

PROF. I. SOKOLOV



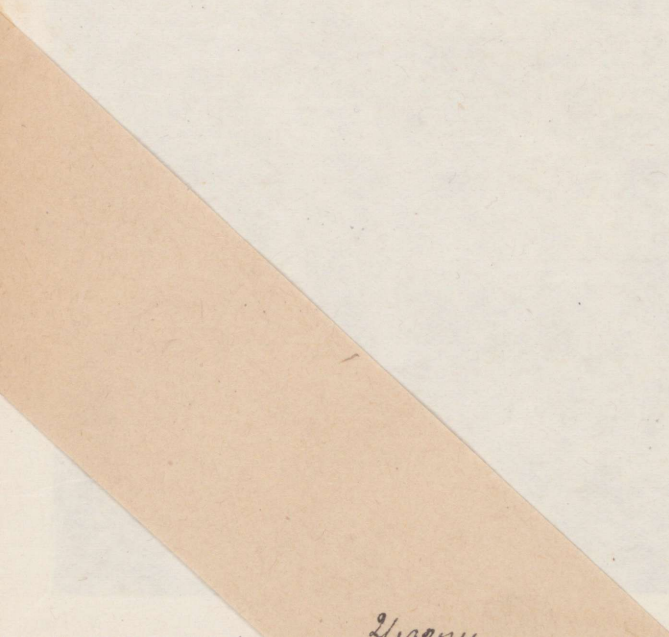
FÜÜSIKA



KLASSILE

EESTI RIIKLIK KIRJASTUS

717



21000

A-19407

PROF. I. SOKOLOV

FÜÜSIKA

VÖNKUMISED JA LAINED. SOOJUS

ÕPIK KESKKOOLI IX KLASSILE



EESTI RIIKLIK KIRJASTUS

TALLINN 1952

Originaali tiitel: Проф. И. И. Соколов. Курс физики. Часть вторая. Колебания и волны. Теплота. Учебник для 9-го класса средней школы. Учпедгиз, Москва 1950.

Kinnitatud Eesti NSV Haridusministeeriumi poolt 15. II 1952.

2

Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu

19374.



I. Võnkumised ja lained.

1. Harmooniline võnkumine. Teiste varem õpitud liikumislükkide kõrval esineb sagedasti võnkliikumine.

Keha võngub, kui ta liigub sirgjoont või kaart 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 võnkuma. Kõik vedrudega varustatud sõidukid hakkavad võnkuma tõugete tõttu tee konarustel. Võngub puuks, kui sellelt lendab ära lind. Tuule mõjul võnguvad puud, vabrikute korstnad, järvede ja merede veed. Võnkuvaks oleksid kõik helisevad kehad. Võngub ka töötava aurumasina kolb. Kuigi toodud näidetega pole haaratud kaugelki kõiki võimalikke võnkumislükkide, tõestavad needki, kuidas levinud on selline liikumise liik looduses ja tehnikas.

Suurusi, mis iseloomustavad seda liikumist, võib kõige paremini tundma õppida matemaatilise pendli võnkumise juures.

Matemaatiliseks pendliks nimetatakse mitteveniva niidi otsa riputatud keha, millel on lõplik mass, kuid mille mõõdetud võime tähele panemata jätta (niinimetatud «masspunkt»). Küllaldase täpsusega matemaatiliseks pendliks on pika peenikese niidi otsa riputatud väike kerake.

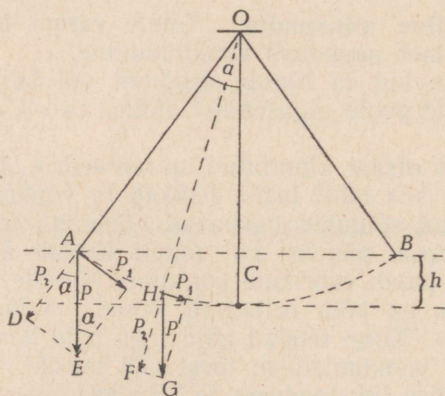
Seni kui pendel ja tema kinnituspunkt asuvad ühel vertikaalil, on pendel tasakaalus. Kui pendel viiakse välja tasakaalu-asendist mööda kaart CA punkti A , mis vertikaali mööda mõõdetult asub endise nivoo suhtes kõrgusel h (joon. 1), siis tal on selles punktis potentsiaalse energia juurdekasv $Ph = mgh$, kus m on pendli mass. Selles punktis ei ole pendli kaal P enam 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, on liikumapanevaks jõuks ja paneb pendli liikuma, niipea kui see on jäetud omapead.

Kui pendli hälbe nurk AOC tähistada α -ga (radiaanides¹), siis $\angle DAE = \angle AEH = \alpha$ ja liikumapanev jõud $P_1 = P \sin \alpha = mg \sin \alpha$.

¹ Radian — kesknurk, millele vastav kaar on võrdne raadiusega.

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

Kui pendel kaldub tasakaalu-asendist paremale, siis kiirenduse vektor on suunatud vasakule poole; kui aga pendel kaldub vasakule, siis on kiirenduse vektor suunatud paremale poole. Võnku-



Joon. 1. Matemaatiline pendel.

mise juures on punkti nihkumine tasakaaluasendist ja kiirendus alati vastupidiselt suunatud; sellepärast on neil vastupidised märgid. Arvestades märke, tuleb eelmised võrdused kirjutada nii:

$$P_1 = mg_1, \text{ kus } g_1 = -\frac{g}{l} x. \quad (I)$$

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

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 poole, s. o. vastupidiselt kiirusele; liikumine kujuneb aeglustuvaks ja kiirus muutub nulliks, kui pendli kogu kineetiline energia on muundunud tõusu potentsiaalseks ener-

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

Liikumist, mille kiirendus on võrdeline masspunkti hälbeiga 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 hälvet tasakaalu-asendist AC (joon. 1) nimetatakse võnkeamplituudiks. Aega, mille jooksul pendel käib mööda kaart AB edasi-tagasi ehk teiste sõnadega — aega, mis kulub nelja amplituudiga võrdse tee läbimiseks, nimetatakse täisvõnkeperioodiks (T). Täisvõnke poolt perioodi nimetatakse poolvõnkeperioodiks ($T_1 = \frac{1}{2}T$).

Võnkumist võib määrata perioodi T asemel täisvõngete arvuga

$$\text{sekundis } \nu = \frac{1}{T}; T = \frac{1}{\nu}$$

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

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

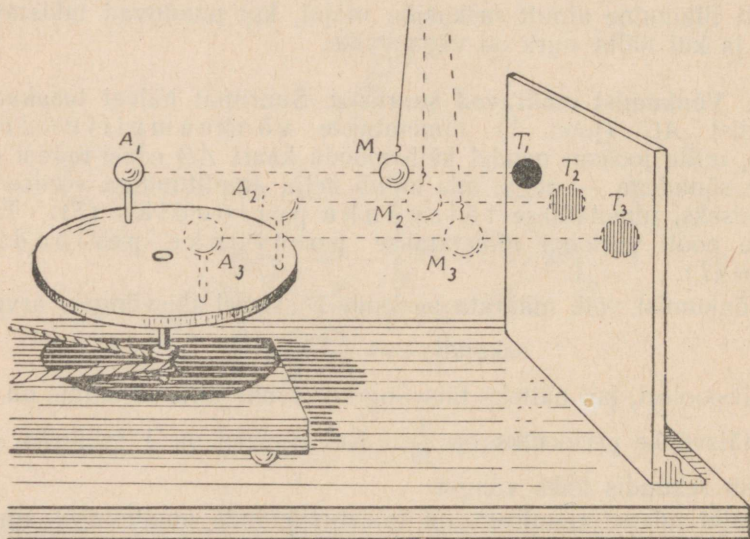
3. Võnkliikumise seos ringliikumisega. Kui tsentrifugaalmasinale asetada ketas, selle servale vertikaalne pulgake, mille otsas on kuulike, ja valgustada kogu seadist horisontaalsete ning paralleelsete kiirte kimbuga, siis kiirte teele vertikaalselt asetatud ekraanile tekib kuulikese vari. Kui kuulike 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 tasapinnas. Siis on võimalik 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 ringlevat punkti abipunktiks ja löiku, mis ühendab abipunkti ringjoone tsentriga, liikuvaks raadiuseks.

Kui abipunkt võtab ringjoonel algseisu M_0 , siis tema projektsioon langeb löigu N_2N_4 keskpunkti O ; seda löiku 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 . Veerandi perioodi järel eemaldub abipunkt algseisust 90° võrra



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.

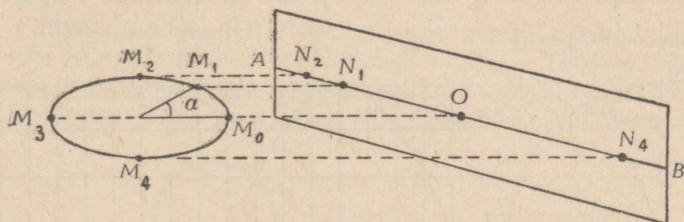
ja võnkuv punkt asetub punkti N_2 . Poole perioodi järel abipunkt eemaldub tasakaaluasendist 180° võrra ja võtab asendi punktis M_3 , võnkuv punkt aga asub löigu keskpunktis O . Kolmveerandi perioodi järel ehk 270° -se eemaldumise puhul võtab abipunkt asendi M_4 , võnkuv punkt aga asendi N_4 ; ühe täisperioodi 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°), tagasitulekul punkti O , kui

liikumine toimub punktist N_2 punkti N_4 suunas, on faas π (180°), punktis N_4 on ta võrdne $\frac{3}{2}\pi$ (270°) 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 abstsisssteljele kanda võrdsed lõigud, mis vastavad perioodi võrdsetele osadele, ja igast abstsissi punktist püstitada ordinaat, mis kujutab mingis mastaabis



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

võnkuva punkti hälvet, siis kõikide ordinaatide otspunktid asetsevad joonel, mida nimetatakse sinusoidiks (joon. 4). Sinusoid kujutab enesest graafikut, mis näitab võnkuva punkti hälbe muutumist sõltuvalt ajast.

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

I. 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 kuulike¹.

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 katses?

¹ Kuulikese diameeter peab olema palju kordi väiksem niidi pikkusest.

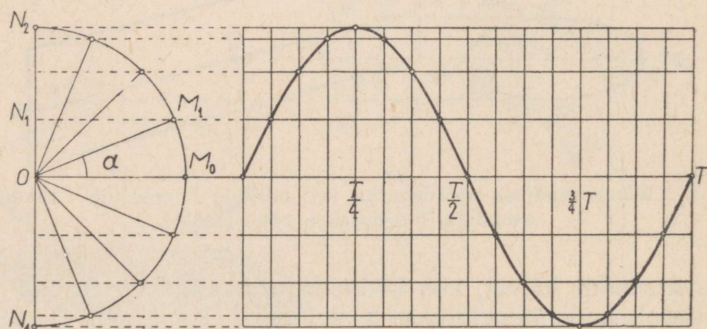
II. Uurida, kas sõltub võnkeperiood võnkuva pendli massist.

Töökäik 1. Kinnitage ühepikkuste niitude otsa mitmesuguste massidega kuulikesed, viige neid väikese nurga võrra tasakaaluasendist 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 .



Joon. 4. Harmoonilise võnkumise graafik ja selle ehitamine.

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. Väikeste amplituudide puhul võnkeperiood ei sõltu amplituudist (seda omadust nimetatakse isokroonsuseks — võnkumise võrdaegsuseks).

2. Võnkeperiood ei sõltu pendli massist.

3. Võnkeperiood on võrdeline ruutjuurega pendli pikkusest.

4. Võnkeperiood on pöördvõrdeline ruutjuurega raskuskiirendusest.¹

¹ Viimane järeldus saadakse teoreetiliselt.

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

Teooria annab poolvõnkeperioodi ja täisvõnkeperioodi jaoks järgmised valemid:

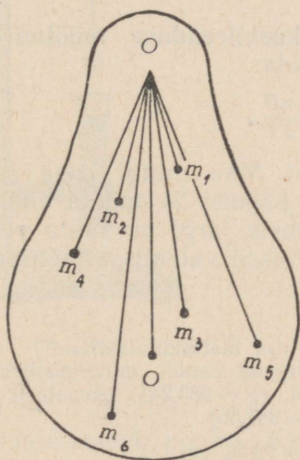
$$T_1 = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

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

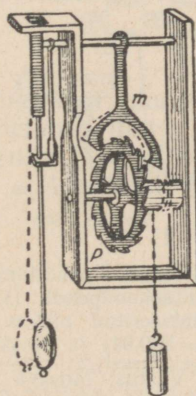
(II)

Pendli isokroonsuse avastas Galilei 1583. a.

7. Füüsikaline pendel. Füüsikaliseks 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 erinevate pik-



Joon. 5.



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

kustega matemaatilisi pendleid (joon. 5). Teljele ligematel osakestel peaks olema lühem võnkeperiood, kuna kaugemal osakestel peaks periood olema pikem. Kuna füüsikaline pendel võngub tervikuna, siis tema periood peab asuma üksikute punktide väikseima ja suurima perioodi vahel. Iga füüsikalise pendli jaoks võib alati leida sellise matemaatilise pendli, millega esimesel on võrdne periood.

Niisuguse matemaatilise pendli pikkust, millel on füüsikalise pendliga ühesuurune periood, nimetatakse füüsikalise pendli redutseeritud ehk taandatud pikkuseks.

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

8. Pendli rakendamine kellade juures. Pendlit rakendatakse kellade juures nende 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

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

Kella pendli ehitus on kujutatud joonisel 5-a.

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

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

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 poolvõnkeperiood 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 $l = 99,56$ 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 püelasse õlisse?

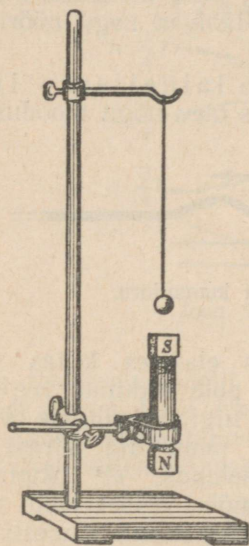
7. Kuidas muutub pendli võnkeperiood, kui tema pikkust kahekordistada, kolmekordistada?

8. Kuhu poole peab nihutama pendli läätse, kui kell jääb taha?

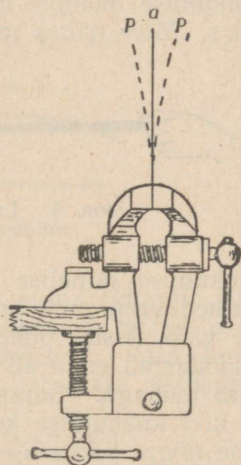
9. Kuidas muutub kella käik (joon. 5-a) kuumade suvepäevade tulekuga, võrreldes külmade talvepäevadega?

¹ Pendlit rakendas kellade juures esimesena hollandi füüsik Huygens (l.: huygens) 1658. a.

10. Elastsete kehade võnkumine. Kehade võnkumine võib toimuda nii raskusjõu kui ka elastsusjõu toimel. Kui tõmmata kõrvale kruustangide vahele pigistatud terasplaadikese ülemine ots (joon. 7), siis hakkab plaadike harmooniliselt võnkuma. Keha väljaviimisel tasakaalu-asendist toimub kuju muutus; kuju muutmisel tekib nõndanimetatud elastsusjõud, mis välise jõu mõju lakkamisel taastab keha endise kuju. Elastsusjõud ja sellest tekitatud kiirendused on võrdelised hälbe suurusega¹ ja on alati suu-



Joon. 6. Ülesande nr. 5 juurde.



