Šuhhovile kuulub väga suur hulk tähtsaid leiutisi. V. Šuhhov

välja oma lihtsusega ja katla üksikute põhiosade standardimise ülesande hiilgava lahendusega. Šuhhovi katel on varustatud ka tema enda süsteemi aurusoojendajaga. Šuhhovi katlad leidsid väga laialdast tarvitamist tööstuses; reas piiritagustes maades levinud aurukatlad osutuvad teatud määral Šuhhovi katla koopiateks.

Viimaste aastate jooksul on prof. L. Ramzini poolt loodud otsevoolulise katla konstruktsioon. Ramzini katla paremus seisab peamiselt selles, et temas puudub hariliku katla hädavajalik osa — raske ja kallis trummel, mida läbib vesi. Otsevoolulises katlas peab vett möödapääsematult pumpama vahetult läbi torude, milledes ta järelikult läbib kõik aurumise astmed ja lõpuks muutub kõrgrõhu ülekuumendatud auruks. Kõrgrõhu aurule üleminek on aga tänapäeva energeetika põhilisi ülesandeid, kuna kõrgrõhuga saavutatakse kütuse kokkuhoidu 10—15 protsenti.

Tänapäeva katlaseadistes varustatakse kütmisruum mitmesuguste mõõtmisriistadega, mis võimaldavad katkestamatut kontrolli kogu seadise ja selle üksikute osade õige funktsioneerimise üle.

132. I. Polzunovi ja J. Watt'i aurumasin. Esimese aururakendava masina ehitas Papin 1690. aastal ja kirjeldas seda oma 1695. aastal ilmunud raamatus.

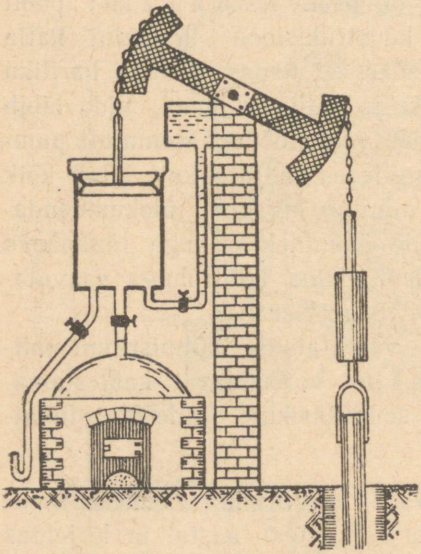
Papini masinas ei olnud veel eraldatud üksteisest katel, kolvisilinder ja jahutaja.

Newcomeni masinas (1711. a.) oli katel, milles tekib aur, juba eraldatud silindrist (joon. 117) ja auru lasti silindrisse kraani üksteisele järgnevate avamiste ja sulgemistega; aur tõstis kolvi üles ja laskis sellega alla veepumba varda.

---

leiutas nafta krakkimisprotsessi, mis avas uue ajajärgu nafta ümbertöötamise alal; selle protsessi abil saadakse bensiini, seda kõrgesordilist kütust, ilma milleta kogu tänapäeva auto- ja lennutehnika pole mõeldav.

Auru jahutamiseks ja kondenseerimiseks pritsiti kolvi alla ja silindrisse külma vett. Selle tagajärjel jäi rõhk kolvi all väikeseks. Atmosfääri rõhk, olles suurem aururõhust silindris, langetas kolbi ja ühes sellega tõstis pumba varrast ning vett.



Joon. 117. Newcomeni aurumasina skeem.

Newcomeni masina paremus, võrreldes Papini mudeliga, seisis selles, et katel oli eraldatud silindrist, kuid jahutaja oli ikkagi veel koos silindriga.

Kuna nendes mõlemates masinatüüpides tööd sooritav liikumine toimus atmosfääri rõhuga, siis on neid õigem nimetada *atmosfääri-* kuid mitte aurumasinateks.

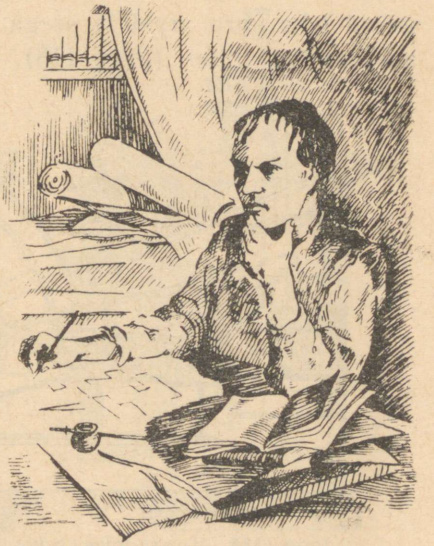
Auru jahutamine silindris kutsus välja ka silindri enda suure jahenemise ja silindri uuesti ülessoojendamine nõudis kütuse lisakulu.

Papini ja Newcomeni masinad olid väga ebatäiuslikud ja pideva töö saamiseks kõlbmatud ja olid ainult „tulemõju" pumbad.

Esimesena tõi välja universaalse aurujõu-masina idee vene soojustehnik Ivan Ivanovitš Polzunov (1730—1766). Temale kuulubki maailmas esimese tehaste ülesannetele kohandatud pideva töötamisega auru-atmosfäärimasina loomise suur teene. „Leidur ja konstruktor, tehnoloog ning masinaehitaja, maakide ja ehitusmaterjalide asjatundja, saeveskite ja tam-

mide ehitaja, mäeinsener ning metallurg, mehaanik ja matemaatik, füüsik ning meteoroloog, silmapaistev pedagoog ning meister joonistamises ja joonestamises — selleks kõigeks sai mitmekülgselt andekas iseõppija Polzunov [1].

Neil aastail, kui I. Polzunov lõi oma masina, J. Watt töötas Newcomeni aurupumba täiustamise kallal.

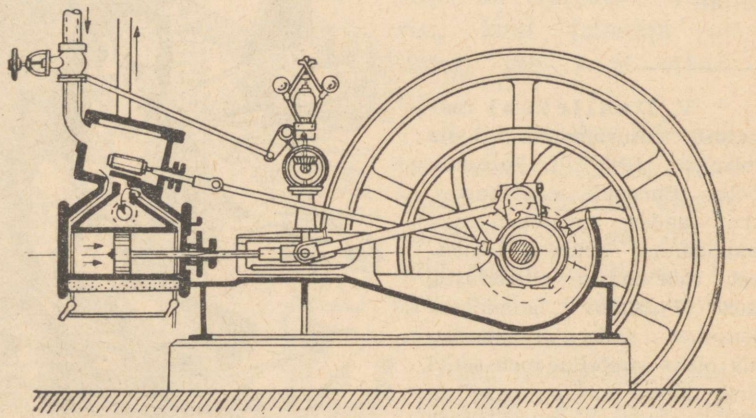


I. Polzunov (1730—1766).

[1] V. Danilevski raamatust „Aurumasina looja Polzunov, 1947". I. Polzunov töötas Barnauli mäetehastes. Aru saades aurujõu-masina rakendamise suurest tähtsusest mäetehaste asjanduses, asus Polzunov lahendama ülesannet anda „tulemasin, mis oleks suuteline meie soovi järgi täitma mis on vaja" ja 1763. a. esitas „tulemõjuga" õhupuhumise masina projekti. Selle masina ehituses Polzunov esimest korda rakendas: a) silindri kahekordistamist, millega saavutas masina ühtlasema käigu; b) automaatset aurujaotamist; c) kett-ülekannet. Esimest korda tehnika ajaloos rakendas Polzunov aurumasinat metallitehase teenindamiseks. Vaatamata kõikidele ülemuse poolt tehtud takistustele, lõpetas Polzunov 1765. a. oma masina monteerimise. Rasketes töötingimustes Polzunov ruineeris oma tervise ja suri mõni päev enne masina käikulaskmist. Peale tema surma lasti masin käiku ja see töötas edukalt mitu kuud. Kuid Polzunovi masin rikuti ruttu asjatundmatuse tõttu. Vaatamata sellele Polzunovi leiutis avaldas suurt mõju aurumasina edasisele arengule. Välismaised spetsialistid, kes sagedasti käisid Barnaulis, nägid Polzunovi masinat ja tutvusid selle töötamisega.