Joon. 7. Elastse plaadikese võnkumine.

natud tasakaalu-asendi poole. Kui keha on jõudnud tagasi tasakaalu-asendisse, on elastsusjõud muutunud nulliks, kuid elastsusjõu poolt tekitatud kiirus on jõudnud sel momendil maksimaalse väärtuseni; saadud kineetilise energia arvel keha osakesed läbivad tasakaalu-asendi ja kalduvad vastaspoolele samasugusele kaugusele, kui ei ole takistavaid jõude. Niiviisi kujuneb plaadiosakeste harmooniline võnkumine risti plaadi pikkusega.

Kui keha kuju muutmise asemel muuta tema ruumala, surudes näiteks kokku õhusamba või ülesriputatud spiraalvedru tema telje sihis, siis tekivad kehas elastsusjõud, mis taastavad endise ruumala, kui lakkab välise jõu mõju. Tekkinud elastsusjõud on jällegi võrdelised tasakaalu-asendist kõrvalekaldumise suurusega. Omaette jäetud kehaosad ei tule kohe tasakaaluasendisse tagasi, vaid hakkavad keha pikkuse sihis harmooniliselt võnkuma.

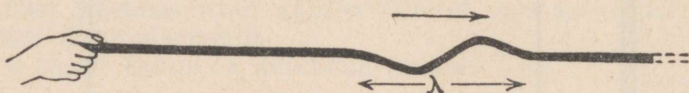
¹ Kui jõud ei ületa elastsuspiiri (vt. § 94).

Seega tekivad harmoonilised võnkumised elastses kehas kuju või ruumala muutmisest.

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

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 (hari) ja nõgu (org) — läbivad kogu nööri kuni lõpuni (joon. 8.).

Võnkumise levimist kehas nimetatakse laineliseks liikumiseks. Meie näites mõhk ja naabruses olev nõgu moodustavad laine.



Joon. 8. Laine levimine mööda kummitoru.

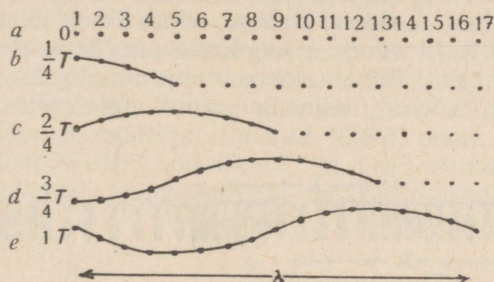
Võnkumise lainelise levimise näiteks elastses kehas võivad olla lained veepinnal, kuigi need lained pole tekkinud vee elastsusel, vaid teistel põhjustel.¹ Vaikse tiigi veepinnale visatud kivi moodustab enda all pinnakihi nõo; mõne aja pärast nõgu asendub mõhaga. Samal ajal võime täheldada, et liikumine 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.

12. Ristvõnkumine. Et saada selgemat kujutlust laine tekkimise viisist elastses kehas, eraldame mõttes horisontaalsel varval mõned tema osakesed võrdsetel kaugustel 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 koheosioonist ja on suunatud tasakaalu-asendi poole. Sellest jõust tingitud kiirendus

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

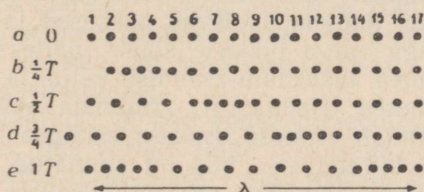
on suunatud vastupidiselt algkiirusele ja mõne aja pärast kiirus muutub nulliks. Kuid tasakaalu-asendist väljumise tagajärjel tõmbab esimene osake kohe endaga kaasa teise osakese, teine jälle kolmanda jne. Oletame, et veerandi perioodi pärast, esimese osakese peatumise ajaks, jõudis liikuma hakata neli osakest, kaldudes tasakaalu-asendist mitmesugustele kaugustele (joon. 9 b).

Pärast seda, kui esimese osakese kiirus on muutunud nulliks, hakkab see osake elastsusjõu toimel liikuma järjest suureneva kii-



Joon. 9. Ristvõnkumise levimine.

rusega tasakaalu-asendi poole ja jõuab sinna jällegi veerandi perioodi pärast. Selle aja jooksul teine, kolmas ja neljas osake on mitte ainult eemaldunud suurimale kaugusele, vaid hakkavad juba tagasi tulema tasakaalu-asendisse, kogu aja hilinedes oma



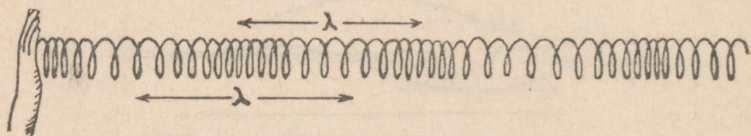
Joon. 10. Pikivõnkumise levimine.

liikumises iga 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. Sellesama 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 ning 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 hakkavad liikuma piki elastset keha paremale poole.

Järkjärguline mõhkade ja nõgude levimine piki varba on laineline liikumine. Ka siin võnguvad varva osakesed tasakaaluasendi ümber, ilma et nad liiguksid piki varba; mööda varba toimub ainult liikumise vormi edasiandmine, mitte aga osakeste eneste ümberpaigutamine. *Võnkumisi, millede osakeste liikumised on risti laine levimissuunaga, nimetatakse ristvõnkumisteks.* Ristvõnkumistega lained ehk ristlained tekivad sel juhul, kui kehas ilmneb *elastsus kuju muutumisel*. Kuna oma kuju on ainult tahkel kehal ja ainult temal esineb elastsus kuju muutumisel, siis *elastsed ristvõnkumised* võivad esineda ainult elastsetes tahketes keha des.



Joon. 11. Pikilaine levimine spiraalvedrus.

Ristvõnkumised esinevad ka vedeliku, näiteks vee pinnal. Kuid neid põhjustab mitte elastsusjõud, vaid osakeste raskusjõud ja vedeliku vaba pinna püüe säilitada horisontaalset asendit.

13. Pikivõnkumine. Kui eraldada horisontaalsel varval mõned üksteisest võrdsetel kaugustel olevad osakesed 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 esimese osakese esialgse kiiruse kuni nullini, andes talle kiirenduse, mis on suunatud tasakaalu-asendi poole. Needsamad elastsusjõud panevad osakese kiirenevalt liikuma tasakaalu-asendi poole; kogunud tasakaalu-asendisse jõudmisel kineetilist energiat, läheb osake sellest asendist läbi vastaspoolele, eemaldub samale kaugusele ja hakkab jälle elastsusjõu toimel liikuma tasakaalu-asendi poole. Järgnevad osakesed kordavad kirjeldatud liikumist teatud hiline misega. Veerandi perioodi tagant üksteisele järgnevad punktide asendid on kujutatud joonisel 10.

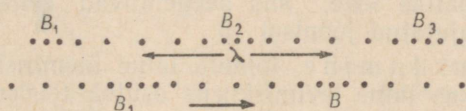
Joonis 11 näitab elastses vedrus tekkinud tihendusi ja hõrendusi, joonis 12 annab aga üksikute osakeste asetuse skeemi.

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

Võnkumisi, milledes osakeste liikumised toimuvad laine levimissuunas, nimetatakse pikivõnkumisteks. Pikivõnkumistega lained ehk pikilained tekivad kehaes, milles avaldub elastsusruumala muutumisel. Järelikult võivad pikilained tekkida tahketes, vedelates ja gaasilistes kehaes.

14. Laine pikkus. Kahe naabermõha kaugust ristlaines või kahe naabertihenduse kaugust pikilaines nimetatakse lainepikkuseks ja tähistatakse kreeka tähega λ (lambda). On silmanähtav, et kahe naabernõo 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.



Joon. 12. Tihenduste ja hõrenduste skeem pikilaines.

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

Joonisel 9 nähtub, et ühe 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, millel levib võnkumine ühe perioodi jooksul, on vT ja moodustab lainepikkuse λ .

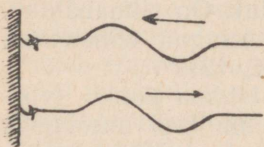
Kui tähistada võngete arv 1 sekundis ν -ga, siis kõik nimetatud suurused on omavahel järgmiselt seotud:

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

15. Lainete peegeldumine ja murdumine. Kui horisontaalset kummipaela (-toru) või nõõri pingule tõmmata ja teha järsk löök käega, siis, nagu oli kirjeldatud §-s 11, piki nõõri hakkab liikuma üksik ristlaine. Vaatlus näitab, et laine, jõudnud nõõri teise, kinnitatud otsa, tuleb sama teed tagasi (peegeldub).

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

Kinnitame kummipaela seina külge ja saadame seda mööda üksiku laine mõhaga ees (joon. 13). Katse näitab, et laine peegeldudes tuleb tagasi, nõgu ees.



Joon. 13. Peegeldumine poolaine kaotusega.

Kui aga siduda kummipaela kerge nõõri külge ja jällegi saata laine mõhaga ees, siis peegeldunud laine tuleb tagasi samuti mõhaga ees (joon. 14).

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

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

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.



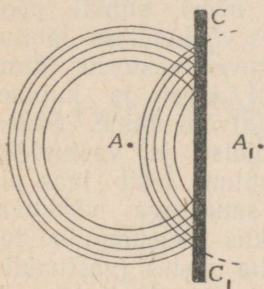
Joon. 14. Peegeldumine poolaine kaotuseta.

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 igal ajamomendil, peavad liituma vektorite liitmise reegli järgi.

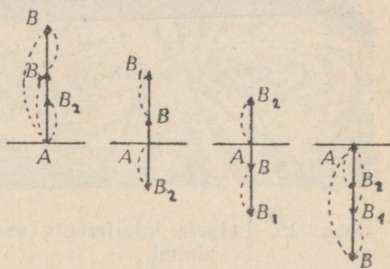
Sellise liitmise lihtsaimaks liigiks on juhtum, kus mõlemad lained panevad punkti võnkuma ühte sirgjoont mööda. Siis nihked liidetakse algebraliselt. Joonisel 16 on toodud neli nihete algebralise liitmise juhtu: AB_1 esimesest lainest ja AB_2 teisest lainest; AB on mõlema nihke algebraline summa.

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 tekkimises, nimetatakse lainete interferentsiks. Oluliseks selle juures on see, et need piirkonnad säilitavad oma asukoha ruumis. See võib olla ainult sel juhul nii, kui võnkumiste liitumise tingimused igas ruumi punktis jäävad aja jooksul muutumatuks, ehk teiste sõnadega, lained peavad tulema igasse antud ruumi punkti jääva faaside vahega. Pole



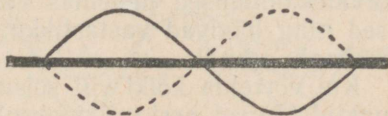
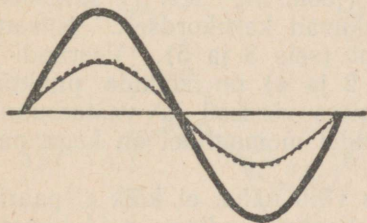
Joon. 15. Veepinda mööda levivate lainete peegeldumine: A — lainete lähe; CC_1 — tõke, millelt toimub peegeldumine; A_1 — peegeldunud ringlainete tsenter (A ebakujutis).



Joon. 16. Nihete algebraalse liitumise neli juhtu.

raske aru saada, et sellist tingimust täidavad ainult võrdsete perioodidega lained. Vastasel korral tekib paratamatult võnkumiste amplituudide maksimumide ja miinimumide piirkondade jaotumise ebapüsiv pilt ja interferentsi ei teki.

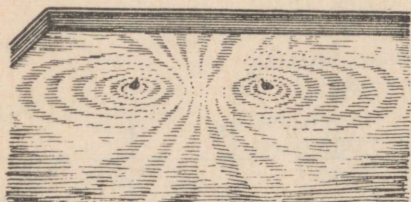
Interferentsi võib näha vee pinnal, kui sellel tekitada kaks lainete süsteemi. Heledad ribad kahe võnkumise ujuki vahel jooni-



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

sel 19 näitavad interferentsiribasid, s. o. neid punkte, kuhu lained tulid vastupidiste faasidega, mille tagajärjel kaduski võnkumine nendes punktides.

17. Seisev laine. Kui nööri mööda saata käe liigutamise 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.

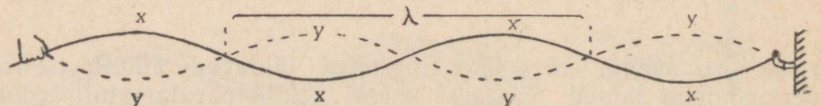


Joon. 19. Lainete interferents vee pinnal.

Iga nööri punkti poolt mõlemas võnkumises läbitud teed liituvad vektorite liitmise reegli järgi ja kujuneb teatud liitvõnkumine. Säära ne päripidise ja vastupidise laine juhtum tekib igas piiratud suurusega võnkuv kehas, kus peegeldumine toimub keha otstes (vastupidist lainet ei ole ainult lõpmata suures kehas).

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; vastu-

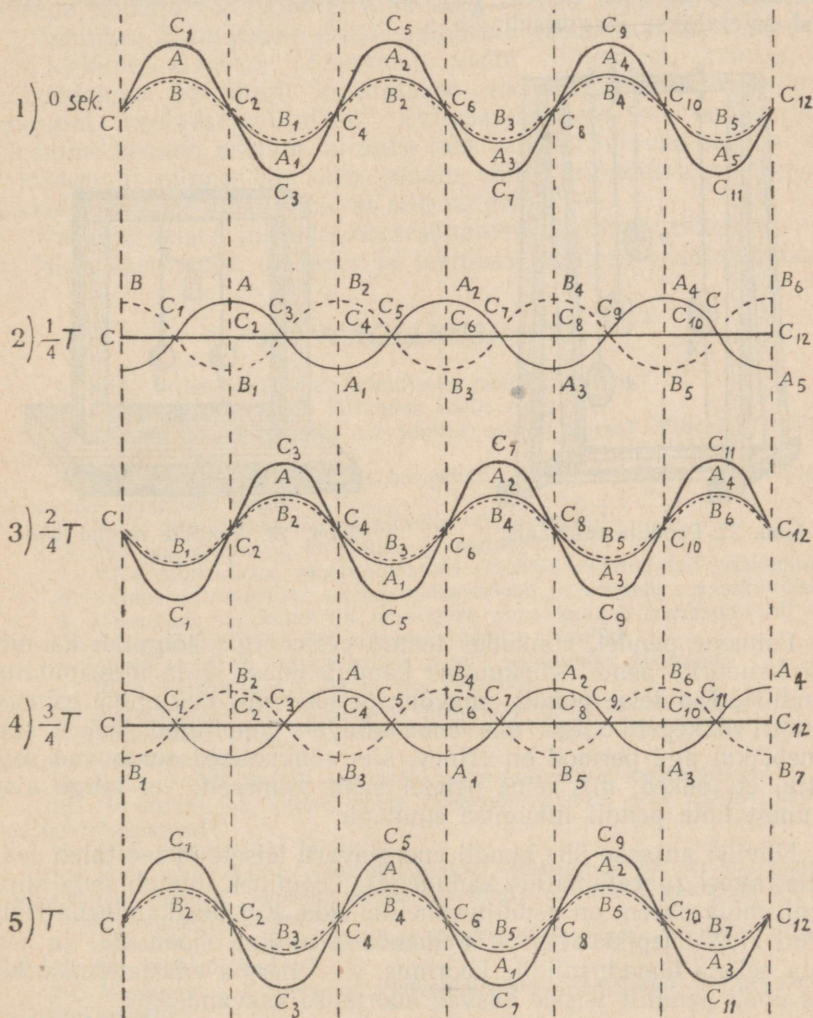


Joon. 20. Kummipaela abil tekitatud seisev laine.

pidise laine liikumine — tähe B samasuguse ümberpaigutamisega paremalt vasakule; võnkumine liitlaines — punkti C asenditega. Kui kujutella, et mingil momendil (joon. 21, seis 1) sinusoidid ühtivad, siis keha kõik punktid nihkuvad kahekordselt. Niisama liituvad 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 pael tasakaalu-asendis.