1764. a. ehitati J. Watt'i täiustatud pump. Kuid alles 21 aastat pärast Polzunovi tööd tuli J. Watt universaalse aurumasina ideele ja 1786. a. ehitas selle tehase ülesannete täitmiseks.

Auru järjestikune sisselaskmine ühele ja teisele poole kolbi, mida rakendas Watt, võimaldas mõlemad kolvi liikumised teha auru arvel ja seega anda kahepoolse tegevusega aurumasina tüübi (joon. 118).



Joon. 118. Kahepoolse tegevusega aurumasina skeem.

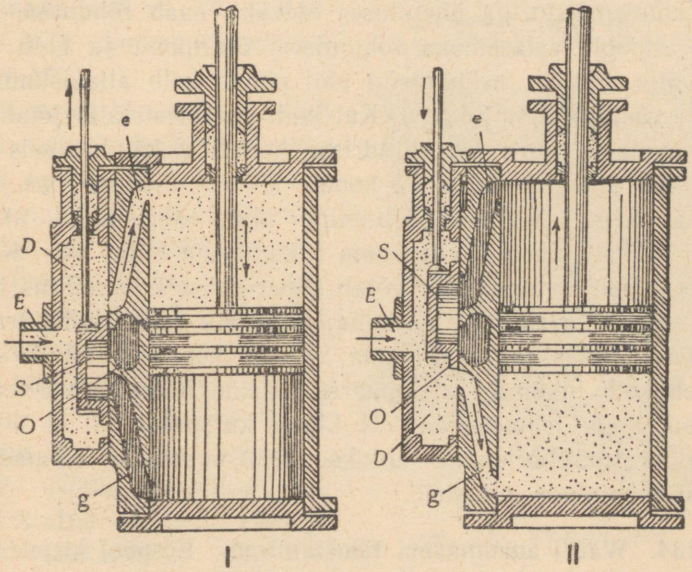
Watt'i poolt automaatse siiber-aurujaotaja tarvitusele võtmisega viidi peajoontes lõpule aurumasina leiutamine.

Aurumasinate ehitamise alal käis järgnevatel aegadel võitlus kasuteguri tõstmise pärast. Nüüdisaja statsionaarsete aurumasinate kasutegur on 12—15%, veduritel — 8%.

Tuginedes VII klassis saadud põhiteadmistele aurumasina ehitusest, vaatleme järgnevalt mõningaid ehituse üksikasju.

133. Aurusiiber. Tänapäeva aurumasin on välja töötatud sajandite jooksul järkjärgulise täiendamise teel.

Aurumasin kasutab auru energiat, mida aur on saanud soojendamisest tekkinud rõhu suurenemisel. Aurumasin võib töötada ainult siis, kui tema silinder ühendatakse vaheldumisi kord katlaga, kord kondensaatoriga (auru-jahutajaga), mille juures kondensaatoriks võib olla ka välisõhk.



Joon. 119. Aurusilinder kolviga ja siibrikarbiga.

Aurumasina esialgse kuju täiustamine teostati silindri automaatse ühendamise teel vaheldumisi katla ja kondensaatoriga niinimetatud siibrikarbi abil.

Silindri külgseina tehakse kaks kanalit *e* ja *g* (joon. 119), mis suubuvad silindrisse äärtest. Kanali välised otsad on kaetud karbiga *D*, millesse tuleb veel kaks kanalit: *E*, mis ühendab karbi katlaga ja *O*, mis ühendab karbi kondensaatoriga. Karbi sees varva otsas, mis on ühenduses kolviga ja pannakse selle poolt liikuma, käib väike karbike *S*, mida

nimetatakse siibriks (aurujaotaja). Siiber saab üheaegselt katta ainult kahte kanalit: ühte silindriga ja teist kondensaatoriga ühenduses olevat. Joonisel 119 I kujutatud seisus läheb aur katlast kanali *e* kaudu silindri ülemisse ossa, kuna samal ajal on silindri alumine osa kanali *e* ja siibri kaudu ühenduses kondensaatoriga. Niipea kui silinder osutub kondensaatoriga ühenduses olevaks, saab rõhumine kolvile altpoolt väiksemaks rõhumisest ülaltpoolt ja kolb laskub alla. Erilise mehhanismi abil paneb kolb allalaskumisel siibri vastupidiselt liikuma. Kui kolb on täiesti alla jõudnud, siis avatakse auru tee silindrisse kanali *g* kaudu (seis II) ja siiber ühendab kanali *e* kaudu silindri ülemise osa kondensaatoriga. Nüüd on rõhumine ülalt väiksem kui alt ja kolb hakkab tõusma, viies oma liikumisega siibri alla. Kolvi ülemise seisu momendiks võtab siiber seisu I ja nähtus hakkab samas järjekorras korduma: aururõhk paneb kolvi translatoorselt edasi-tagasi liikuma. Varva, kepsu ja vända abil paneb kolb liikuma statsionaarse masina hooratta või veduri rattad, nagu teame seda VII klassi kursusest.

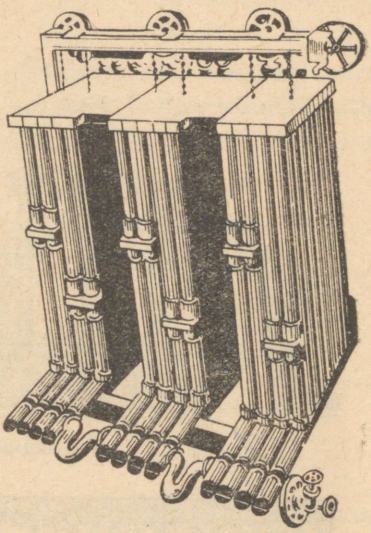
Hooratta pöörlemine antakse transmissiooni rihmadega edasi tööpinkide ratastele.

134. Watt'i aurumasina täiustamised. Eespool kirjeldatud aurumasin täidab oma ülesannet jõumasinana, kuid evib paljude kadude tõttu väikest kasutegurit. Viimase tõstmiseks on aurumasina ehitusel (põhiprintsiibi säilitamise juures) toodud sisse palju uuendusi.

1. *Ekonomaiser* (*eelsoojendi*). Veetorukatlas, millel on suurim aurutekitamisvõime, on korstna kaudu väljuvate gaaside temperatuur siiski veel umbes 250° ja seega viivad nad endaga kaasa kasutult teatud hulga soojust. Viimase ärakasutamiseks ei lasta gaase otse õhku, vaid enne läbi malm- või raudtorudest, mis asuvad erilises kambris. Läbi nende torude pumbatakse katla toitevett. Torusid läbiv vesi haara-

takse ümbertringi kuumadest küttegaasidest, soojendatakse umbes saja kraadini ja satub sellisel soojendatud kujul katlasse, millega ongi saavutatud kütuse kokkuhoidu katla kütmisel. Kamber koos torude kogumiga kannab ekonomaiseri nime.

Ekonomaiseri torud on näidatud joonisel 120 ja gaaside käik ekonomaiseris joonisel 121.



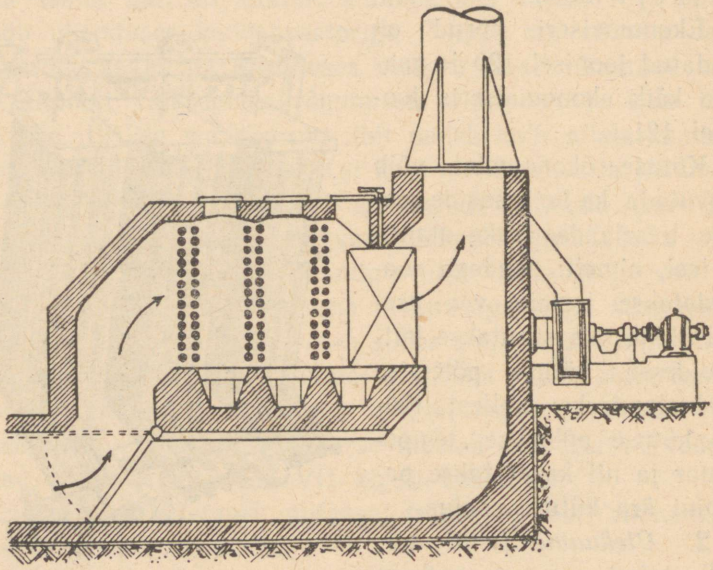
Joon. 120. Ekonomaiser.