Kui võrrelda kõiki viit seisut, siis võib näha, et kõik C paaris-punktid jäävad perioodi jooksul tasakaalu-asendisse; neid nimetatakse sõlmedeks. Kõik C paaritud punktid läbivad suurimad amplituudid ja neid nimetatakse paisudeks. Võnkumiste süsteemi, kus ühed võrdsetel kaugustel asetsevad punktid on sõlme-

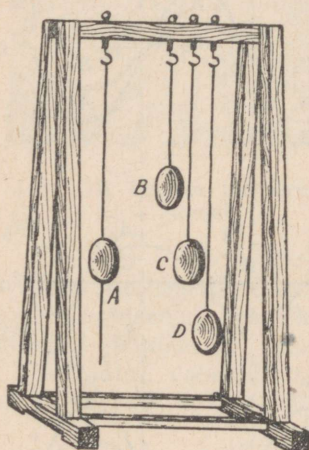
deks, sõlmede vahemiku keskpunktid aga paisudeks, nimetatakse seisvaks laineks. Seisev laine võib tekkida nii ristkui pikilainete liitumisest. Kahe naabersõlme kaugust CC_2 , ehk mis on sama, kahe naaberpaisu kaugust teineteisest C_1C_3 , nimetatakse seisva poolaine pikkuseks. Igal ajamomendil on kahe seisva naaberpoolaine punktid vastassuunalises võnkumises. Seisva poolaine pikkus on võrdne päripidise laine poole pikkusega (joon. 20).



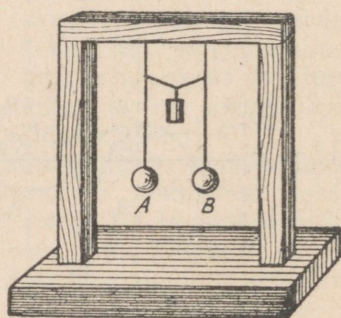
Joon. 21. Seisvate lainete tekkimine päripidise ja vastupidise laine liitumise teel.

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

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



Joon. 22. Pendlite resonants.



Joon. 23. Pendlite seotud võnkumised.

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 võnkeperioodiga, siis tema võngete 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 pendliilt teisele kasvab koormuse kasvamisega.

Võnkumise tekitamist ühes kehas võnkumisega teises kehas, millel on esimese keha ühesuurune võnkeperiood, nimetatakse resonantsiks.

19. Resonantsinähtus ja tehnika. Paljudes tööpinkides ja masinates jõud mõjuvad perioodiliselt. Sellise nähtusega on tegemist aurumasinates ja stantsimismasinates, mis annavad tõukeid võrdsete ajavahemikkude järel, või ebaühtlase käiguga tööpinkidel. Need perioodiliselt korduvad tõuked antakse edasi masina teistele osadele, tööpinkide alustele ja hoonetele. 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 völli, 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 taksammul minna üle silla, muidu võib perioodilistest tõugetest tekkida nii suur kõikumine, et sild langeb sisse.

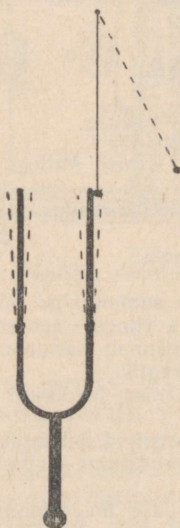
Paljudel teistel juhtudel on resonantsil positiivne tähendus ning ta leiab kasutamist teaduses ja tehnikas (näiteks raadiotehnikas).

KONTROLLKÜSIMUSI.

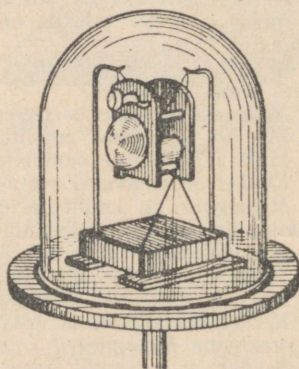
1. Mida nimetatakse matemaatiliseks pendliks?
2. Kuidas sõltub pendli kiirendus hälbe nurgast?
3. Missuguses tee punktis on pendlil suurim kiirus? Millega on võrdne selles punktis kiirendus?
4. Missugustes tee punktides on pendlil suurim kiirendus ja missugune on nendes punktides kiirus?
5. Mida nimetatakse 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 võnkumise graafik?
10. Missugused on matemaatilise pendli võnkumise seadused?
11. Mida nimetatakse füüsikaliseks pendliks?
12. Mida nimetatakse füüsikalise pendli redutseeritud pikkuseks?
13. Missugusel omadusel põhineb 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? Millises asendis on antud momendi võnkumise keha mitmesugused punktid?
18. Mida nimetatakse pikivõnkumiseks? Missugune on punkti liikumise graafik ühe perioodi jooksul?
19. Missugustes kehtes 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 olemas laine peegeldumise juures?

23. Mida nimetatakse lainete interferentsiks?
24. Mis saadakse, kui liituvad kaks ühesuguste perioodidega, suundadega ja faasidega võnkumist?
25. Mis saadakse kahe ühesuguste suundade ja perioodidega, kuid vastupidiste faasidega võnkumise liitumisel, kui:
- amplituudid on võrdsed,
 - 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 kahé naabersõlme või naaberpaisu kaugust teineteisest?
29. Missugustes faasides on võnkuvad punktid, mis asetsevad mõlemal pool iga 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 helisevat keha, näiteks heliharki puudutada niidi otsas rippuva metallist kuuliga,



Joon. 24. Heliseva helihargi võnkumine.



Joon. 25. Elekterkõlisti õhupumba kupli all.

kesega (joon. 24), siis see kuulike hakkab helihargilt eemale hüplema, näidates sellega heliseva keha võnkuvale olekule.

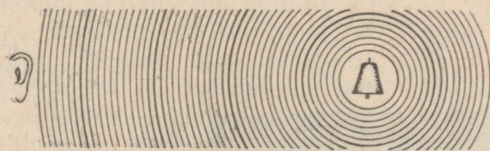
Heliseva keha võnkumine antakse edasi õhule. Heliseva keha pind esimesel momendil liigub ümbritseva õhu poole ja surub selle lähema kihi kokku; pinna tagasiliikumisel tekib tihenduse asemel õhu hõrendus. Need tihendused ja hõrendused levivad ümbritsevas õhus lainetaoliselt, moodustades häälelaineid.

Hääl levib ainult elastses aines. Ohuta ruumis hääl ei levi. Kui

riputada õhupumba kupli alla elekterkõlisti, (joon. 25), siis selle järgi, kuidas õhku kupli alt välja pumbatakse, hääle valjus väheneb.

Hääle levimine punktitaolisest allikast toimub sfääriliste (kera-) lainete kujul (joon. 26). Ohu laine, jõudes kõrvani, paneb võnkuma trummikile; selle võnkumised antakse edasi sisekõrvale; seal nad ärritavad kuulmisnärvi ja kutsuvad sellega esile hääle tajumise — kuulmise.

Erisugustes kehas on hääle levimiskiirus erisugune. Et mõõta seda kiirust, tuleb ühe täpse kella (kronomeetri) järgi märkida mingi lühikese hääle tekkimise aeg, teise kella abil, mille näita-



Joon. 26. Keralainete levimine helisevast kehast.

mine 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.

Võngete arvu sekundis mõõdetakse ühikuga, mida nimetatakse hertsiks (Hz). *Hertsiks nimetatakse sagedust 1 täisvõnge sekundis.*

21. Toon. Tooni valjus ja kõrgus. Sireen. Hääled jagunevad muusikalisteks helideks ehk toonideks ja müradeks.

Müra on paljude lühiajaliste ja mitmesuguste häälte kogum. Selline on metsa mühin tuules, samuti ka müra, mis tekib palkide või kivide viskamisest teesillutisele, sõidukite liikumisest, trammi- ja metroovagunite liikumisest rööbastel.

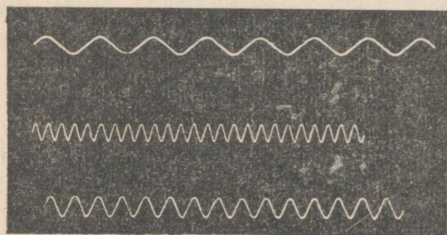
Muusikalist heli annavad helihark, mänguriista keel, laulja hääle ja muusikariistad. Kõrv eraldab helis kolme omadust: valjust, kõrgust ja tämbrit.

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

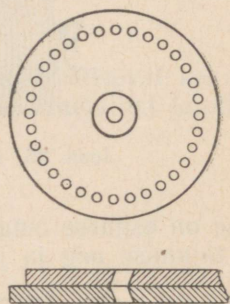
Kvalitatiivselt võime selles veenduda heliseva helihargi või

pillikeele juures: amplituud väheneb seal aja jooksul. 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 cm² kohta 1 sekundis on võrdne 10⁻⁸ ergiga (kuuldelävi).

Heli kõrgus sõltub võnkumiste arvust sekundis. Katse näitab, et me 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 sinu-



Joon. 27.



Joon. 28. Cagniard de la Tour'i (l.: kanjaar dö la tuur) sireeni kate.

soidid (joon. 27). Nende sinusoidide ja klaasiriba liikumise aja järgi võib arvutada võngete arvu sekundis ehk võnkesageduse.

Heli võngete arvu mõõtmiseks rakendatakse riista, mida nimetatakse sireeniks.

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

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 unissoon ehk samakõla). Siis mõõdetakse teatud aja kohta liikuva ketta pöörete arv sireeni küljes oleva ja selleks määratud lugeja (joon. 29) abil ning selle järel määratakse võngete arv sekundis.

Et aru saada hääle kõlaks ehk tämbriks nimetatava omaduse füüsikalistest alustest, tuleb tutvuda hääle kui lainelise liikumise teiste omadustega.

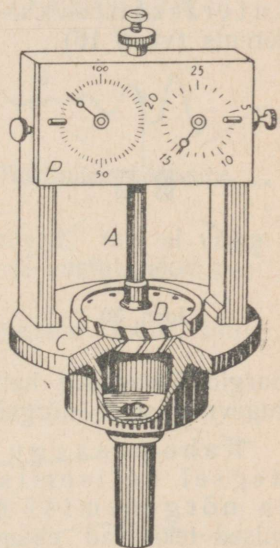
22. Häälelaine peegeldumine. Sarnaselt igasuguse elastse võnkumise lainega peegeldub häälelaine kahe erisuguse keha piirilt. Kui hoone seinale, jõe kaldale või metsale langeb keraline häälelaine, siis nendelt piiridelt lähtub uus keralaine, mille kumeruse suund on vastupidine langeva laine omaga. See laine on 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 normaalid¹ moodustavad piirile tõmmatud ristjoonega võrdsed nurgad. Seega on hääle peegeldumise kohta kehtiv sama seadus mis valgusegi peegeldumise kohta: *lange-misnurk 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.

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

23. Häälelainete interferents. Kui panna helihark helisema ja pöörata teda ta pideme telje ümber, siis on kuulda hääle vaheldu-

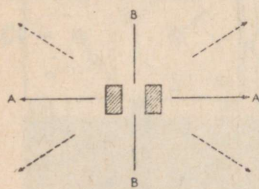


Joon. 29. Gagniard de la Tour'i sireen.

¹ Normaaliks nimetatakse tasapinnale antud punktis tõmmatud ristjoont.

vat nõrgenemist ja tugevnemist. On ilmne, et mõnes suunas helihargi harudest tulevad mõnedes suundades häälelained nõrgendavad teineteist. Nii nõrgendavad joon. 30 helihargi kummastki harust punktiiriga joonestatud noolte suunas tulevad lained teineteist.

Suundades *A*, *A* ei toimu vastastikust mõju, sest iga haru takistab teisest harust tulevate lainete levimist. Suundades *B*, *B* levivad lained nende vahel olevast õhumassist, mitte aga helihargi harudest. Hääle tugevnemist ja nõrgenemist nimetatakse hääle interferentsiks. Hääle interferentsi aluseks on lainete interferents (vt. § 16).



Joon. 30.

hargid üheaegselt helisema, siis võime kuulda heli vahelduvat tugevnemist ja nõrgenemist.

Kahe peaaegu võrdsete perioodidega keha üheaegselt helisemisel tekkivaid hääle tugevnemisi ja nõrgenemisi nimetatakse tuiklemisteks. Tuiklemised tekitavad ebameeldiva mulje, kui nad korduvad 30 kuni 130 korda sekundis.

Tuiklemiste füüsikalisest põhjustest on kerge aru saada, vaadeldes joonist 30-a. 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 tekitavad heli tugevnemise ja nõrgenemise.

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

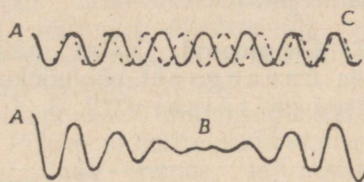
25. Keha omatoon. Kui keha ühes otsas on tekitatud võnkumine, siis lähevad lained kehast läbi, peegelduvad selle teiselt otsalt, tulevad vastupidiste lainetena tagasi, peegelduvad uuesti esimeselt otsalt jne. Päripidise ja vastupidise laine liitumisest tekivad seisvad lained.

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 liitumise tõttu.

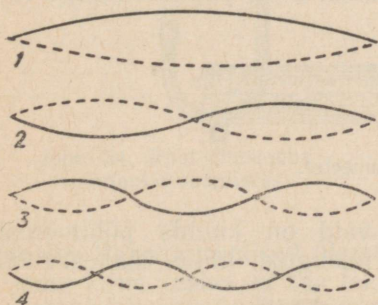
Seisvate lainete tekkimisel mitmesugustes kehas on kaks võimalust: esimene võimalus — keha mõlemad otsad on vabad või mõlemad on liikumatud; siis tekib nendel üheaegselt kas kaks sõlme või kaks paisu, s. o. kogu kehale paigutub täisarv seisvaid poollaineid (paarisarv veerandlaineid); teine võimalus — 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.

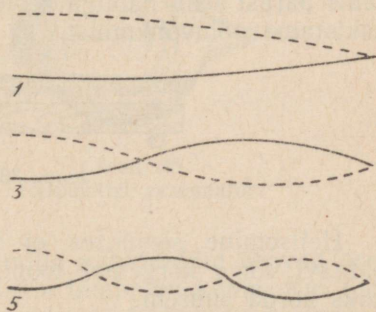
Keha omatoonideks nimetatakse selliseid toone, mille puhul kehale paigutub täisarv veerandlaineid.



Joon. 30-a. Tuiklemiste tekkimine.



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



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

26. Keha põhitoon. Keha põhitooniks nimetatakse kõige väiksema võnkesagedusega omatooni. Põhitooni puhul tekib kehas kõige väiksem arv sõlmpunkte. Otsast kinnitatud keele võnkumisel tekivad otstes sõlmpunktid ja keskele pais (joon. 31).

Keele pikkus l annab ühe seisva poollaine, järelikult on põhitooni lainepikkus $\frac{\lambda}{2} = l$, ehk $\lambda = 2l$.

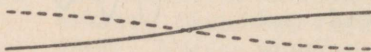
Ühest otsast kinnitatud varva võnkumisel tekib kinnitatud otsas sõlmpunkt (joon. 32), teises otsas aga pais. Sellise varva pikkusele paigutub pool seisvast poollainest, s. o. neljandik põhitooni

lainepikkusest; järelikult $\frac{\lambda}{4}$ on võrdne varva pikkusega l ja siit $\lambda = 4l$.

Niisamasugune suhe 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.

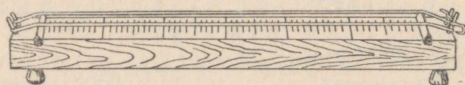
27. Ülemtoonid. Katsed näitavad, et võnkuvas kehas võivad tekkida üheaegselt põhivõnkumisega võnkumised, millede lainepikkused on täisarv (2, 3, 4 jne.) korda põhitooni lainepikkusele.



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

sest väiksemad või millede võnkearvud on vastav arv korda suuremad. Võtame riista (joon. 33-a), mida nimetatakse sonomeeteriks. See on pikk puust kast, millele on tõmmatud keeled.

Tõmbame keele ühe veerandi pikkuse kohalt helisema ja puudutame pärast seda näpuga keele keskpaika. Selle puudutamise me takistame põhivõnkumist.



Joon. 33-a. Sonomeeter.

Helisemine seejuures ei lakka, vaid on kuulda põhitoonist oktaavi võrra kõrgemat tooni, s. o. niisugust, mille võnkearv on kaks korda suurem.

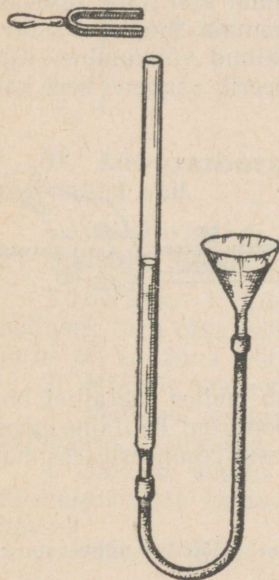
Tõmbame keele helisema keskelt ja puudutame teda kolmandiku pealt, siis kuuleme veel kõrgemat tooni.

Puudutades keelt neljandiku, viiendiku jne. pealt, me summutame sellega põhitooni ning kuuleme ikka kõrgemat ja kõrgemat tooni. Toone, millede võnkearvud on põhitooni võnkearvu täisarvulised kordsed, nimetatakse harmoonilisteks ülemtoonideks. Nii võivad pillikeele 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. Tämb. Nagu eespool toodud näidetes nii ka teistel juhtudel võivad kehade helisemised üksteisest erineda ülemtoonide arvu, kõrguse ja valjuse poolest. Ühe ja sama põhitooni juures võivad

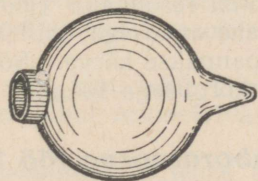
erinevatel instrumentidel või hääletes kuuldavale tulla erinevad ülemtoonid, mispärast kuulmismuljed võivad olla ka erinevad. Seda erinevust väljendatakse sellega, et põhitoonile omistatakse erinev helivärv (ehk tämbr). Seega heli kolmas omadus — tämbr. — sõltub põhitooni saatvate ülemtoonide arvust, kõrgusest ja valjusest. Sellepärast näiteks toon *do*, nagu iga teinegi, võetud inimesehäälega, viiulil või klaveril, tekitab kuulmisel erinevaid muljeid. Hääle tämbri sõltuvust ülemtoonide arvust, järgust ning valjusest võib kindlaks teha sama sonomeetri abil.



Joon. 34. Riist õhusamba resonantsi saamiseks.

Tõmbame keelt mitmesugustes punktides. Põhitooni mitte sumbutades võime eraldada temas mitmesuguseid tämbreid. See erinevus tuleb sellest, et keele puudutades erinevates kohtades me muudame seejuures ülemtooni valjust.

Tõmmates keele keskpäika me ergutame põhitooni ja paarisarvulisi ülem-



Joon. 35. Helmholtzi resonaator.

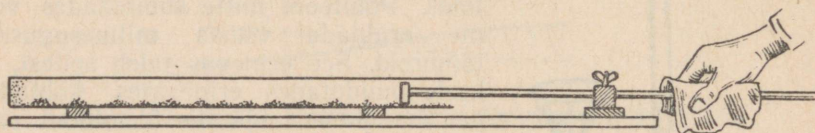
toone. Paaritu arvulised ülemtoonid, mille sõlmpunktid peavad asetsema keele keskel, ei saa tekkida. Hääle tämbr on kume. Kui tõmmata keelt otsade lähedusest, siis tugevnevad kõrgemad ülemtoonid ja saadakse helisev häälel.

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

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

neerib tugevasti helihargi helisemisele. Võib valida õhusamba suurus nii, et saadakse helihargi ülemtoonide resonants. Edaspidine vee nivoo muutmine muudab õhusamba võnkumise omaperioodi ja resonants lakkab. Mingile helile rezoneerivat riista nimetatakse *resonaatoriks*.

Kerge on näidata resonantsi ja samal ajal ka ülemtoonide olemasolu klaveril. Tuleb ettevaatlikult vajutada alla üks keskmistest klahvidest ja hoida teda sellises olekus. Samal ajal lüüa tugevasti esimese tooni suhtes oktaavi võrra madalamale toonile vastavat klahvi ja kohe lahti lastes summutada tekkinud võnkumine. Kuuleme oktaavi võrra kõrgemat tooni — rezoneerib esimene keel kaks korda pikema keele esimesele ülemtoonile.



Joon. 36. Kundt'i toru.

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

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

Töövahendid: 1) Kundt'i toru (joon. 36); 2) klamber; 3) mitmest ainest varvad; 4) papist ketas; 5) mõõtejoonlaud; 6) korgipuru; 7) märg kalevitükk.

Töökäik. 1. Kinnitage varb keskelt klambriga; 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.

3. Loendage n_0 sõlmede või paisude vahet, mõõtkte mõõtejoonlauaga äärmiste loendatud punktide kaugus l ja leidke seisva poolaine 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 niisama suur kui õhuski, siis arvutage v_0 , l_0 ja L kaudu v .

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	Pool- lainete arv n_0 õhus	Pool- laine 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. Häälelaine pikkuse määramine resonantsi abil.

Töövahendid: 1) Ühendatud anumad (kujutatud joon. 34); 2) helihark; 3) mõõtejoonlaud.

Töökäik. 1. Tõstes leetri võimalikult kõrgele, viige helisev helihark toru otsa kohale ja langetage letrit seni, kui õhusammastorus on hakanud resoneerima helihargile.

2. Mõõtke mõõtejoonlauaga resoneeriva õhusamba pikkus.

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

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

5. Mõõtke mõõtejoonlauaga õhusammast ja tehke arvutus.

6. Leidke kahe näitamise keskmise ja võrrelge laine pikkusega, mis vastab helihargile märgitud vonkearvule.

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.

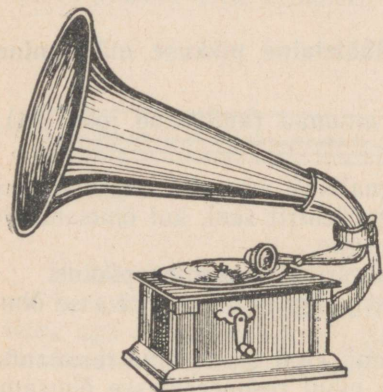
Hääle ülesmärgimisel tarvitatakse erilist lõiketera, mis pannakse vonkuma vahetult helilainete poolt või, mis praegu sagedasem, elektromagnetilise seadise — rekorderi abil; viimane on ehituselt sarnane valjuhääldajaga. Pehmele vahast kettale lõigatakse selle lõiketeraga looklev spiraalne vagu (joon.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

Hääle reprodutseerimiseks asetatakse elastsest vilgukivist või metallist plaadikesega (membraaniga) ühenduses olev grammofoninõel pöörlevale plaadile. Liikudes vagu mööda, kordab nõel

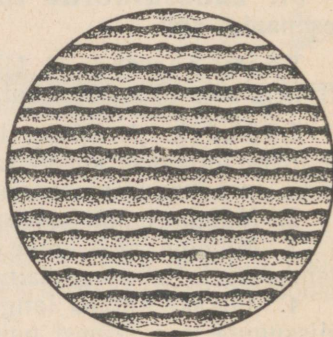
kõiki neid võnkumisi, mida ülesmärkimisel tegi lõiketera. Need võnkumised antakse edasi membraanile ja sealt edasi õhusambale, mis asetseb heli juhtivas torus ja hääletugevuse suurendajas — ruuporis.

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

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



Joon. 37. Grammofon.



Joon. 38. Osa grammofooni plaadist (suurendatult).¹

33. Ultrahelid. Kui kvartsikristallist plaadi vastastahkudele asetada metalläärised ja anda neile vahelduv elektripinge, siis vahelduvate elektriliste jõudude toimel plaat perioodiliselt deformeerub; kui elektri võnkumiste oma-periood 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 massiivsel tahkel kehal, näit. metallvalatisel, on sisemist ebaühtlust, valamise defekte, siis sellistes kehtades erisuguste tihedustega osades sumbuvad ultrahelid erisuguselt ja võimaldavad avastada sisemise ehituse vigu. Nii viisi 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, tappes 1—2 min. jooksul kalakesi, konna-poegi ja konni (soojaverelised loomad ei sure).

4. Nad surmavad baktereid, näit. piimahappe omi, mille tõttu piima hap-

¹ Joonisel on kujutatud väga väike plaadi osa, mille tõttu vaod paistavad sirgetena, kuna nad tegelikult on spiraalsed.

nemist võib ära hoida mitme ööpäeva jooksul. Ultrahelide biokeemilisel toimel lagunevad valgud ja erituvad lahustunud gaasid protoplasmast.

5. Ultrahelid kasutatakse laevadevahelisel signaliseerimisel ja merepõhja reljeefi uurimisel laevaliikumise ajal.

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

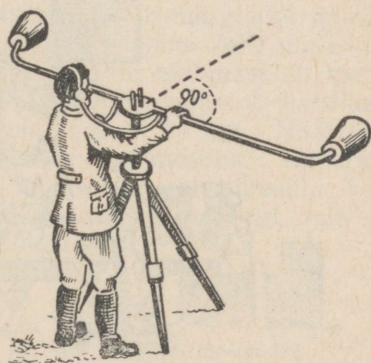
Selle meetodi praktilise rakendamise ala on väga lai: tulevikus saab võimalikuks metallide defektide «nägemine» ekraanil, selle «nägemise» rakendamine mitmesuguste kehade asukohtade kindlakstegemiseks vees jts.

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

35. Häälennähtuste kasutamine sõjatehnikas. Tänapäeva kauge-laskerelvade, kõrge maskeerimiskunsti ja sügavate kaevikute tõttu ei ole vaenlane oma vastasele alati nähtav. Kui vastane pole nähtav, siis võib ta olla kuuldav, sellepärast on häälenähtustel suur tähtsus sõjatehnikas, võimaldades paljude sõjaülesannete lahendamist.

Üks esimesi ülesandeid on hääle järgi vastase kuulipilduja, patarei või lennuki asukoha ülesotsimine. Selline otsimine põhineb meie kuulmisorgani omadusel eraldada väga väikesi ajavahemikke, mis on hääle tajumise vahel ühe ja teise kõrvaga, — see on niinimetatud binaureaalne efekt, 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.

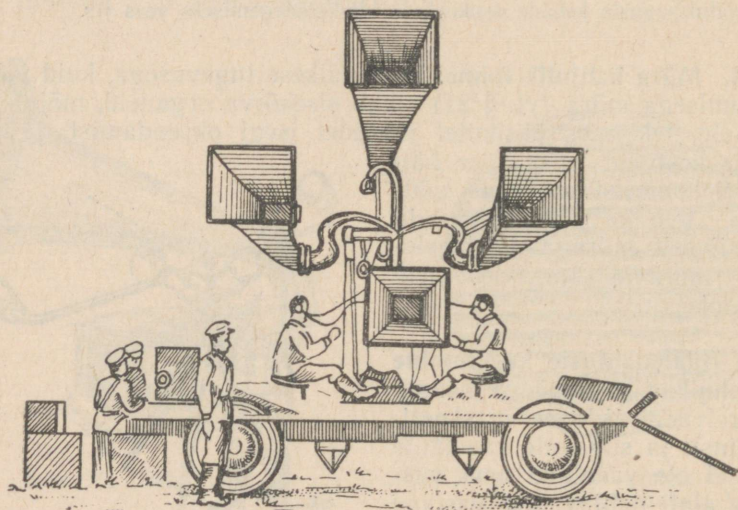
Kuid igal kõrval on olemas piir hääle tajumiseks kaugemast hääleallikast, kuna hääle valjus väheneb kaugusega. 2000 Hz vön-



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

kumiste juures (siin on kõrv kõige tundlikum) hääle taju kaob, kui tajumispinna igale ruutsentimeetrile langeb vähem kui $\frac{1}{10^9}$ ergi sekundis. Sellepärast võib lennuki müra palja kõrvaga kuulda mitte kaugemalt kui 9 km.

Veel nõrgemate häälte kinnipüüdmiseks kasutatakse kooniliselt koonduvaid torusid — ruuporeid, mis püüavad kinni palju suurema osa häälelainest kui kõrv, koondavad selle energia ja juhivad kõrvalestadesse (joon. 39).



Joon. 40. Häälepüüdja.

Ruuporite vahe nagu suurendaks kõrvade vahet ja sellega suurendab binaureaalsel võimel põhinevat hääle suuna määramise täpsust (kuni $0,5^\circ$). Ruuporite abil suureneb helipüüdmise kaugus 25 km-ni.

Lennukitõrjeks pole küllaldane teada ainult lähenemise suunda, vaid peab teadma ka lennu kõrgust; sellepärast koosneb häälepüüdmise riist kahest, horisontaalsest ja vertikaalsest 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 ilmutamise õigeaegseks avastamiseks merel. Selleks otstarbeks kasutab sõjatehnika vee häälejuhtivust, ehitades erilisi häälepüüdjaid, mille abil kuulaja, püüdes kinni laevakruvi müra, võib jälgida vaenlase laevade liikumist. Laevakruvi müra ja teised laeva mürad koosnevad paljudest erinevate sagedustega (piirides 300 kuni 1500 võnget sekundis) häältest, moodustades häälte segu. Müra vastu-

võtjad ehitatakse mitut tüüpi ja suuremalt jaolt nad põhinevad elektrilistel nähtustel. Sõjalaevadel rakendatakse harilikult elektromagnetilisi (või elektrodünaamilisi) vastuvõtjaid. Elektromagnetiline vastuvõtja kujutab endast suurendatud mõõdetega harilikku telefoni. Kui laevapardal on kaks vastuvõtjat, siis võib mõlemad vastuvõtjad seada ühesuguse valjusega häälele ja otsitav laev asub kahte vastuvõtjat ühendava lõigu keskristjoonel (nagu lennuki asukohta määramiselgi).

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

Laevaavariide vältimiseks varustatakse ohtlikud kohad hääle-signalisatsiooniga. Tuletornides, karidel ja teistes sarnastes kohtades seatakse üles mitmesuguse ehitusega hääle-energia 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 sõjaasjanduses. Õpperaamatus pole võimalik peatuda nendel huvitavatel rakendustel. Tutvuda nendega võib Vnukovi ja Bragg'i raamatute järgi, mis on märgitud kirjanduse nimekirjas, peatüki lõpus.