Kütuse ökonoomiat võib saavutada ka heitgaaside soojuse teiselaadse ärakasutamise teel, nimelt: nendega soojendatakse torudes vee asemel õhku, mis surutakse küttekoldesse kütuse põlemise soodustamiseks: sellest tõuseb kütuse põlemise temperatuur ja nii kasutatakse paremini ära kütuse soojus.

2. *Ülekuumendatud aur.* Küllastatud aur, mis endaga auru tekkimisel veepiisku kaasa viib ja iga vähemagi temperatuuri langemise juures osaliselt veeldub, sisaldab alati endas kuni 20% (kaalult) vett, mis tarvitab küll enda jaoks soojust, kuid tööd ei tee. Selle kao kõrvaldamiseks tarvitatakse küllastatud auru asemel ülekuumendatud auru.

Ülekuumendatud aur saadakse küllastatud aurust tema edasise kuumendamise teel, mille juures auru seisundi muutumine toimub gaasilise oleku võrrandi järgi. Jahutamisel ei muundu ülekuumendatud aur mitte kohe vedelikuks, vaid annab enne ära soojuse, mis on kulutatud tema kuumutami-

seks. Peale selle on ta kergem küllastatud aurust, sellepärast on sama ruumalaga silindri täitmiseks vajalik kaalult väiksem hulk ülekuumendatud auru.

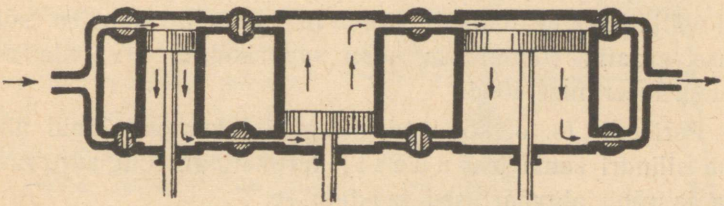


Joon. 121. Gaaside käik ekonomaiseris.

3. *Auru paisumine.* Kui katkestada auru juurdepääs silindrisse siibrikarbist enne kolvi jõudmist äärmisesse seisu, siis aur ikkagi jätkab kolvi liikumapanemist oma paisumise arvel. Sellest auru rõhk järk-järgult langeb ja kolvi liikumise kiirus hakkab langema (siis hakkab hooratas ära andma oma varemkogutud energiat, hoides seega kiirust muutumatuna). Kolvi tagasikäigul läheb äratöötanud „väljapigistatud" aur väiksema rõhuga ja väiksemal hulgal jahutajasse (kondensaatorisse) ja järelikult väheneb jahutajale äraantav masina tööks kasutu soojushulk.

Seda Watt'i poolt 1782. a. tarvitusele võetud täiustust nimetatakse auru p a i s u t a m i s e k s. Auru sisselaskmise katkestamist silindri käigu lõpuni nimetatakse auru *äralõikamiseks.* Auru äralõikamisel peab siiber katma kanalite suudmeid teistel momentidel kui ilma äralõikamiseta, millele vastavalt tema ehitus muutub.

4. *Mitmekordne paisumine.* Tulusam on teostada auru jahutamist katla temperatuurist jahutaja temperatuurini mitte korraga, vaid astmeliselt, viies teda läbi mitme silindri rõhu



Joon. 122. Kolmekordse paisumisega aurumasina skeem.

järkjärgulise langetamisega. Kui silindri tagasikäigul heitaur (madalama temperatuuri juures kui katlas, kuid kõrgema juures kui jahutajas) läheb algul teise silindrisse, kus ta paneb kolvi liikuma, ja ainult teisest silindrist läheb üle jahutajasse, siis nimetatakse sellist masinat k a h e k o r d s e p a i s u m i s e g a ehk k o m p a u n d m a s i n a k s[1], kolme või nelja silindri juures — k o l m e- v õ i n e l j a k o r d s e p a i s u m i s e g a m a s i n a k s (joon. 122).

Kuna iga paisumisega auru rõhk väheneb, siis tehakse selleks, et aur paneks kõikide silindrite kolvid ühesuguse jõuga liikuma, järgnevate kolbide pindalad niimitu korda suuremaks, kuipalju kordi rõhk on väiksem.

---

[1] Laialdast tarvitamist leidsid kompaundvedurid vene inseneride, eriti A. Borodini töö tulemusena.

135. Aurumasina indikaatordiagramm. Aurumasina töötavaks aineks on veeaur. Teatud auruhulk läheb kõrgrõhu all katlast silindrisse, paneb ülesurvega (võrreldes atmosfääri rõhuga) liikuma kolvi ja täidab silindris ikka suurema ja suurema ruumala, mille tõttu tema rõhk langeb. Kui oleks võimalik joonestada teatud mastaabis selle auru oleku muutumise graafikut, kus rõhk p on sõltuvuses ruumalast V, siis võiks selle graafiku järgi arvutada auru tööd paisumisel.

Kolvi tagasikäigu eel ühendub heitaur jahutajaga, tema rõhk langeb ja selle alandatud rõhu juures tehakse tema kallal väljatõukamise tööd. Rõhu ja ruumala vahelise sõltuvuse graafik võimaldaks kolvi tagasikäigul arvutada auru komprimeerimise tööd.

Perioodi (s. o. kolvi edasi-tagasi liikumise) lõpul ühendub silindri sama osa uuesti aurukatlaga ning auru ruumala ja rõhu algväärtused taastatakse.

Protsesse, milledes keha lõppseisund ühtib perioodiliselt tema algseisundiga, nimetatakse tsüklilisteks ehk ringprotsessideks.

Tsükliliste protsesside puhul on rõhu ja ruumala vahelise sõltuvuse graafikuks kinnine kõverjoon. Selle kinnise kõverjoonega piiratud pindala on *arvuliselt* võrdne auru paisumisel tehtud töö ja auru komprimeerimisel tehtud töö vahega, s. o. kokkuvõttes — *auru tööga ühe perioodi jooksul.*

Eespool ülesseatud eesmärgi saavutamiseks ehitas juba Watt riista, mis automaatselt joonestas graafiku — rõhu sõltuvuse kohta ruumalast ühe tsükli jooksul.

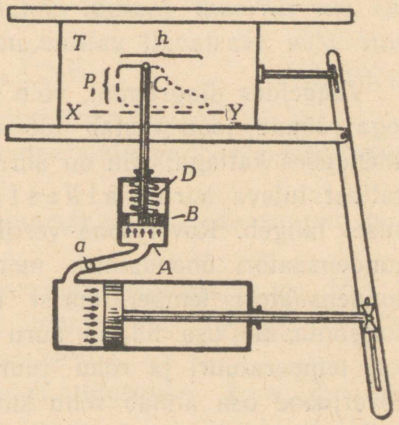
Riista nimetatakse indikaatoriks ja tema poolt joonestatavat kinnist kõverjoont — indikaatordiagrammiks.

Indikaator kujutab endast väikest silindrit A (joon. 123) kolviga B. Silindri A kolvialune osa ühendatakse toru a

kaudu aurusilindri ühe poolega. Torus on kraan, mis ühendab või lahutab mõlemate silindrite õõniseid. Indikaatori silindri kolb surub oma liikumisel ülespoole vedru *D* vastu. Selle kolvi väljaulatuva varva otsas on pliiats *C*, mis kirjutab jooni liikuvale plaadile (planšetile).

Aurusilindri varb paneb planšeti kangide abil sirgjooneliselt vastupidises suunas liikuma.

Kui toimub auru laskmine aurusilindrisse, siis tungib aur läbi torus avatud kraani *a* indikaatori silindrisse ja tõstab seal kolvi üles, surudes sellega vedru. Igale auru rõhumise väärtusele vastab isesugune vedru kokkusurumise aste ja järelikult ka teatud pliiatsinihkumise ulatus; pliiatsi ots kirjutab oma liikumise tee liikuvale planšetile. Masina tööperioodi jooksul saadakse joonisel kinnine kõverjoon. Kui sulgeda kraan *a*, siis joonestab pliiats atmosfääri rõhule vastava sirgjoone.