Harjutus 2.

1. Missuguse ajaga läbib hääle õhus 1 km, kui temperatuur on 0°?
2. Kui kaugel vaatlejast tekkis välg, kui ta kuulis müristamise algust 10 sekundit pärast välgu sähvatust (õhu temperatuur 15°)?
3. Kui lai on järv, kui hääle teiselt kaldalt tuli õhku mööda 1 sek. võrra hiljem kui vett mööda?

Vastus: 4300 m.

4. Missugune on hääle kiirus selles aines, milles hääle läbib 4,5 m 0,001 sekundiga?
5. Võngete arv sekundis on 512. Kui pikk on laine õhus 0° temperatuuril?
6. Kui suur on häälelaine võnkesagedus, kui ta pikkus õhus $330 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$ -lise kiiruse juures on 33 cm? Anda vastus täisarvuna.
7. Häälelaine võnkeperiood on 0,004 sek. Leida laine pikkus õhus 0° temperatuuril.

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

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

9. Kas võib hääle 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 $200 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$ (Vnukovi raamatust).

KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Milles seisab hääle füüsikaline 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 hääle resonantsi abil õhusambas määrata häälelaine pikkust või võnkesagedust?

Kirjandus. Зернов, Колебания и волны, «Звук и музыка», Масовый 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. Флемминг, Волны в воде, в воздухе, в эфире. Охотников В. Д., В мире застывших звуков (запись и повторение звуков), 1947 г.

II. Soojus ja molekulaarfüüsika.

1. Soojus ja energia.

36. **Soojusõpetuse arenemine.** Mehhaanika osas me nägime, et tootlik tegevus viis inimkonna juba iidsetel aegadel tutvumisele mehhaaniliste nähtustega. Juba viis tuhat aastat enne meie ajaarvamist nõudis püramiidide, nende maailma garndioosseimate ehitiste püstitamine masinate rakendamist. Vanaaja suured sõjad, tolle aja suurimate linnade piiramised toimusid märkimisväärse arvu mehhaaniliste seadiste abil. Tööstuse ja kaubanduse arenemine esitas teadusele üha suuremaid ja suuremaid nõudmisi. Teaduse areng viis XVI ja XVII sajandi piiril. Galilei-Newtoni mehhaanikaseaduste 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 mehhaanilist energiat (vesiveski ilmus Kesk-Euroopasse umbes IV sajandi keskpaiku, tuuleveski XI sajandi algul).

Tööstuse arenemine suurendas nõudmist metalli järele. Vanaaja kaevandusandus 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 tuleasaamise viisi avastamise ajast peale. Soojuse kasutamisele võtmine toimus töömuundumisel 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 mehhaanilise energia allikatega. Seepärast jäid nii jõumasina kui

ka soojuste enese omadused väljapoole teaduslik-tehnilise mõtte tähelepanu. Alles XVII sajandil, kui klassikalise mehhaanika loomine oli juba peaaegu lõpetatud ja kui ilmnes selgelt, nagu oli algul öeldud, seniste mehhaanilise energia allikate puudulikkus kaevandusajanduse ja vasttärkavate tekstiilvabrikute kasvavate vajaduste teenindamisel, pöördub teaduslik-tehniline mõte soojusnähtuste uurimisele.

Leidurite hulgas, kes püüdsid auru ära kasutada mehhaanilise töö saamiseks, näeme Leonardo da Vinci't (l.: vintsi), Papi'n'i (l.: papä'), Newcomen'i (l.: njuukomen) ja teisi. Paljude leidurite pingutuste tulemusena õnnestus XVII ja XVIII sajandite piiril ehitada esimesed seadised, mille abil saadi soojuste arvel mehhaanilist tööd. Kuid need seadised olid väga primitiivsed ja leidsid ainult väga piiratud rakendamist. Need olid ainult «tuletoime» pumbad, mille abil võis pumbata vett mingisugusesse reservuaari. Vahetuks rakendamiseks tehastes olid esimesed aurumasinaid kõlbmatud.

Igasuguseks tööstuslikuks otstarbeks kõlbliku aurumasina leiutamise suur au kuulub vene soojustehnikule — iseõppijale Ivan Polzunovile. Aastal 1763 I. Polzunov projekteeris ja aastal 1765 ta ehitas maailma esimese kahesilindrilise pideva töötamisega aurumasina, mis kindlustas töö katkestamatut saamist igasuguse tööstusliku mehhanismi käitamiseks. I. Polzunovi masin ehitati Altai, Kolõvano-Voskressenski tehastes Barnauli ringkonnas ja rea kuude jooksul pani käima õhupuhumise seadist. Ta tegi tasa oma valmistamise kulud ja tõi ka märkimisväärset tulu. Kuid feodaal-pärisorjusliku Venemaa tingimustes ei suutnud Polzunovi masin leida laialdast rakendamist. Kolõvano-Voskressenski tehaste harimatud juhid ja tsaari-Venemaa valitsevad ringkonnad, kellel ei olnud usku vene inimeste jõusse ja võimesse, hävitasid Polzunovi enda ja tema suure loomingu. Kuid I. Polzunovi töö polnud asjatu. Polzunovi masinat nägid paljud mäetööstuse spetsialistid-välismaalased. Nende kaudu sai see kahtlemata teatavaks ka välismaal, eriti ettevõtjate ringkondades, kes tundsid suurt huvi Venemaa mäeasjanduse edusammude vastu.

Palju hiljem ehitati Manchesteris kahesilindriline aurumasin, mis mõningate täiustamistega jäljendas Polzunovi masinat. Aastal 1784 ehitas inglase Watt (l.: uatt) täiuslikuma aurumasina. Kuid see polnud enam esimene, vaid teine masin tööstuslikkudeks otstarveteks. Tollest ajast hakati aurumasinat rakendama mitte ainult kaevandusajanduses, 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.

Soojuste nähtuste seaduste 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 soojusnähtusi 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 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, mida kasutatakse soojusnähtuste iseloomustamiseks ja mis ei sõltu soojuse teooriast.

37. Soojushulga ühik. Soojushulga mõõtmise ühikuks on võetud kalor¹.

Kaloriks nimetatakse soojushulka, mis on vajalik 1 g destilleeritud vee soojendamiseks 1° võrra².

Lühendatult kalorit tähistatakse **cal**.

1000 kalorit moodustavad 1 kilokalori.

Lühendatult tähistatakse kilokalorit **kcal**.

Kilokalor on soojushulk, mis on vajalik 1 kg destilleeritud vee soojendamiseks 1° võrra³.

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 soojenemise iseloomustamiseks on võetud tarvitusele eriline suurus, mida nimetatakse erisoojuseks.

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

Sama soojushulk, mis on arvuliselt võrdne erisoojusega, eraldub 1 g aine jahtumisel 1° võrra.

¹ Ladinakeelsest sõnast *calor* — kuumus.

² Täpsemalt 19,5°-st kuni 20,5°-ni.

³ Jahtumisel 1° võrra 1 g või 1 kg vett eraldab vastava kalori.

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 selleksamaks, 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 soojenemisel 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° võrra on vaja soojust 100 korda rohkem kui 1 g soojendamiseks, s. o. 3 cal, 100 g seatina soojendamiseks 50° võrra on aga vaja soojust 50 korda rohkem, s. o. $0,03 \cdot 100 \cdot 50 = 150$ cal.

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

Erisoojus \times keha mass \times 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° võrra vajatakse c cal

m , „ „ „ 1° „ „ „ cm „

m , „ „ „ $t_2 - t_1$ „ „ „ $cm (t_2 - t_1)$ cal.

Seepärast on soojendamiseks temperatuurist t_1 kuni t_2 vajalik soojushulk

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

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

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

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

Korritis cm näitab soojushulka, mis keha saab soojenemisel 1° võrra, või mis ta ära annab jahtumisel 1° 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 mada-

lama temperatuuriga kehadele seni, kuni nende temperatuurid on 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 jahtuvate kehade poolt, on võrdne soojushulgaga, mille on saanud kõik soojenevad 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 kahes erineva temperatuuriga 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:

$$\begin{array}{l|l} \text{Jahtuv keha annab soojushulga} & \text{Soojenev keha saab soojus-} \\ Q = c_2 m_2 (t_2 - \Theta). & \text{hulga} \\ & Q = c_1 m_1 (\Theta - t_1). \end{array}$$

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

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

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

$$\begin{aligned} c_2 m_2 t_2 - c_2 m_2 \Theta &= c_1 m_1 \Theta - c_1 m_1 t_1; \\ c_1 m_1 t_1 + c_2 m_2 t_2 &= c_1 m_1 \Theta + c_2 m_2 \Theta; \\ c_1 m_1 t_1 + c_2 m_2 t_2 &= (c_1 m_1 + c_2 m_2) \Theta; \end{aligned}$$

kust

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

Selle võrrandi tuletas vee kohta Lomonossovi kaasaegne Peterburi akadeemik Richmann.

Esialgsest saadud võrrand (IV-c) kannab soojusliku tasakaalu võrrandi nime.¹

¹ Kõikides järgnevates kalorimeetrilistes võrrandites pole arvesse võetud soojushulka, mis läheb õhu, termomeetri ja teiste kehade soojenemiseks. Samuti pole arvestatud soojusekadu kiirguse teel.

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

$$\Theta = \frac{1 \cdot 100 \cdot 40 + 1 \cdot 160 \cdot 16}{1 \cdot 100 + 1 \cdot 160} = \frac{4000 + 2560}{260} = \frac{6560}{260} \approx 25,2^\circ.$$

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 $t_1 = 16^\circ$, juurde valada vett, mille temperatuur on $t_2 = 80^\circ$, et segu lõpptemperatuur oleks $\Theta = 40^\circ$.

Tähistame $m_2 = x$ ja koostame võrrandi:

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

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 , kalorimeetrisse kallatud vee massi m_2 , ja uuritava keha massi m ; siis soojendasime uuritavat keha, mõõtsime vee ja kalorimeetri algtemperatuuri t_1 , soojendatud uuritava keha algtemperatuuri t , laskime 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 $t_1 < \Theta < t$:

Jahtuva keha poolt antud soojushulk:

$$Q = cm(t - \Theta).$$

Soojenevate kehade poolt saadud soojushulk:

kalorimeetri poolt

$$Q_1 = c_1 m_1 (\Theta - t_1);$$

vee poolt $Q_2 = c_2 m_2 (\Theta - t_1).$

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

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; $t_1 = 16^\circ$; $m = 120$ g; $t = 100^\circ$; $\Theta = 17,4^\circ$; $c = x$:

$$x \cdot 120 (100 - 17,4) = (0,09 \cdot 60 + 1 \cdot 200) (17,4 - 16);$$

$$120 \cdot 82,6x = 205,4 \cdot 1,4; 9912x = 287,56;$$

$$x \approx 0,03; c = 0,03 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{kraad}}.$$

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 keha gaasipõleti leegisse. Raua soojenemise ajal leitakse kalorimeetri mass m_1 (näiteks 90 g — valgevask) ja kalorimeetrisse valatud vee mass ($m_2 = 250$ g) ning mõõdetakse just enne keha kalorimeetrisse laskmist vee ja kalorimeetri algtemperatuur ($t_1 = 16^\circ$). Siis lastakse soojendatud keha kalorimeetri vette ja mõõdetakse segu lõpptemperatuur ($\Theta = 45^\circ$).

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

Tähistame soojendatud keha temperatuuri enne vette laskmist x -ga.

Jahtuva keha poolt antud soojushulk:

$$Q = cm (x - \Theta).$$

Soojenevate kehade poolt saadud soojushulk:

kalorimeetri poolt

$$Q_1 = c_1 m_1 (\Theta - t_1);$$

vee poolt

$$Q_2 = c_2 m_2 (\Theta - t_1).$$

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

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

$$10x - 450 = 7484,9; 10x = 7934,9; x = 793,5; t \approx 793,5^\circ.$$

Harjutus 3.

1. Priimusel on soojendatud 2 l vett 16° -st kuni 100° -ni 15 minuti jooksul. Kui palju neelas vesi soojust ühes minutis (õletada, et soojenemine on ühtlane)?

Vastus: 11,2 kcal.

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

3. 1 kg rauda jahtus 600° -st kuni 24° -ni. Kui palju eraldus seejuures soojust?

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

Vastus: 136 l.

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

Vastus: $\approx 56^\circ$.

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

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

Vastus: 100° .

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

Vastus: $\approx 465\text{ kcal}$.

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 puurimisel 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 eraldavad liigset flogistoni: mõõtmise tulemused aga näitasid, et massiivne rauatükk ning selle laastud evivad ühte ja sama erisoojust.

Rumford tuli järeldusele, et soojus on teatud liikumise vorm.

Järgneva purustava löögi flogistoni teooriale andis Davy (l.: deevi) 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 erisoojust; seepärast ei saanud sulamist seletada flogistoni eraldumisega. Siin tekkis soojus töö arvel.

Jätkamata selle küsimuse arutamist ajaloolises järjekorras, toome mõned paljudest näidetest soojuse tekkimise kohta töö arvel ja töö saamise kohta soojuse arvel. Tõepoolest, on loomulik küsida, milleks muundub keha kineetiline energia neil juhtudel, kui ei ole keha või tema osade edasisi nähtavaid 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 potentsiaalseteks 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 tõttu, s. t. suure hõõrdumise puhul on võimalik laagrite sulamine, pukside põlemine; soojenevad rööpad, mida mööda sõidab rong; soojenevad töö juures saed, hõõvliid, 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 sähvatuslega 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 mehhaanilist tööd soojuseks.

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

Teiselt poolt, soojus võib muunduda tööks. Päikesekiired, soojendades vett või maa kaudu õhku, sooritavad tööd veeauru ja õhu tõstmiseks ning 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 sisepõlemismootorid 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 ümberpöörduvalt; edaspidi meie tutvume sellega, et soojuse juurdevoolu arvel võib saada elektrivoolu, s. o. jälle elektrienergiat.

Need mitmesuguste energialiikide vastastikused üleminekud soojuseks ja ümberpöörduvalt soojusest muudeks energialiikideks, viivad järeldusele, et soojus on energia edasimise viis.

42. **Soojuse mehhaaniline ekvivalent.** Töö ja soojuse vastastikutuste 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 edasiandmise viis.

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

Soojuse mehhaaniliseks ekvivalendiks on suurus, mida mõõdetakse selle tööhulgaga, mida tuleb kulutada, et saada ühte soojushulga ühikut.

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

$$I = \frac{A}{Q} \quad (V)$$

Saksa arst Robert Mayer (l.: maier) määras 1842. a. (teoreetiliselt) soojuse mehhaanilise 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 (l.: džeims džaul), kes oma tööd alustas 1840. a.

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

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

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

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

Soojuse mehhaanilise ekvivalendi pöördarvu nimetatakse töö termiliseks ekvivalendiks.

Töö termiliseks ekvivalendiks on suurus, mida mõõdetakse selle soojushulgaga, 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:

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

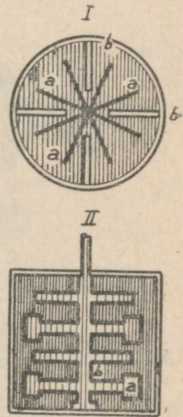
$$B = 0,00234 \frac{\text{kcal}}{\text{kGm}} \text{ ehk } B = 0,24 \frac{\text{kcal}}{\text{kdž}} \text{ ehk } 0,24 \frac{\text{cal}}{\text{dž}}.$$



Joule¹ (1818—1889).

43. Soojuse mehhaanilise ekvivalendi määramine Joule'i poolt.

Soojuse mehhaanilise ekvivalendi katselise mõõtmise viis läbi inglise füüsik Joule (1847. a.). Joule'i meetodi järgi muundub hõõrdumise ületamiseks tehtud töö soojuseks. Soojuse mehhaanilise 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 väljaulatavate osade *b* vahele. Kalorimeeter täidetakse vedelikuga, näiteks elavhõbedaga. Pöörlemisel panevad labad elavhõbeda liikuma; liikumise ajal toimub elavhõbedas hõõrdumine ja ta soojeneb. Kalorimeetrisse asetatud termomeetri abil mõõdetakse esialgne temperatuur t_1° , ja lõpptemperatuur t_2° . 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 mõõtejoonlaudade *B* ja *G* abil. Päris langemise alguses on koormuste liikumine kiirenev, kuid ta muutub



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

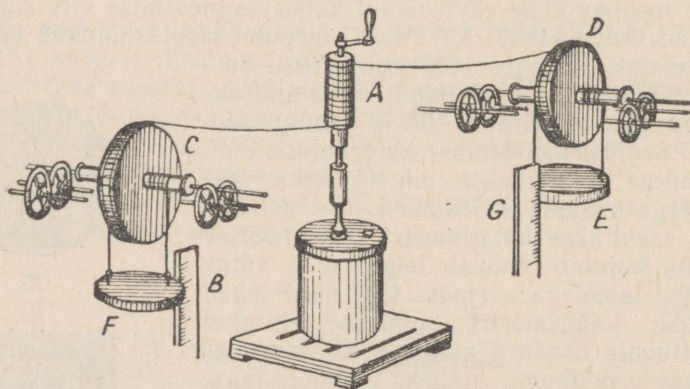
¹ J. P. Joule — inglise füüsik, tuntud rea eksperimentaalsete uurimiste poolest mitmest füüsika osast.

õige ruttu ühtlaseks. Kui koormused üldise kaaluga $2P$ langevad h meetri ulatuses, siis on sooritatud töö $A = 2Ph$ (koormuste kerget lööki pööranda vastu ei arvestata).

Koormuste ühtlasel langemisel kulutatud töö muundub hõõrdumise läbi soojuseks. Kui tähistada elavhõbeda massi m -ga, kalori-meetri, telje ja labade massi m_1 -ga, elavhõbeda erisoojust c -ga ja metalli erisoojust c_1 -ga, siis saadud soojushulk on $Q = mc(t_2 - t_1) + m_1c_1(t_2 - t_1) = (mc + m_1c_1)(t_2 - t_1)$; siit võib arvutada:

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

44. Energia muundumise ja jäävuse seaduse laiendamine soojusnähtustele. Looduse nähtustes toimub alati mehhaanilise energia ja soojuse vastastikune muundumine. Täpsed teaduslikud mõõtmised näitasid, et need üleminekud toimuvad alati kindlas vahekorras.



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

427 kGm-ne mehhaanilise 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.

Soojusnähtuste tundmaõppimine sellelt seisukohalt lubab energia jäävuse seadust, mis on kehtiv mehhaanilistes 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 ühesuurustes hulkades.



Lomonosov (1711—1765).

Energia muundumise ja jäävuse seadusel on suur metodoloogiline väärtus. Selle seaduse alaline rakendamine üksikute nähtuste arutelus loob kindla usu kõikide loodusnähtuste muutumatuks seaduspärasustesse ja õpetab rangelt teaduslikult mõtlema.



Mayer (1814—1878).



Helmholtz (1821—1894).

Mõtte teaduslik suund on paremaks toeks võitluses religioosse suhtumisega maailmasse. Religioon eeldab olendi olemasolu, kes segab end loodusnähtustesse, mõjutab inimese elu ja loodusnähtuste käiku. Siit siis tuleb kõikides religioonides esinev usk imesse kui selle olendi tahte väljendisse. Energia jäävuse seaduse ja kõikide loodusnähtuste seaduspärasuse üldise iseloomu alusel kasvatatud mõte ei leia looduses kohta jumalale ja imele. Sellesamaga

lүүaksegi pind alt religioonil kui usul kõrgemasse olendisse ja imel kui tema tahte väljendusel.

Energia jäävuse seaduse väljendas teaduses esimesena M. Lomonossov¹. Selle looduse põhilise seaduse edasisel väljatöötamisel ja põhjendamisel etendasid tähtsat osa R. Mayer², H. Helmholtz³ 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. Leidke katsekeha mass.

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 välimisse.

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

¹ Lähemalt M. Lomonossovist vaata § 63.

² Mayer, Julius Robert (1814—1878) — saksa arst ja füüsik. Avaldas 1841.—1842. a. tööd, milledes 100 aastat pärast Lomonossovit väljendas ja kaitses energia jäävuse mõtet. Seda mõtet Mayer rakendas mõningate organismis toimuvate protsesside seletamiseks. Tema tuletas esimesena teoreetiliselt soojuse mehhaanilise 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 resonantsiõpetusele, andis hääle tämbri, dissonantsi ja konsonantsi seletuse, tegi omaleiutatud resonaatorite abil vokaalide analüüsi ja hiljem heliharkide abil helide sünteesi.

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

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

10. Saadud andmete järgi arvutage aine erisoojus.

11. Võrrelge saadud resultaati tabeli andmetega ja avaldage vee 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 soojenenud 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 soojendatud keha temperatuuri määramine kalorimeetrisel viisil.

Töövahendid: 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 kalorimeetrise külma vett.
3. Kaaluge ära kalorimeeter ühes veega ja määrake vee mass.
4. Kaaluge metallitükk.
5. Võtke metallitükk, keerake talle traat ümber ja hoidke teda piirituslambi leegis.
6. Soojendage mitu minutit.
7. Segades vett kalorimeetris, määrake tema temperatuur.
8. Kohe pärast vee temperatuuri määramist nihutage kalorimeeter leegile ligemale ja laske soojendatud metallitükk ruttu vette.
9. Viige kalorimeeter leegist eemale ja segades vett segajaga, määrake lõpptemperatuur.
10. Missugune oli metalli temperatuur enne vette laskmist?

47. Soojuse allikad. Me nägime, et soojust võib saada kulu-
tatud töö arvel. Löökk, hõõrumine, kokkusurumine, painutamine ja
teised mehhaanilised toimingud muundavad mehhaanilise energia
töök.

Suur osa soojusest Maa peal saadakse Päikese kiirgusenergiast.
Kiirgusenergiaks nimetatakse energiat, mis kehadest väljub kiirte
näol. Kui keha temperatuur tõuseb üle 500°, siis osa tema kiirgus-
energiast avaldab mõju silmale ja seda tajutakse valgusena (sel
juhul punase valgusena). 1200°-st kõrgemal temperatuuril see
energia osa, mis avaldab mõju silmale, tekitab valge valguse
muljet¹.

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 maapinna
1 cm²-le 1 minutis keskmiselt umbes 1 kalor või 4,19 dž kiirgus-
energiat. Umbes sama suur hulk Päikese kiirgusenergiast, mis
jõuab Maani, absorbeeritakse atmosfääri mitmesuguste kihtide
poolt². Võib kujutella, kui suur on kogu kiirgusenergia hulk, mis
langeb tervele maapinnale aasta jooksul. Võrreldes Päikese kiirgu-
suga on tähtede kiirgusenergia tühine³.

Tunduv osa Päikese kiirgusenergiast kaob ilma kasu toomata

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

² Atmosfääri piirile langeb 1,94 $\frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{ min.}}$ («päikese konstant»).

³ Kõikidelt planeetidelt ja kinnistähtedelt Maa peale langevate kiirguste
osad kokku moodustavad Päikese kiirgusest $\frac{1}{30\,000\,000}$ (Newcomb'i järgi).

Maa sisemusest tulev soojusvool moodustab iga ruutsentimeetri kohta Maa
pinnast ainult 55 väikest kalorit aastas, s. o. umbes ühe kümnetuhandiku
päikesekiirgusest, mis langeb samale pinnale.

inimestele ja Maale; ta peegeldub Maalt, minnes tagasi maailma-ruumi.

Teine osa absorbeeritakse Maa poolt ja muundub temas soojuseks; selle, Maa poolt absorbeeritud päikeseenergia arvel püsib 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 ojadest ja jõgedes.

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

Hüdrauliline võimsus (voolava vee võimsus) maakeral on umbes 800 000 000 HJ. Oma tootmistegevuses tarvitavad inimesed laialt ja hakkavad edaspidi veel laiemalt tarvitama vee ja tuule kineetilist energiat masinate liikumapanemiseks. Niisiis võib järelikult öelda, et nad oma tuule- ja veeseadistes lõppkokkuvõttes kasutavad päikeseenergiat.

Meil Nõukogude Liidus on juba rakendatud tööle paljud jõujaamad vee energia kasutamiseks, nende hulgas ka niisugune grandioosne nagu Dnepri jõujaam; on ettevalmistusel veel grandioossemad — Volgal ja Angaral¹.

Soojus, milleks muundus päikese neeldunud kiirgusenergia, muundub osaliselt jällegi kiirgusenergiaks ja kiirgab Maalt tagasi maailma-ruumi. See avaldub Maa temperatuuri langemises nendel aegadel, millal on vähenenud või täiesti lakanud päikeseenergia langemine Maa peale, s. o. talvel ja öösel.

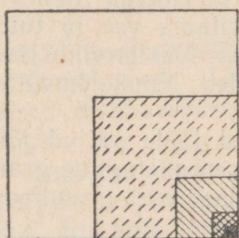
Elmisega võrreldes väike osa Maale langevast kiirgusenergiast muundub iseliiki energiaks, keemiliseks energiaks.

Keemiliseks energiaks nimetatakse ainete keemiliste protsesside juures ilmnevat energiat. Nii näiteks vajab süsihappegaasi molekul kooste-osadeks lagunemiseks suurt energiahulka (umbes 8000 cal iga süsiniku grammi kohta). Sellepärast 1 süsiniku ja 2 hapniku aatomil, olles võimelised teineteisega ühinema, on energia varu (potentsiaalse energia liiki), mida nimetatakse keemiliseks energiaks. Vesiniku aatomite eraldamiseks kloori aatomitest kulub 600 cal energiat iga kloorvesiniku grammi kohta. Vesiniku aatom ja kloori aatom, omades tungi ühineda, omavad keemilise energia varu. Nende ühinemise ajal muundub keemiline energia soojuseks ja iga kloorvesiniku grammi tekkimisel eraldub 600 kalorit soojust. Nii ka teistes keemilistes nähtustes toimub kas energia neelamine väljastpoolt või ümberpöörduvalt, kehad annavad ära oma keemilise energia peaaesjalikult soojuse näol (soojuse kaudu ka teiste energia-liikidena).

¹ Vastavalt NSV Liidu Ministrite Nõukogu määrusele on alanud grandioosete elektrijõujaamade ehitamine Volgale ja Dneprile. Volgale rajatakse lähemate aastate jooksul Kuibõševi ja Stalingradi hüdroelektrijaam ja Dneprile Kahhovka hüdroelektrijaam. Ehitatavad hüdroelektrijaamad on grandioossemad Dneprogesist. (Toimetaja.)

Klorofülliterade poolt neelatud kiirgusenergia toimel lagunevad selle aine molekulid, mis on tekkinud õhu süsihappegaasi tungimisel terasse. Seejuures eraldub hapnik, süsinik aga moodustab taimedes valkusid, rasvasid ja süsivesikuid. Süsiniku ja hapniku keemilise suguluse tõttu saavad need kehad keemilise energia kandjaks 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, andes üle 8000 cal soojust põlemisprotsessist osavõtva süsiniku iga grammi kohta.



Joon. 43. Päikeseenergia ärakasutamine.

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 aeglaselt keemiliste protsesside tulemusena taimede jäänustest, nafta aga ka loomade jäänustest — hapniku puudumise ja suure surve all olemise tingimustes. Nende põhiline põlevaine sisaldab keemilise energia tagavara, mis sinna on kunagi kogunenud Päikese kiirgusenergiast.

Seega samuti kui vee ja tuule energia on ka kütuse energia päikese muundunud energia.

Kuid taimed omandavad ainult tühise osa neile langevast päikeseenergiast. Taime hoogsa kasvamise perioodil võib roheline leht omandada kõige rohkem 8% temale langevast kiirgusenergiast (8% on füsioloogiline piir). Keskmiselt langeb see kuni 2%-ni (2% on omandamise 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 ärakasutamist taimede poolt võib kujutada järgmise diagrammiga¹ (joon. 43).

Ruudu kogu pindala kujutab maismaale langevat päikeseenergiat; kriipsudega 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 rist-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.

¹ Raamatust В. М. Шульгин, Энергия Солнца.

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

Taimede kaudu teeb päikeseenergia veel teisegi muundumiskäigu. Taimed on toiduks loomadele ja taimedes varutud päikeseenergia muundub looma organismi energiaks. Kiskjad loomad, toitudes teistest loomadest, ammutavad endale energiat nendes varutud päikeseenergiast. 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 akumulunud päikese kiirgusenergiat tema poolt tarvitatava taim- ja liha- toiduna. Need ühendid oksüdeeruvad sissehingatud hapniku toimel, seejuures muundub keemiline energia organismi sisemiseks energiaks. Viimane muundub organismi enese eluliste protsesside (hingamine, vereringvool jt.) energiaks; tähelepanev osa sellest kiirgub ümbritsevasse ruumi (selle vähendamiseks tarvitame riideid ja elamuid), kulub sissehingatava õhu soojendamiseks ja ihu pinnalt vee auramiseks. Ainult väike osa saadud soojusenergiast (15—20%)¹ muundub kasulikuks tööks.

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, eraldab kindla arvu kilokaloreid. Viimast arvu nimetatakse toidu soojusväärtuseks ehk kaloorisuseks.

Kütuse soojusväärtuseks nimetatakse seda kilokalorite arvu, mille annab põlemisel 1 kg kütust.

Toidu kaloorisuseks nimetatakse seda kilokalorite arvu, mille annab 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 nii-nimetatud leppekütus (tingkütus) soojusväärtusega $7000 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$.

Järgnevas tabelis² on antud mitmesuguste kütuseliikide soojusväärtused ja nende võrdlus leppekütusega (kalorilised ekvivalendid).

¹ Lühematel ajavahemikkudel võib muunduda tööks rohkem soojust.

² Tabel on koostatud raamatu «Справочник технической энциклопедии т. III» andmetel.

Kütuse liik	Soojusväärtus kilokalorites 1 kg kohta	Ekvivalent
Leppekütus	7000	1,00
Donetsi 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
Põletuspuud	3005	0,43
Turvas (keskmiselt kõigi rajoonide kohta)	3500	0,50
Surahhanõ nafta	10900	1,50
Balahna „	10500	—
Bensiin	11230	—
Petrool	11000	—
Masinaõli	10899	—
Põlevad gaasid	8000—9000	—

Harjutus 4.

1. Esitada järvepinnale langenud päikeseenergia võimalikkude muunduste rida.

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

3. Leida priimuse kasutegur, kui 16° algtemperatuuriga 3 l vee keemajamiseks 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 (soojuväärtus 10 500) 240 HJ-lise aurumasina töötamisel kasuteguriga $\eta = 12\%$?

Vastus: ≈ 72 kg.

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

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 muundab? Seatina erisoojus on $0,03 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{kraad}}$.

Vastus: $\approx 160^\circ$.