Joon. 123. Watt'i indikaatori ehituse ja töötamise skeem.

Kuidas kasutada seda diagrammi auru poolt ühe tsükli jooksul sooritatud töö arvutamiseks?

Kõigepealt peab indikaatori vedru olema kalibreeritud nii, et oleks teada, missugune surve vastab igale vedru kokkusurumise millimeetrile ja järelikult ka pliiatsi nihkumise igale millimeetrile. Siis saab ordinaadi pikkuse millimeetrite järgi teada rõhku $\frac{kG}{cm^2}$-tes.

Teiseks peab teadma kangi õlgade pikkuste suhet, et oleks võimalik arvutada, missugusele tegelikule ruumalale vastab iga abstsissi ühik diagrammis.

Kui on kindlaks tehtud mastaap, millega on joonestatud abstsissid ja ordinaadid, siis võib millimeeterpaberi või erilise mõõteriista — planimeetri abil mõõta kinnise kõverjoone poolt piiratud pindala.

Indikaatordiagrammi poolt piiratud pindala arvuline väärtus ühe perioodi jooksul annab aurumasina auru töö ühikute arvu (vastavalt valitud mastaabile).

Vaadeldes diagrammi, võib näha, et ülemine, abstsisstelejega rööpne joon vastab töö sellele osale, kus silinder on ühenduses katlaga; siin on aururõhk konstantne. Siis toimub katlast tuleva auru katkestamine ja auru rõhk paisumisel langeb. Kõverjoone vertikaalne osa vastab silindri ja kondensaatori ühendamise momendile ja rõhu langemisele kondensaatori temperatuurist tingitud suuruseni. Alumine, horisontaalne osa näitab auru komprimeerimist kondensaatori temperatuuri ja rõhu juures. Vasakpoolne vertikaalne kõverjoone osa annab rõhu suurenemise silindri ühendumisel katlaga kolvi äärmises seisangus.

Praegusel ajal ehitatakse täiuslikumat süsteemi indikaatoreid.

136. Aurumasina kasutegur. Aurumasin peab andma soojushulgast Q, mida ta katlast ühes auruga saab, soojushulga Q_1 kondensaatorile, kuhu läheb heitaur, *vites endaga kaasa soojust.*

Tuleb meeles pidada, et soojusmasina töötamise põhiliseks tingimuseks ei ole mitte üksi soojendajast teatud hulga soojuse saamine, vaid ka sellest ühe osa paratamatu edasiandmine kondensaatorile.

$$\eta_m = \frac{Q - Q_1}{Q} \qquad \text{(XVII)}$$

nimetatakse aurumasina kasuteguriks.

Teoreetiline arvutus näitab, et ideaalse masina jaoks, mis töötaks ilma hõõrdumiseta ning soojusjuhtivusest ja kiirgamisest tingitud soojuskadudeta ja kus töötavaks aineks oleks ideaalne gaas (§ 72), avalduks kasuteguri suurim väärtus järgmiselt:

$$\eta_m = \frac{T - T_1}{T}, \qquad \text{(XVIII)}$$

kus T on kolde absoluutne temperatuur ja T_1 — kondensaatori absoluutne temperatuur.

Mida suurem on temperatuuride vahe, seda suurem hulk soojust võib muutuda tööks.

Kui ideaalse gaasi temperatuur soojendajas on 150° C ($T = 423°$) ja kondensaatori temperatuur oleks $T_1 = 273°$, siis oleks ideaalse masina $\eta = 35\%$.

Kondensaatori temperatuuri tõusmisel kuni $T = 333°$ oleks $\eta = 21\%$.

Kõik tehnilised masinad annavad väiksema kasuteguri, kui saame valemi XVIII järgi arvutades.

Nüüdisaja masinates püütakse tõsta katla temperatuuri; kuna keemistemperatuur aga tõuseb rõhu kasvamisega, siis on tänapäeva katlaehituse probleemiks niisuguste katelde ehitamine, mis kannataksid väga suurt, üle 100 atmosfäärilist rõhku.

Mitte kogu töö, mida saab kolb, ei lähe võllile kasulikuks tööks; osa temast läheb kolvi, varda, ristpea liuguri, laagrite jts. hõõrdumise ületamiseks. Nende kadude suurus sõltub töötlemise kvaliteedist ja liikuvate osade kokkupaneku korralikkusest. Jõumasina poolt antud energiahulga suhet jõu-

masinasse sisseviidud energiahulgaga nimetatakse ökonoomiliseks kasuteguriks.

Aurumasina võimsus võllil kannab efektiiv-võimsuse nime.

Indikaatordiagrammi järgi arvutatud võimsus on indikaatorvõimsus.

Masina efektiiv-võimsuse suhet indikaatorvõimsusega nimetatakse mehaaniliseks kasuteguriks.

Ökonoomiline kasutegur on mitteliikuvates masinates 12—15%, liikuvates 6—8%.

137. Auruturbiinid. Kuna aurumasinate juures võlli ühe pöörde jooksul kolvi translatoorne liikumine kaks korda muutub nulliks, siis tunduv osa energiast kulub kolvi ja masina teiste võnkuvate osade inertsi ületamiseks. Võnkumised tekitavad suuri pingeid masinaosades ja kutsuvad välja kardetavaid vibratsioone masina kiire pöörlemise juures. Osade tugevuse tõstmiseks tuleb nad ehitada massiivsed, mis suuresti tõstab aurumasina raskust.

Tänapäeva tehnikas rakendatakse sagedamini auruturbiine, mis on vabad paljudest aurumasinate puudustest. Nendes puudub osade edasi-tagasi võnkuv liikumine, pöörlemine toimub palju kiiremini (meil tarvitatava standardi järgi 3000 pööret minutis), sellepärast on sama võimsuse juures auruturbiinide kaal palju väiksem kui aurumasinatel. Nad võtavad vähem ruumi ja on suurema kasuteguriga kui aurumasinad.

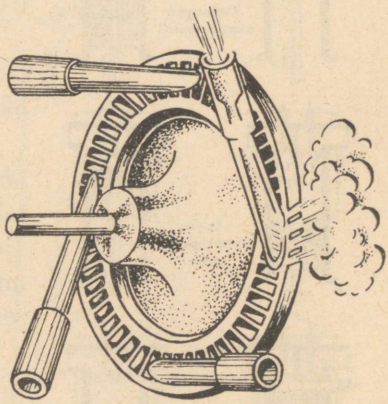
Auruturbiinid kasutavad ära auru kineetilise energia. Kui katlast lasta aur jahutajasse või otse õhku, siis ta voolab välja suure kiirusega. Kui suure kiirusega liikuv aur satub ratta labadele (joon. 124), siis tema kineetiline energia muundub ratta ja sellega ühenduses oleva võlli pöörlemise energiaks. Auru rõhu all pöörlev ratas moodustabki auruturbiini põhiosa.

Turbiinid praegusel kujul on lastud käiku XIX sajandi lõpul, ehkki nende töötamise printsiipi tunti juba vanal ajal (Heroni auruvurr, II s. enne meie ajaarvamist).

Praegusel ajal valmistatakse meie tehastes elektrijaamadele kõrgrõhu-turbiine, mis arendavad kuni 100 000 kilovatilist võimsust. Sellise võimsusega aurumasina ehitus on praktiliselt võimatu.

Elektrijaamade kõrval leidsid auruturbiinid laialdast rakendamist sõjalaevadel ja suurtel ookeanilaevadel võimsa ja vähe ruumi võtva jõumasina näol.

Turbiini ehituse viimaseks sõnaks on gaasiturbiinid, mis töötavad mitte auru, vaid vedela kütteaine põlemisel saadud hõõguvate gaaside joaga. Gaasiturbiinid võistlevad lennuasjanduses edukalt sisepõlemismootoritega.



Joon. 124. Auru käik auruturbiinis.

Soojusseadme kasuteguri suurendamiseks võib kasutada ka seda soojushulka, mis läheb jahutajasse.

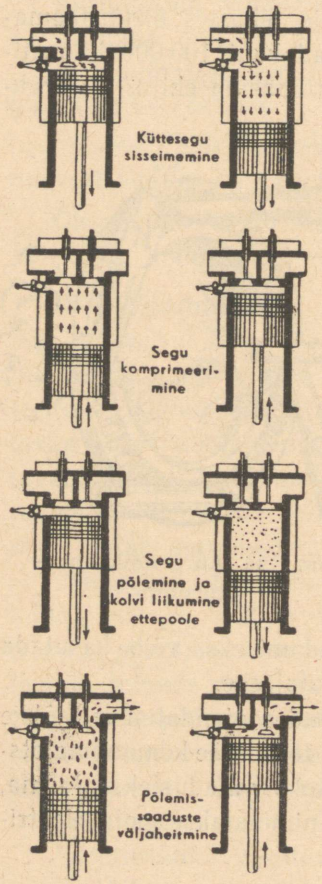
Selle asemel, et lasta aurust saadud soojendatud vett jõkke või järve, teda suunatakse veekütte torudesse kommunaalotstarbeks või kasutatakse ära tööstuslikeks vajadusteks. Jaama, mis kasutab ära „soojuse ülejääke", nimetatakse soojuselektritsentraaliks (ТЭЦ) [1].

Ta varustab tarbijaid mitte ainult mehaanilise töö arvel saadud elektrienergiaga, vaid ka soojusega. ТЭЦ leiab laialdast kasutamist meie sotsialistlikus majanduses.

---

[1] ТЭЦ — теплоэлектроцентраль.

138. Sisepõlemismootorid. Aurumootori küttekoldes ja katlas läheb tunduv osa energiast kaduma. Selle kao vältimiseks hakati kütust põletama masina enda silindris. Jõumasinaid, kus kütuse põletamist teostatakse silindris, nimetatakse *sisepõlemismootoreiks*.



Joon. 125. Sisepõlemismootori neli takti. Joonise vasakpoolne osa vastab takti algusele, parempoolne tema lõpule.

Kõige levinuma gaasimootori leiutas *Otto* (1861) ja vedelkütusemootori *Diesel* (1897).

Otto mootori printsiibist võib kõige paremini aru saada neljataktilise mootori analüüsi kaudu (joon. 125); joonise vasakpool annab pildi taktide algusest, parempool nende lõpust.

Esimene takt seisab kolvi liikumises välise jõu abil; õhu hõrenemise tagajärjel kolvi peal toimub põleva segu sisseimemine silindrisse sisselaskva klapi (ventiili) kaudu.

Teises taktis lükatakse kolb välisjõu poolt silindrisse, segu komprimeeritakse ja selle tagajärjel ta soojeneb (komprimeerimise algul $t = 125^0$, lõpul $t = 600^0$).

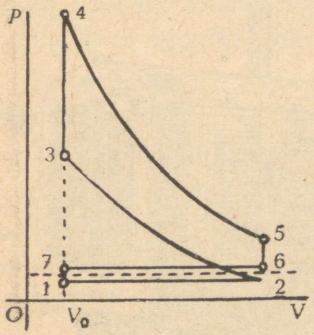
Teise takti lõpul tekitatakse elektrisädemega segu süttimine 1500^0 temperatuuri juures. Gaasi temperatuuri tõusmisega kasvab ka rõhk, mis tõukab kolbi, mis omakorda paneb vända abil pöörlema

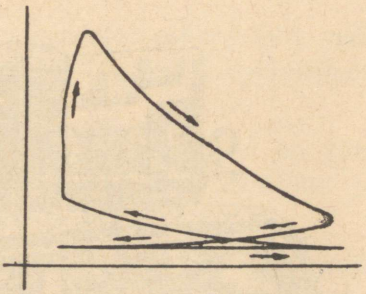
võlli. Kolvi liikumine moodustab kolmanda takti, mis osutub „töötaktiks".

Võlli pöörlemise jätkumine inertsi tõttu toob kolvi tagasi ja heidab välja põlemise produktid (neljas takt).

Võlli pöörlemise inerts kutsub esile järgnevad taktid (esimese ja teise) ja nii teostub katkestamatu pöörlemine.

Otto mootori kasutegur on 25—28%.





Joon. 126 ja 127.

Dieseli mootor (diiselmootor) töötab vedelkütusega — naftaga ja raskete õlidega; kolmandas taktis pritsitakse pihustatud vedelkütus soojendatud õhku; selles ta põleb ära ja annab tõuke kolvile.

Diiselmootori kasutegur ulatub kuni 35%.

Kõrge kasuteguri kõrval evivad sisepõlemismootorid katla ärajäämise tõttu järgmisi paremusi, võrreldes aurumasinatega: väiksemat kogu, kiiremat käivitamist ja väiksemat ohtu.

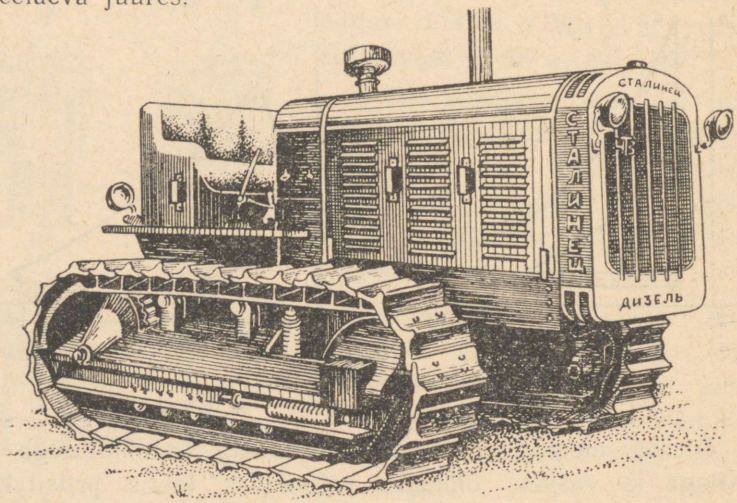
Otto mootori indikaatordiagrammi skeem ja tõeline indikaatordiagramm on antud joonistel 126 ja 127.

139. Sisepõlemismootorite rakendamine. Kõrge kasuteguri ja muude eeliste tõttu leiavad diiselmootorid laialdast raken-

damist väikestes vabrikute-tehaste jõujaamades, kust nad tõrjuvad välja aurumasinaid.

Sisepõlemismootorite peamiseks rakendusalaks on transpordivahendite mitmesugused liigid.

Selle mootori kergus (kuni 0,5 kg 1 HJ kohta), suur võimsus (2—2,5 tuhat HJ) ja kiire käivitamise võimalus teevad sisepõlemismootori asendamatuks auto, lennuki ja allveelaeva juures.



Joon. 128. Linttraktor.

Eriti tähtsat osa etendavad mootorid tänapäeva sõjatehnikas.

Nõukogude armee mehhaniseeritud ja motoriseeritud väeosad, kes purustasid fašistlikud jõugud Suures Isamaasõjas 1941.—1945. a., on varustatud paljude tuhandete masinatega — autodega, traktoritega, puksiirautodega, tankidega ja iseliikuvate suurtükkidega.

Meie maal on laialt tuntud konstruktorite Klimovi, Mikulini ja Švetsovi nimed, kelle mootoritega on varustatud meie

lennukid. Meie leidurite poolt projekteeritud ja meie tehastes ehitatud sajad tuhanded mootorid kindlustasid meie armeele ülekaalu kiidetud saksa tehnika üle ja aitasid suuresti kaasa maailma-ajaloolise võidu saavutamiseks fašismi üle.

Hiiglasuurt osa mängib sisepõlemismootor ka meie maa ja tema ääretute avaruste rahulikus elus. Autotransport ja lennuasjandus, mis nii hoogsalt arenesid stalinlike viisaastakute jooksul loodud tööstuslikul baasil, on sügavalt juurdunud meie igapäevasesse ellu.

Erilist tähtsust evib sisepõlemismootori rakendamine meie põllumajanduses. Traktor ja auto tekitasid revolutsiooni põllunduse mahajäänud tehnikas.

Kollektiviseerimise ja mehhaniseerimise alusel on küla sotsialistliku ümberkorraldamise grandioosne poliitiline ja majanduslik ülesanne lahendatud.