8. Kui palju maksab ühe liitri vee soojendamise 20°-st kuni 100°-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 kWh maksab 2,5 kop.?

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

Vastus: $\approx 8,5$ HJ.

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

Vastus: ≈ 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 $l = 100 \text{ cm}$; hooratta pöörete arv minutis on 60, 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 $5,6 \text{ m}^3$ vett kiirusega $2,4 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$, ja missugune soojushulk sekundis tekitab sama suure võimsuse?

Vastus: ≈ 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: ≈ 632 kcal.

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

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

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 kaloorisus?

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 ühikute 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 jahtumisel äraantava soojushulga valem?
7. Mis on kalorimeetiline 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 mehhaaniliseks ekvivalendiks?
11. Missugustes erinevate süsteemide ühikutes väljendatakse soojuse mehhaanilist ekvivalenti?
12. Mida nimetatakse töö termiliseks ekvivalendiks?
13. Missugustes erinevate süsteemide ühikutes väljendatakse töö termilist ekvivalenti?
14. Milles seisab Joule'i meetod soojuse mehhaanilise 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. Kuidas arvutatakse ja missuguse valemiga väljendatakse kütuse põlemisest saadud soojushulka?

Kirjandus. Сахаров Д. И., Теплота в природе и технике, гл. I—IV. Перельман, Физическая хрестоматия, кн. I, статьи: Обманчивость тепловых ощущений, Теплопроводность, Температура подземелий, Потеря теплоты лученспусканием, Теплоёмкость воды, Медный и фарфоровый чайник, Вода — регулятор климата, Теплота и работа, Чем мы греемся зимой?, Источники энергии в древности и в наше время, Источники энергии животных.

2. Kehade paisumine soojenemisel.

49. Kehade joon- ja ruumpaisumine. Arvukad katsed näitavad, et iga aine muudab temperatuuri muutumisel muude võrdsete tingimuste juures eri moodi oma mõõteid. Kui näiteks 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 eri moodi: vask rohkem kui raud.

Kuna igal ainel on isesugune paisumine, siis selle omaduse

iseloomustamiseks võetakse tarvitusele erilised suurused, mida nimetatakse paisumise koefitsientideks.

Paljudel tahketel kehadel (rööpad, torud, traat jne.) on selline kuju, et nende 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 puhul, mis on alati suletud anumatesse, vaadeldakse ruumpaisumist, see on ruumala muutumist.

Mis puutub vedelikkude ja gaaside paisumisse, siis nende soojendamisel anumas võib näha ainult niinimetatud näivat



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

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 joonpaisumise koefitsiendi mõõtmine.

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

Töökäik. 1. Mõõtke mõõtejoonlaua abil 1 mm täpsusega toru algpikkus l_0 , ühest otsast kuni plaadini, märkige ära esi- algne toru (toa) temperatuur t^0 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 näidu tabelisse.

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

4. Umbes kümne minuti möödudes, kui võib arvata, et toru on võtnud keeva vee temperatuuri¹, mõõtke varbsirkliga plaatide välimiste äärte kaugus ja kandke see näidu tabelisse. Samuti kandke tabelisse toru lõpptemperatuur t_2° , võttes selle võrdseks keeva vee temperatuuriga, s. o. 100° ².

5. Lahutades varbsirkli lõppnäidust esialgse, saate kätte toru pikeneduse; arvutage toru temperatuuri muutus katse jooksul.

6. Arvutage toru pikeneduse 1° kohta.



Joon. 45. Lermantovi katseriist joonpaisumise koefitsiendi määramiseks.

7. Arvutage algpikkuse iga ühiku pikeneduse soojenemisel 1° võrra.

Toru aine	Algtemperatuur t_1°	Algpikkus l_0	Varbsirkli algnäit	Lõpptemperatuur t_2°	Varbsirkli lõppnäit	Pikkuse juurdekasv Δl	Temperatuuri muutus $t = t_2 - t_1$	Pikkuse juurdekasv 1° kohta, s. o. $\frac{\Delta l}{t}$	Pikkusühiku juurdekasv soojenemisel 1° võrra, s. o. $\frac{\Delta l}{t_0}$	Viga protsentides

8. Võrrelge arvutatud koefitsiendi tabeli omaga ja määrake vee suurus protsentides. Seejuures pidage meeles, et katses algpikkuseks oli võetud pikkus toatemperatuuri, mitte aga 0° juures.

9. Tehke sama katse teisest ainest toruga.

51. Tahkete kehade joonpaisumise koefitsiendi valem. Kui meie teame, 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 pikeneduste absoluutväärtuste 0,36 ja 0,31 järgi meie ei saa otseselt võrrelda nende ainete pikenedust. Võrdlemine oleks võimalik, kui me pikkuse muutumise viiksime ühele ja samale algpikkusele ja ühe-

¹ Et selles veenduda, võib varbsirkliga korduvalt mõõta plaatidevahelist kaugust. Kui see vahe lakkab muutumast, siis toru on võtnud keeva vee temperatuuri.

² Toru jahtumise vältimiseks mähkige ta ümber vildi.

sugusele temperatuuri muutusele. Arvutame, missuguse meetri osa võrra muutub ühe või teise aine iga meeter soojenemisel 1° võrra:

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

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

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 aimest varva pikkus l_0 temperatuuriga 0°. Siis mõõdetakse tema pikkus l_t temperatuuriga t° . Vahe $l_t - l_0$ annab terve varva pikkuse juurdekasvu soojenemisel t° 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 algpikkuse ühik soojenemisel 0°-lt 1° 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 väikesed¹:

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

52. Mistahes temperatuuri juures võetud keha pikkuse valem.

Joonpaisumise koefitsiendi valemist $\alpha = \frac{l_t - l_0}{l_0 t}$ võime leida, et $l_t = l_0 + \alpha t l_0$ ehk

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

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

Kakskliiget $1 + at$ nimetatakse joonpaisumise binoomiks. Seega keha pikkus mistahes temperatuuril on võrdne pikkusega 0° temperatuuril, korrutatud joonpaisumise binoomiga.

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

Näiteid. 1. Terastala pikkus temperatuuril $t_1 = 15^\circ$ on $l_{15} = 10,5$ m; leida tema pikkus l_{50} temperatuuril $t_2 = 50^\circ$.

Lahendus üldisel kujul:

$$l_{t_1} = l_0(1 + at_1); l_{t_2} = l_0(1 + at_2);$$

$$l_{t_2} = \frac{l_{t_1}(1 + at_2)}{1 + at_1}; l_{t_2} \approx l_{t_1}[1 + a(t_2 - t_1)]^1;$$

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

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

$$l_{t_2} = l_0(1 + at_2); l_{t_1} = l_0(1 + at_1); l_{t_2} - l_{t_1} = l_0a(t_2 - t_1);$$

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

53. Keha ruumpaisumise koefitsiendi valem. Ruumpaisumise koefitsiendiks nimetatakse arvu, mis näitab, missuguse osa võrra muutub 0° temperatuuril võetud algruumala iga ühik soojenemisel 1° võrra.

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

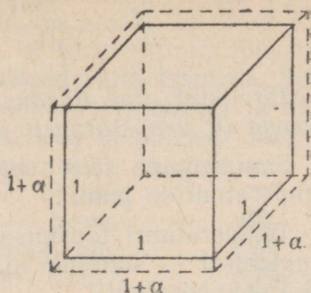
$$\beta = \frac{V_t - V_0}{V_0 t}.$$

Jahtumisel 1° võrra iga pikkuse- või ruumalaühik väheneb suuruse võrra, mis on arvuliselt võrdne joon- või ruumpaisumise koefitsiendiga. Sellise meetodiga arvutatakse ruumpaisumise koefitsiendid vedelikkudel ja gaasidel.

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

¹ $1 + at_2$ jagamisel $1 + at_1$ -ga on jagatistes piiratud kahe liikmega.

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



Joon. 46.

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 (oliivi-)	0,00050	Eeter	0,0017

54. Mistahes temperatuuril 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

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

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

Siit — ruumala mistahes temperatuuri puhul on võrdne ruumala 0° puhul korrutatud ruumpaisumise binoomiga.

55. Keha tiheduse muutumine temperatuuri muutumisega. Keha tihedust mõõdetakse tema massiga ruumühikus. Kui keha massil m on 0° temperatuuril ruumala V_0 , siis samal massil on temperatuuri t° puhul ruumala $V_t = V_0 (1 + \beta t)$. Kui tähistada selle aine tihedust 0° puhul D_0 -ga ja temperatuuri t° puhul D_t -ga, siis

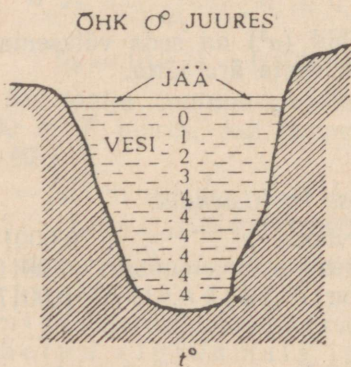
$D_0 = \frac{m}{V_0}$ ja $D_t = \frac{m}{V_0(1 + \beta t)}$, kuna keha mass ei muutu temperatuuriga; siit:

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

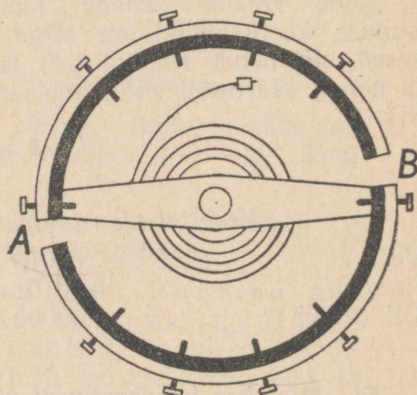
Järelikult aine tihedus mistahes temperatuuril on võrdne tihedusega 0° temperatuuril jagatud ruumpaisumise binoomiga.

Samasugune seos seob ka kehade erikaalusid mitmesuguste temperatuuride puhul.

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



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



Joon. 48. Kella kompensatsioon-balanssratas.

Soojenemisel üle 4° ja jahtumisel 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 pinna lähedale, ei lange mitte alla. Sellepärast korraldub talvel sügavamates veekogudes temperatuuri jaotumine umbes nii, nagu näidatud joonisel 47, mis kindlustab loomade ja taimede olemasolu vees külma aja jooksul.¹

56. Soojuspaisumise kasutamine tehnikas. Peale paljude näidete, mis on toodud algkursuses soojuspaisumise tehnilise kasutamise kohta, peatume järgmiste juures:

1. *Kella kompensatsioon-balanssratas.* Uleminekul talvisest temperatuurist suvisele täpse kella balanssratas (joon. 48) laieneks, raadius suureneks ja kell hakkaks taha jääma. Et hoida kella

¹ Jõgedes rikub sellist temperatuuri jaotumist veevoolu tõttu tekkiv kihide segunemine.

käiku muutumatuna, tehakse ratta pöid kahest poolrõngast ja kinnitatakse diameetritele AB . Poolrõngad on kokku needitud kahest erinevast metallist sellise arvestusega, et temperatuuri tõusmisega poolrõngaste vabad otsad natuke ligineksid ratta tsentritele. Sellega kompenseeritakse diameetri AB paisumine soojenemisel ja säilitatakse balanssringi kui pendli mehhaanilised omadused. Sel viisil kindlustatakse kella ühtlane käik temperatuuri muutumisel.

2. *Termoregulaator*. Temperatuuri ühtluse hoidmiseks spetsiaalsetes kappides — termostaatides, mida soojendatakse elektrivoolu abil, kasutatakse bimetallist (kahest metallist) termoregulaatorit, mille konstruktsioonidest üks on kujutatud joon. 49. Kahest eri viisil paisuvast metallist kokkuneeditud ja spiraaliks keeratud riba liikuv osa on varustatud kontaktiga, mis lüübib sisse termostaadi soojendaja, kui temperatuur langeb allapoole kindlaksmääratud. Niipea kui termostaat ja selles asuv termoregulaator soojenevad tarviliku temperatuurini, spiraal kõverdub, liikuv kontakt eemaldub mitteliikuvast vasakule ja soojenemine lakkab. Nii võib hoida automaatselt peaaegu konstantset temperatuuri.



Joon. 49. Bimetallilise riba kasutamine signaalseerijana.

Sama riista võib gradueerida kui termomeetri. Teda võib kasutada tulekahju signaalseerijana, mis suleb elektri ahela tulekahjust tingitud temperatuuri tõusmisel ja annab signaale tuletõrjele.

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

Harjutus 5.

1. Tooge igapäevases 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° temperatuuril on kõige tihedam?

6. Missugune mõte füüsika seisukohast on paisumisbinoomidel?

7. Terasrööpa pikkus on 0° temperatuuril 8 m. Kui palju muutub tema pikkus temperatuuri muutudes -25° -st kuni $+35^\circ$ -ni?

Vastus: $\approx 5,76$ mm.

8. Terasrööpa pikkus 35° temperatuuril on 8,00336 m. Selle temperatuuri

puhul on rööpad teineteisest 2 mm kaugusel. Missugune vahemaa tekib rööbaste vahele -15° temperatuuril?

Vastus: 6,8 mm.

9. Telegraafi raudtraadil on lühim pikkus 20 m-sel postide vahemaal -30° temperatuuril. Kui palju ta pikeneb soojenemisel kuni $+32^{\circ}$?

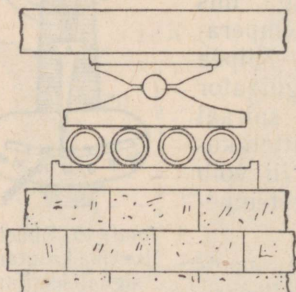
Vastus: 15 mm.

10. Dnepri sild Kiievi juures on 0° temperatuuri puhul 1082 m pikk. Kui palju muutub silla pikkus temperatuuri muutudes -10° -st kuni $+20^{\circ}$ -ni?

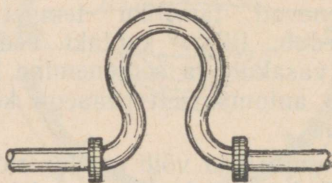
Vastus: 35,7 cm.

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

Vastus: 188 g.



Joon. 50. Metallsilla rulltoed.



Joon. 51. Aurujuhtmete elastsed kompensatorid.

12. Arvutada 0° -se vee tihedus.

Vastus: 0,9993.

13. Arvutada 1 dm³ vase mass 400° temperatuuriga ($D_0 = 8,9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)

Vastus: 8,83 kg.

14. Seatinatüki ruumala on 0° temperatuuril 100 cm³ ja 200° temperatuuril 101,74 cm³. Leida seatina joonpaisumise koefitsient.

Vastus: 0,000029.

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

Vastus: 7,6 cm³.

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

Vastus: 370° .

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?

KONTROLLKUSIMUSI.

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 tihedus ja erikaalu muutus temperatuuri muutumisel?

Kirjandus. Перельман, Физическая хрестоматия, кн. I стр. 129—153.
Статьи: Выпрямление наклонных стен здания, История термометра, Термометры и их устройство, Тепловое расширение воды.

III. Molekulaarsed nähtused gaasides, vedelikkudes ja tahketes keha-des.

1. Molekulaar-kineetilise teooria alused.

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

Molekuliks nimetatakse väikseimat iseseisvalt eksisteerivat ainehulka, mis evib samu põhilisi keemilisi omadusi nagu seesama aine suuremas koguses.