Dieseli sisepõlemismootoreid hakatakse kasutama ka raudtee- ja veetranspordis. Diiselmootoritega varustatud vedureid nimetatakse diiselveduriteks. Diiselvedurite suureks eeliseks auruveduritega võrreldes on nende suur ökonoomsus. Diiselvedur ei kuluta kütteainet seisu ajal, evib suurt kasutegurit ja tarvitab palju vähem vett kui auruvedur. Seepärast on eriti tulus kasutada diiselvedureid maa veevaestes rajoonides.

Laevu, mida pannakse liikuma diiselmootoritega nimetatakse diiselmootorlaevadeks. Neid ehitatakse alates väikestest puksiirlaevadest kuni hiiglasuurte ookeani liinilaevadeni. Väikesi kutreid ja mootorpaate varustatakse harilikult auto tüüpi petroolimootoritega.

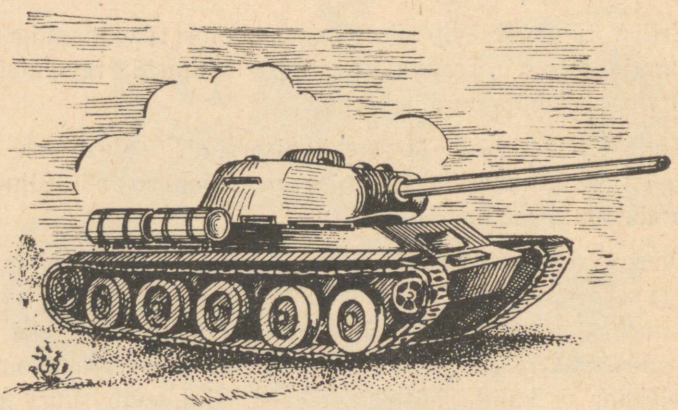
Lõpuks võrdleme tulirelva sisepõlemismootoriga.

76 mm kahuri kasutegur võrdub 33%-ga. Järelikult seisab niisugune kahur oma ökonoomsuse poolest kõige täiuslikumate sisepõlemismootorite lähedal.

Püssirohu plahvatusest saadud energiast heidetakse 40% 76 mm kahuri torust välja koos temast väljalendavate soojendatud gaasidega.

Kahuri enda soojendamiseks läheb 22%, gaaside liikumisele ja tagasipõrkele kulub 5%.

Kasulikult kulutatud energiast muundub 32,8% mürsu liikumapanemise, 0,2% aga mürsu pöörlemapanemise energiaks. Laengu püssirohust saadud energia on 338 000 kGm.



Joon. 129. Tank.

Võrdluseks toome põletusaine poolt antava energia jaotuse lennuki mootoris. 58% läheb kaduma väljalaskeklappide kaudu ja silindri seintest kiirgamise teel. Segu komprimeerimisele kulub 12% ja mehaanilise kao peale 4%. Ainult 26% läheb kasuliku töö peale — propelleri pöörlemapanemisele.

140. Külmutusmasin. Külmutustehnika leiab laialdast rakendamist rahvamajanduses. Toiduainetetööstuses ja raudteetranspordis tarvitatakse kergesti riknevate produktide

vedamisel nende säilitamiseks jääd, mida saadakse kunstlikul teel külmutusmasinate ab.

Peale selle kasutatakse jahutamist laialdaselt ka keemiatööstuses. Mäeasjanduses tarvitatakse mõnedel juhtudel šahtide ehitamisel maa külmutamise võtet. (Moskva metroo tunnelite ehitamisel.) Kunstsiidi ja kunstkautšuki tootmine, kääramise ning suhkru- ja seebikeetmise tööstusharud, parfümeeria, fotoplaatide tootmine, nahkade ja raviseerumite säilitamine — kõik see nõuab kunstlikku jahutamist.

Sõjalaevadel ehitatakse erilisi seadmeid, mille ülesandeks on kindla temperatuuri hoidmine püssirohukeldrites. Lõpuks kasutatakse kunstlikku jääd laialdaselt koduses majapidamises — jahutuskappides.

Millel põhjeneb siis külmutusmasina ehitus? Soojusmasinas toimub töö soojuse üleminekul soojendajast jahutajasse. Külmutusmasinas saadakse külma, s. o. soojuse äravõtmist mehaanilise energia või soojuse kulu arvel. Külmutusmasin koosneb järgmistest põhiosadest: a) aurustajast, milles vedel aine, muutudes auruks, võtab ümbritsevast keskkonnast soojust ja kutsub seega esile jahenemise; b) kompressorist, milles toimub tarvitatava aine aurude rõhu suurenemine, s. o. nende komprimeerimine, milleks kulutataksegi tööd väljastpoolt; c) kondensaatorist, milles jaheneva vee mõjul komprimeeritud aurud muunduvad vedelikuks. Temast saadud vedelik läheb uuesti aurustajasse.

Vaatleme külmutusprotsessi masina juures, milles töö aineks on ammoniaak. Kompressor surub ammoniaagi aurusid 12 kG/cm² rõhu all spiraaltorusse — kondensaatorisse. Komprimeerimisel ammoniaagi aurud soojenevad. Need jahutatakse läbivoolava veega paagis, kusjuures vesi kujutab endast seda keha, mis saab soojust.

Kondensaatoris muutuvad ammoniaagi aurud vedelikuks. Kondensaatorist läheb ammoniaak teise spiraaltorusse — aurustajasse, kus rõhk on umbes 3 kG/cm². Aurudes võtab

ammoniaak aurumiseks vajaliku soojuse aurustajat ümbritsevast soolalahusest, mis jaheneb umbes kuni —8°-ni. Niisiis annab soolalahus soojuse ära. Kunstlik jää saadakse, kui hoitakse veega täidetud metallkarbid soolalahuses.

Teisteks otstarveteks suunatakse jahutatud lahust torude kaudu jahutatavasse ruumi.

Niisiis, et teostada *soojuse edasiandmist külmalt kehalt soojale, peab tööd sooritama välise jõu abil.* Soe keha saab sealjuures mitte ainult seda soojust, mis on äravõetud külmalt kehalt, vaid samuti ka seda, mida saadakse sooritatud tööst.

Harjutus 13.

1. Auru keskmine rõhk kahepoolse tegevusega aurumasinas on võrdne 2,175 kG/cm² (võib võtta 2). Kolvi diameeter $D = 49$ cm; kolvi varva diameeter D_1 võrdub 6,5 cm. Kolvi käik $L = 100$ cm. Mehaaniline kasutegur $\eta = 0{,}85$. Leida 150 pöörde juures minutis masina võimsus N.

Vastus: 21 HJ.

2. Kui suure hulga naftat peab aurukatla küttekoldes 1 tunni jooksul ära põletama, et saada 800 kg ülesoojendatud auru 12 at rõhu ja 280°-se temperatuuri juures, kui toitevee temperatuur on 15°, keemistemperatuur 12 at juures on 186,9°, keemissoojus võrdub 478,2, ülesoojendatud auru erisoojus on 0,5, nafta küttevääртus on 10 000 ja kasutegur 0,75?

Vastus: ≈ 75 kg.

3. Arvutada 1800 mm diameetriga ja 7500 mm pikkusega silindrilise katla küttepind, kui põlemisproduktid ei soojenda katelt mitte ainult väljastpoolt, vaid läbivad teda ühe 1050 mm diameetriga leektoru kaudu. Soojuse äraandmisest võtavad osa 0,5 katla külgpindalast ja 0,9 leektoru pindalast (miks mitte kogu pindalad?)[1].

Vastus: 43,4 m².

---

[1] Ülesanded 1—3 on võetud raamatust: Л. Е. Левинсон, Машиноведение.

4. Katse, mis tehti 12 at rõhu ja 380° auru temperatuuri juures töötava reisijaterongi auruveduriga, näitas auru kulu 12,5 kg 1 HJ kohta 1 tunnis. Määrata veduri kasutegur. (Andmed võtta ülesandest nr. 2.)

5. Kui suure võimsusega ühesilindrilist aurumasinat võib toita 2200 mm diameetriga ja 8500 mm pikkusega katel, kui teda läbistab üks leektoru diameetriga 885 mm ja kui masin kulutab 11,1 kg auru 1 HJ kohta 1 tunnis, ja kui katel suudab anda auru 20 $\frac{kg}{m^2\ tund}$ (Andmeid soojuse äraandmisest katla pinna poolt võtta 3. ülesandest.)

Vastus: ≈ 70 HJ.

6. Millega võrdub auru kilogrammide hulgaga mõõdetav nafta aurutootlikkus, mida saadakse 1 kg kütuse põletamisel, kui katla kasutegur on 70% ja kui ta annab küllastavat auru 12 at rõhu juures? (Ülejäänud andmed võtta eelmistest ülesannetest.)

7. 1 HJ-tunni töö saamiseks oli vaja leppekütust:

1820. a. — 12 kg	1860. a. — 2 kg	1920. a. — 0,93 kg
1830. a. — 5 kg	1880. a. — 1,4 kg	1925. a. — 0,57 kg
1840. a. — 2,5 kg	1900. a. — 1,2 kg	

Arvutada, kuidas suurenes aastate jooksul aurumasinate täiustamisega nende kasutegur.

8. Leida 76 mm-se 1902. a. mudeli kahuri kasutegur, kui mürsu kaal on 6,5 kG, algkiirus 568 $\frac{m}{sek}$, püssirohu laeng 0,88 kG, püssirohu küttevääртus 900 $\frac{cal}{tund}$.

Vastus: $\approx 34\%$.

9. Leida vintpüssi kasutegur, kui kuuli mass on 9,6 g, kuuli väljalendamise kiirus on 880 $\frac{m}{sek}$, püssirohu kaal 3,2 g ja püssirohu küttevääртus 900.

10. Arvutada vintpüssi ja 76 mm-se kahuri võimsus eelmistest ülesannetest, kui vintpüssi lasu kestus on 1,680 sek. ja kahuri oma — 0,01 sek.

KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Millised on auruga töötavate masinate liigid?
2. Kuidas on ehitatud aurukatelde küttekolle? Kui suur on soojuse kadu temas?
3. Kuidas töötab aurumasin?
4. Millises suunas on toimunud aurumasina täiustamine?
5. Kuidas võib mõõta gaasi paisumise tööd gaasi oleku graafiku järgi?
6. Kuidas saadakse indikaatordiagramm ja milline on tema tähtsus?
7. Millel põhjeneb auruturbiini ehitus?
8. Missugune on aurumasinate soojuslik, ökonoomiline ja mehaaniline kasutegur?
9. Mis kutsus välja sisepõlemismootorite leiutamise?
10. Milline on sisepõlemismootorite ehituse printsiip?

Kirjandus. Каменщиков, Паровые машины, паровые турбины и двигатели внешнего сгорания. Лопатин, Победа пара. Питман, Завоевание огня. Васильев, Дюрнбаум, Столетие первого пассажирского поезда. Бизюкин, На железнодорожной станции. Вейс, Двигатели внутреннего сгорания. Лукашевич, Как устроен автомобиль. Кузнецов, Современный самолет. Джибсон, Великие изобретения. Доминик, В волшебном мире техники. Рымкевич, Гиганты техники. Рымкевич, Труд и техника. Бонд, Герои техники. Силы природы, изд. „Сеятель", под ред. Петровского. Гюнтер Ганс, Технические мечтания. Григорьев, Паровоз. Лебединский, Элементарное учение об энергии. Леман, Энергия и энтропия. Мостицкий, Машина в колхозе. Данилевский В. В., проф., Творец паровой машины Ползунов, 1947, 16 стр. Иерусалимский А. М., Автомобиль, 1934, 43 стр. Житков Борис, Сила трактора, 1936, 61 стр. Гумилевский Лев, Железная дорога, 1943, 354 стр. Ильяшенко С. М., Быстрее звука (о реактивных двигателях), 1947, 48 стр. Кузнецов Б. В., Беседы о машинах, 1934, 207 стр. Микони, Сверхвысотные полёты, 1933, 112 стр. Шпанов, Ник., Джемс Уатт, 1936, 167 стр. Никольский В., Фультон — „отец парохода", 1937. Данилевский В. В., Русская техника, 1947. Гумилевский, Русские инженеры, 1947.

Tabel 1.

Tahkete kehade soojuslikud konstandid.

Kehad	Joon-paisumise koefitsient	Eri-soojus	Sulamis-temperatuur	Sulamis-soojus	Keemis-temperatuur normaalse rõhu juures
Alumiinium	0,000024	0,21	658	80	1800
Volfram	0,000004	—	3000	—	—
Raud	0,000012	0,11	1520	49	2450
Teras	0,000011	0,11	1300—1400	—	—
Kuld	0,000014	0,03	1064	16	—
Valgevask	0,000019	0,09	ligik. 900	—	—
Vask	0,000017	0,09	1084	42	2300
Nikkel	0,000013	0,11	1452	60—70	—
Inglistina	0,000023	0,06	232	14	—
Plaatina	0,000009	0,03	1764	27	—
Seatina	0,000029	0,03	327	5	—
Hõbe	0,000019	0,05	961	24	—
Tsink	0,000029	0,094	419	28	—
Klaas	0,000009	0,19	800—1400	—	—
Jää	—	0,5	0	80	—
Parafiin	—	—	54	35	300
Naftaliin	—	—	80	36	218

Tabel 2.

Vedelikkude soojuslikud konstandid.

Kehad	Ruum-paisumise koefitsient	Eri-soojus	Sulamis-temperatuur	Keemis-temperatuur	Keemis-soojus
Piiritus	0,001	0,58	—114	78	202
Vesi	0,00018	1	0	100	539
Petrool	0,001	0,51	—	~170—260	~75
Elavhõbe	0,00018	0,033	—38,9	357	68
Eeter	0,00166	0,56	—123,6	35	90
Linaõli	—	—	—	316	—

Tabel 3.

Gaaside erisoojus.

(Konstantse rõhu juures.)

Õhk	0,24	Lämmastik . . .	0,25
Hapnik	0,22	Vesinik	3,41

Tabel 4.

Õhu relatiivse niiskuse psühromeetriline tabel.

(Võetud A. Batšinski füüsikotehniliste tabelite käsiraamatust nr. 55.)

Kuiva termomeetri näitamine kraadides	Kuiva ja niiske termomeetri näitamiste vahe										
	0^0	1^0	2^0	3^0	4^0	5^0	6^0	7^0	8^0	9^0	10^0
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

Näide. Näidaku kuiv termomeeter 22^0, niiske — 16^0; seega on näitamiste vahe 6^0. Siis on relatiivne niiskus (protsentides) 20^0-ga algava rea ja 6^0-ga algava veeru lõikekohas. Antud juhul on relatiivne niiskus 54%.

SISUKORD.

I. Võnkumised ja lained.

Lk.

1. Harmooniline võnkumine 3
2. Võnkumist määravad suurused 6
3. Võnkliikumise seos ringliikumisega 6
4. Harmoonilise võnkumise graafik 9
5. *Laboratoorne töö 1.* Pendli võnkumise seaduste uurimine . 9
6. Pendli võnkumise seadused 10
7. Füüsiline pendel 11
8. Pendli rakendamine kellade juures 12
9. Pendli rakendamine raskuskiirenduse mõõtmiseks 13
   Harjutus 1 13
10. Elastsete kehade võnkumine 13
11. Võnkumise levimine elastses kehas 15
12. Ristvõnkumine 16
13. Pikivõnkumine 18
14. Laine pikkus 19
15. Lainete peegeldumine ja murdumine 20
16. Lainete interferents 21
17. Seisev laine 23
18. Resonants 26
19. Resonantsinähtus ja tehnika 27
    Kontrollküsimusi 28
20. Hääl 29
21. Toon. Tooni valjus ja kõrgus. Sireen 31
22. Hääle laine peegeldumine 34
23. Häälelainete interferents 35
24. Tuiklemised 35
25. Keha omatoon 35
26. Keha põhitoon 36
27. Ülemtoonid 38

Lk.
28. Tämbr 38
29. Heli resonants 38
30. *Laboratoorne töö 2.* Hääle kiiruse mõõtmine mitmesugustes ainetes 39
31. *Laboratoorne töö 3.* Hääle lainepikkuse määramine resonantsi abil 41
32. Grammofon 41
33. Ultrahääled 42
34 Müra kahjulik tegevus 43
35. Hääle nähtuste kasutamine sõjatehnikas 43
Harjutus 2 46
Kontrollküsimusi 47

II. Soojus ja molekulaarfüüsika.

1. Soojus kui energia.

36. Soojuse õpetuse areng 49
37. Soojushulga ühik 51
38. Aine erisoojus 52
39. Soojushulga valem soojendamisel ja jahtumisel 52
40. Soojusliku tasakaalu võrrand 53
Harjutus 3 57
41. Soojus ja töö 58
42. Soojuse mehaaniline ekvivalent 60
43. Soojuse mehaanilise ekvivalendi määramine Joule'i pool . 62
44. Energia muundumise ja jäävuse seaduse rakendamine soojusnähtustes 63
45. *Laboratoorne töö 4.* Keha erisoojuse määramine 66
46. *Laboratoorne töö 5.* Tugevasti kuumendatud keha temperatuuri määramine kalorimeetrilisel viisil 68
47. Soojuse allikad 69
48. Kütuse ja toidu soojusväärtus 74
Harjutus 4 75
Kontrollküsimusi 77

2. Kehade paisumine soojenemisel.

49. Keha joon- ja ruumpaisumine 78
50. *Laboratoorne töö 6.* Tahke keha joonpaisumise koefitsiendi mõõtmine 79
51. Tahkete kehade joonpaisumise koefitsiendi valem 81

Lk.
52. Mistahes temperatuuri juures võetud keha pikkuse valem . 82
53. Keha ruumpaisumise koefitsiendi valem 83
54. Mistahes temperatuuri juures võetud keha ruumala valem 84
55. Keha tiheduse muutumine temperatuuri muutumisega . . 85
56. Soojuspaisumise ärakasutamine tehnikas 86
Harjutus 5 87
Kontrollküsimusi 89

III. Molekulaarsed nähtused gaasides, vedelikkudes ja tahketes kehades.

1. Molekulaar-kineetilise teooria alused.

57. Molekul 90
58. Keha molekulid on eraldatud üksteisest vahedega . . . 92
59. Kohesioon 93
60. Difusioon 96
61. Browni molekulaarliikumine 98
62. Molekulaar-kineetiline teooria 100
63. Soojusliku oleku seletus molekulaar-kineetilise teooria abil 100
Kontrollküsimusi 104

2. Gaaside omadused.

64. Gaaside õpetuse arenemine 104
65. *Laboratoorne töö 7.* Jääva temperatuuriga ja ühe ja sama massiga gaasihulga ruumala ja rõhu vahelise seose (Boyle-Mariotte'i seaduse) tuletamine 105
66. Boyle-Mariotte'i seadus 107
67. Ruumala ja rõhu sõltuvuse graafik 110
68. Gaasi tiheduse sõltuvus rõhust 111
68-a. Ülesannete lahendamine Boyle-Mariotte'i seaduse põhjal 112
69. Gay-Lussac'i seadus 112
70. *Laboratoorne töö 8.* Õhu ruumpaisumise koefitsiendi määramine 114
71. Gaaside rõhumise termiline koefitsient 115
72. Ideaalne gaas 117
73. Gaasitermomeeter 118
74. Absoluutne temperatuur 118
Harjutus 6 119
75. Gaasi oleku valem 119
Harjutus 7 122
76. Gaasi molekulaar-kineetiline teooria 124

Lk.
77. Gaasi gramm-molekul ja molekulide arv selles 127
78. Gaaside omaduste tehniline rakendamine 128
Kontrollküsimusi 130

3. Vedelikkude omadused.

79. Vedeliku pinna kuju väliste tungide toimel 130
80. Vedeliku pinnakiht 131
81. Vedelikkude kokkusurutavus 134
82. Pinnakihi potentsiaalne energia. Pindpinevus 134
83. Katsed, milles avalduvad pindpinevuse omadused . . . 136
84. Märgamine 139
85. Menisk 140
86. Pinnarõhu sõltuvus meniski kujust 142
87. Kapillaarsus 143
88. *Laboratoorne töö 9.* Pindpinevuse suuruse määramine . . 146
89. Vedeliku molekulaar-kineetiline teooria 147
Harjutus 8 147
Kontrollküsimusi 148

4. Tahke keha omadused.

90. Kristalliline olek 148
91. Amorfsus 150
92. Kristalli ruumvõre 152
93. Deformatsioon 155
94. Deformatsiooni suuruse sõltuvus deformeerivast jõust . . 158
95. Sitkus, rabedus, plastilisus 160
96. Lubatud pinge 162
97. Hooke'i seadus 162
98. *Laboratoorne töö 10.* Deformatsiooni suuruse ja deformeeriva jõu suuruse vahelise sõltuvuse uurimine 164
99. Energia muundumine deformatsioonide juures 165
100. Tahke keha molekulaar-kineetiline teooria 165
Harjutus 9 166
Kontrollküsimusi 168

IV. Aine agregaatoleku muutumine.

1. Sulamine ja tahkestumine.

101. Sulamise ja tahkestumise temperatuur 169
101-a. Vedeliku ülejahutamine 171
102. Sulamissoojus 172

Lk.
103. Soojusliku tasakaalu võrrand sulamisel või tahkestumisel . 173
104. Keha ruumala muutumine sulamisel ja tahkestumisel . . 174
105. Rõhu mõju sulamispunktile 175
106. *Laboratoorne töö 11.* Jää sulamissoojuse määramine . . . 175
Harjutus 10 176
Kontrollküsimusi 177

2. Auru tekkimine.
107. Auru tekkimine 178
108. Aurumine 178
109. Aurumise seletamine molekulaar-kineetilise teooria abil . 179
110. Aurumissoojus 180
111. Auru ruumala ja rõhu vaheline sõltuvus konstantsel temperatuuril 182
112. Küllastava auru rõhu sõltuvus temperatuurist 184
113. Daltoni seadus 187
114. Keemine 188
115. Soojusliku tasakaalu võrrand auru tekkimisel ja kondenseerumisel 191
116. *Laboratoorne töö 12.* Keemissoojuse määramine kalorimeetri abil 192
117. Mitteküllastavate aurude küllastavateks muutmise viisid . 193
118. Kriitiline temperatuur 194
119. Gaaside veeldamine 195
120. Madalate temperatuuride saamise viisid 196
121. Vedelate gaaside kasutamine 198
Harjutus 11 200
Kontrollküsimusi 200

3. Õhu niiskus.
122. Õhu niiskus 201
123. Kastepunkt 203
124. Hügromeeter 203
125. Psühromeeter 205
126. Juushügromeeter 205
Harjutus 12 206
Kontrollküsimusi 207

V. Gaasi ja auru töö.
127. Gaasi töö jääva rõhu juures 208
128. Gaasi paisumise töö graafik 209

Lk.
128-a. Gaasi töö muutuva rõhu juures 210
129. Aurujõu-masinad 211
130. Küttekolle 212
131. Katel 215
132. I. Polzunovi ja J. Watt'i aurumasin 217
133. Aurusiiber 220
134. Watt'i aurumasina täiustamised 222
135. Aurumasina indikaatordiagramm 226
136. Aurumasina kasutegur. 228
137. Auruturbiinid. 230
138. Sisepõlemismootorid. 232
139. Sisepõlemismootorite rakendamine 233
140. Külmutusmasin 236
Harjutus 13 238
Kontrollküsimusi 240
Lisad 241

Tõlkinud M. Usai
Vastutav toimetaja R. Kalling.
Keeleline toimetaja J. Pedari.

Ladumisele antud 1. II 1949. Trükkimisele antud 4. IV 1949. Trükiarv 6000. Paber 56 × 79, 1/16. Trükipoognaid 15,5. Trükitähti trükipoognas 36.753. Arvutuspoognaid 14,2 MB-00193. Trükikoda „Hans Heidemann", Tartu, Vallikraavi 4. Tellimise nr. 360.

На эстонском языке.
И. И. Соколов. Физика. Для VIII класса.

Rbl. 6.—

A
17355

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00816021 2