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-kuupmeetrisel ruumis. Samuti haistame juba suures kauguses igasugust tugevasti lõhnavat gaasi (näit. kloori), mida on kasutatud keemia laboratooriumis. Kui jätta tuppa mõned kristallikesed naftaliini, mida tarvitatakse villaste esemete kaitsmiseks koide vastu, siis selle lõhn annab end veel kaua tunda 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 cm³ 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 ja omakorda jagunevad komponentideks.

Sel viisil osalt elulised vaatlused, peamiselt aga teaduslikud uurimused viivad meid järeldusele, et aine, sõltumata oma olekust 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 ühtib paljude teaduslike andmetega, et kõik tahked, vedelad ja gaasilised kehad koosnevad molekulidest.

Teaduslikud arvutused näitavad, et molekulide mõõted on väga väikesed — kümnendikud millimikronist¹. Normaalsel rõhul ja 0° temperatuuril sisaldab 1 cm³ õhku $2,7 \cdot 10^{19}$ molekuli.

Teooriat, mis seletab aine omadusi ja aines ilmnevaid nähtusi aine molekulilise ehituse alusel, nimetatakse molekulaarteooriaks.

Ehkki molekul on kättesaamatu vahetuks vaatlemiseks silmaga või optilise seadmega², kuid järeldusi, mida tehakse selle teooria põhjal, on kontrollitud paljude katseliste uurimustega.

Molekul omakorda jaguneb osakesteks, mida nimetatakse aatomiteks.

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

Aatom ise on väga keerulise ehitusega, nagu see on teaduslikult selgitatud XX sajandil. Tema ehitusest võime saada kujutlust ainult pärast seda, kui oleme tutvunud aatomi koostesadega kursuse edaspidistes peatükkides.

58. Keha molekulid on eraldatud üksteisest vahemikkudega.

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 vahemikkudega. Vastuse annavad vaatlused ja katsed.

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

¹ 1 millimikron ($m\mu$) = 0,001 mikronit (μ) ehk 0,000001 mm.

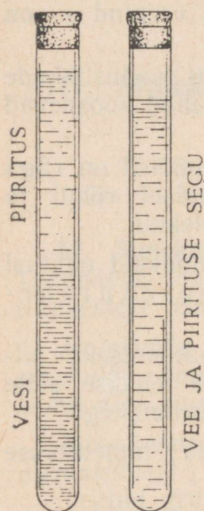
² Hiljuti on leiutatud erilise riist, niinimetatud «elektronmikroskoop», mille abil on võimalik fotograferida suuremaid molekule. Üheks selliseks molekuliks on valgu molekul suurusega $43 \cdot 10^{-8}$ cm ($10^{-8} = \frac{1}{10^8}$).

2. Rõhu suurenemisel kõikide kehade kokkutõmbumine, mis on väga suur gaasides ja palju nõrgem vedelikkudes ja tahketes kehaes, saab kergesti arusaadavaks, kui oletame vahemikkude olemasolu, ja on raskelt seletatav, kui oletada, et aine täidab pidevalt kogu ruumala.

3. Peale kokkutõmbumise viivad ka teised keha kuju muutused — nihe, paine, vääne — mõttele tühjade vahemikkude olemasolust molekulide vahel.

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

5. Ka järgmine katse ilmutab vahemikkude olemasolu molekulide vahel.



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

Täidame 1 m pikkuse ja 2 cm diameetriga klaastoru (joon. 52) poolenisti veega, peale aga valame ettevaatlikult värvitud piiritust nii, et selgesti oleks näha eraldumise 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 übergroupeerumisele tihedamalt koostatud gruppideks, mis aga on võimalik ainult tühjade vahemikkude olemasolu puhul molekulide vahel.

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

59. Kohesioon. Kui kehad koosnevad üksikutest vahemikkudega 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 murda klaaspulka, ära raiuda laua küljest puutükki, katki rebida metalltraati ja üldse ühel või teisel viisil lahutada tahke keha ühte osa teisest.

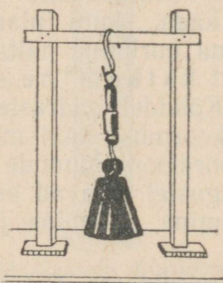
See nähtus osutab sellele, et molekulide vahel eksisteerivad jõud, mis hoiavad neid teatud kaugusel üksteisest. Keha molekulide vahelist vastastikuse mõju jõudu nimetatakse *kohesiooniks*¹.

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

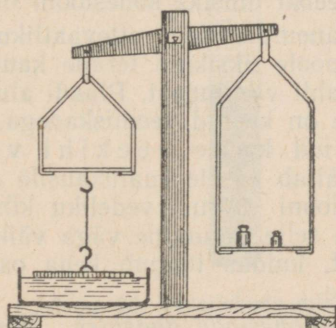
Kui katsuda taastada katkimurtud keha terviklust, pannes temale külge eraldunud osa, siis see harilikult ei õnnestu; sellest järeldub, et kohesioon tuleb ilmsiks ainult kaduvväikestel kaugustel; sellest kaugemal ta kahaneb ni ruttu, et teda ei saa enam kindlaks teha.

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.

Sfääri, mis haarab kõik molekulid, milledele mõjub tsentris asuva molekuli kohesioon, nimetatakse molekulaarse mõju sfääriks. Katseliste andmete põhjal tehtud arvutuste järgi on molekulaarse mõju sfääri raadius väiksem kui $6 \cdot 10^{-6}$ cm¹.



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



Joon. 54. Vedeliku kihtide vahel on olemas kohesioon.

Kuid kas ei ole võimalik katselisel teel kindlaks teha kohesiooni jõu mõju keha osade küllaldasel lähendamisel?

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

Kui lõikekoht ei ole veel jõudnud oksüdeeruda² ja õhu vahekiht on välja tõrjutud, siis ühinevad mõlemad osad üheks terveks. Nüüd võib silindri riputada ülemist rõngast pidi kanduri külge (joon. 53), alumise rõnga külge aga panna koormusi, ja silinder kannab kaunis suurt koormatist ilma lahti minemata.

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

² Kui aga on toimunud oksüdeerumine või pind on muutunud ebapuhtaks, peab pinda noaga hoolikalt puhtaks kaapima.

Samuti võib esile kutsuda kohesiooni ka teistes pehmetes keha-
des — vahas, kautšukis jts.

Kui hästi poleerida kaks klaasplaati või hoolikalt lihvida kaks
terasplaati ja panna nad teineteise peale, siis nad kleepuvad
kokku ja võivad teineteist kinni hoida. Klaasplaadi kinnihoidev
jõud ulatub kuni 6 kG ühe ruutsentimeetri kohta.

2. *Kohesioon vedelikkudes.* Et avastada kohesiooni vedeliku
molekulide vahel, riputame ühe kaalukaasi külge niidi otsa hooli-
kalt puhastatud klaasplaadi nii, et see ripuks horisontaalselt.
Olles teda kaaludel tasakaalustanud, lähendame temale altpoolt
anuma veega kuni vee kokkupuutumiseni klaasiga (joon. 54). Kui
ettevaatlikult lasta anum allapoole, siis klaasplaat, vee poolt
külgetõmmatuna, samuti laskub alla ja kaalude tasakaal kaob,
mis teebki ilmsiks kohesiooni olemasolu.

Paneme väga ettevaatlikult teisele kaalukaasile haavleid
(lõpupoole üksikute terade kaupa) nii kaua, kuni plaat kisub
end lahti veepinnast. Plaadi alumise pinna uurimine näitab meile,
et see on kaetud veepiiskadega, järelikult katkemine on toi-
munud kahe veekihi vahel. Kõikidel säärastel juhtu-
del näitab teisele kaalukaasile asetatud koormuse kaal molekulide
kohesiooni suurust vedeliku kihtides. Kohesiooni jõudude olemas-
olu ja selle ilmumine väga väikestel kaugustel lubavad aru saada
sellest, kuidas toimub keha osade liimimine, jootmine ja keevi-
tamine.

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

60. Difusioon. Loomulik on küsida: kas on molekulid muutu-
matute väliste tingimuste puhul üksteise suhtes paigalolekus, või
toimub ka sel juhul nende suhteline ümberasetumine.

Katsed näitavad, et väga paljudel juhtudel kahe erisuguse
keha molekulid, kui need kehad on viidud kokkupuutumisse, lähe-
vad üle kehadevahelise piiri.

Ühe keha molekulide tungimist teise kehasse mingi välise jõu
mõjuta nimetatakse difusiooniks¹.

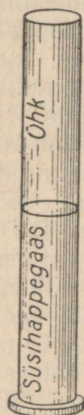
Tutvume nüüd difusiooninähtustega kehade erinevate olekute
juures.

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

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

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

Lühikese ajavahemiku järel saadakse mõlemas anumal ühtlane 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.



Joon. 55. Gaaside difusioon.



Joon. 56. Vedelikkude difusioon.

2. *Vedelikkude difusioon.* Et vaadelda vedelikkude difusiooni, täidame klaassilindri poolenisti puhta veega, siis aga valame põhjani ulatuva toru abil ettevaatlikult silindrisse mingi värvilise soola, näit. vasevitrioli kanget lahust. Asetame katseriista ilma tõugeteta kindlale alusele, kus ta oleks täitsa liikumatult.

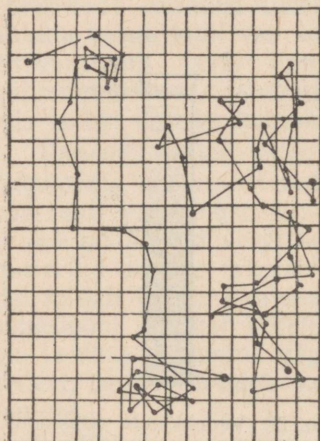
Alguses on lahuse ja vee vaheline piir väga terav; mõne päeva pärast hakkab vesi piirile lähimas kihis sinetama, lahus läheb kahvatumaks; aja jooksul hakkab värvingu muutumine levima piirist ikka kaugemale ja kaugemale; mõne nädala või kuu pärast, sõltuvalt silindri pikkusest, muutub segu ühtlaseks.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

Difusioon toimub kiiremini, kui difundeeruvate kehade temperatuur on kõrgem.

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 Maakeral teatud paksusega kihi piirides. Niisama võib toimuda erinevate soolade lahuste difusioon mullas.



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 võib saada molekul sellise tasakaalustamata tõuke mingist teisest küljest ja tema liikumine muudab suunda. Suure suunamuutumiste arvu puhul ajaühikus omandab tõugatava osakese liikumine otsekuu värisemise iseloomu.

Kontrollkatsed näitasid, et niisugune värisemine kunagi ei lakka ja ei sõltu mitte mingisugustest välistest mõjutustest — mehhaanilistest, elektrilistest jt., kasvab aga temperatuuri tõusuga.

Opetlane 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 liikuvate molekulide tõugete resultandi suuna üle teatavas ajavahemikus.

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

61. Browni molekulaarliikumine.

Molekuli liikumist pole võimalik vahetult vaadelda, kuna molekuli ennast pole võimalik näha ka kõige tugevamate mikroskoopidega. Seda liikumist tõendavad siiski paljud kaudsed vaatlused. Viimaste hulgas juba 1827. a. inglise botaaniku Browni poolt korraldatud vaatlused viiksid nagu molekulaarliikumise otsesele vaatlusele õige lähedale.

Kui segada vette mingit kergert pulbrit, näiteks värvainet gummi-gutti, ja asetada tilk vett selles heljuvate pulbriosakestega mikroskoobi alla, siis võib näha, et mikroskoobis nähtav pulbriosake (palju suurem molekulist) on alalises liikumises siksakilist trajektoori mööda.

Need katsed võimaldavad meil suurimal määral läheneda molekulaarliikumise otsesele vaatlusele.

62. Molekulaar-kineetiline teooria. Tahkete kehade (jää, jood, kamper, naftaliin) ja vedelikkude alaliselt toimuv auruminē, laialt levinud difusiooni nähtused ja Browni liikumine annavad küllaldase aluse gaaside, vedelike ja tahkete kehade molekulide alalise liikumise tunnustamiseks. Seepärast nüüdisaja õpetus aineehitusest väljendub järgmises põhilauseis: *kehad koosnevad molekulidest, mis on alalises korrapärasus liikumises.*

Tahkete kehade kuju ja ruumala jäävus ning nendes toimuva difusiooni aeglus viivad oletusele, et tahkete kehade molekulid on suutelised läbima väga väikesi teid, võnkudes väikese amplituudiga oma tasakaalu-asendi ümber. Vedelikkude kerge liikuvus ja suurem difusiooni kiirus viivad järeldusele, et nende molekulid liiguvad suurema amplituudiga ning et molekulide grupid on võimalised nihkuma üksteise suhtes. Gaasi väga suur difusiooni kiirus ja tema võime paisuda lubavad väita, et gaasi molekulid on alalises translatoorses liikumises kõikides võimalikkudes suundades; nende sirgjooneliste liikumiste tõttu on võimalikud molekulidevahelised kokkupõrkamised ja kokkupõrkamine anuma seintega, kui gaas on suletud anumasse; iga kokkupõrkamine muudab molekuli teed. Vedelikkudes ja gaasides on võimalik ka molekulide pöörlev liikumine.

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

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

Keha soojuslik olek on seotud tema molekulide korrapärasu liikumisega.

Kuigi soojusnähtused on seotud keha molekulide mehhaanilise liikumisega, ei saa soojust teroikuna pidada molekulide mehhaaniliseks liikumiseks. 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 korrapärad, kaootilised: ükski suund molekulide liikumises pole domineeriv, kõik suunad on võrdtõenäolised ja võrdväärtuslikud liikumisele.

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

Mehhaanilise liikumisega ühes kõigi selle seadustega on tegemist, kui liigub, s. o. kui on kineetilist energiat ainult kasvõi ühel molekulil või koguni selle osal.

Kõikides soojusnähtustes on vajalik mitte üksi väikseimate osakeste mehhaanilise liikumise olemasolu, vaid peavad aset leidma veel määratu hulga osakeste liikumine ja liikumise kaootilisus. Seepärast vajab soojusliikumine teisi uurimisvõtteid kui need, mida rakendati mehhaanikas.

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 mehhaanilisel liikumisel joonestavad kõik tema punktid teatud trajektoore: 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 palju tõenäolisem molekulide liikumine igasugustes võimalikkudes suundades kui kõikide molekulide üheaegne liikumine ühes kindlas suunas.

Kahest molekulide liikumise liigist (korrastamata ja korrastatud) on kaootiline (korrastamata) liikumine palju tõenäolisem.

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

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

Oma ettekandes Teaduste Akadeemias ta ütles: «Kõigepealt olen mina tõestanud («Mõtiskelud sooja ja külma põhjustest»), et Aristotelese alg tuli ehk uuemate õpetlaste stiili järgi eriline soojusttekitav materia, 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 materiaosakeste 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 geniaalseim vene õpetlane, vene loodusteaduse aluse rajaja. Erakordse jõuga avaldus temas vene rahvale omane talendi sügavus ja mitmekülgsus. M. V. Lomonossov oli talumehe-kaluri poeg; alles

19. eluaastast peale saab ta võimaluse õppida. Kuid juba 34 aastast saab ta Vene Teaduste Akadeemia tegevliikmeks.

M. V. 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 töid. Kvantitatiivsete meetodite rakendamise teened keemias omistatakse harilikult prantsuse keemikule Lavoisier'le (l.: lavuasjee). 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 on 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 alal. Lomonossov arendas esimesena mõtet maakoores toimuvatest alalistest muutustest ja juhtis tähelepanu vajadusele seletada loodust ajalooliselt. Ka sellega oli Lomonossov lääne-euroopa teadusest kaugel ees. Maa ja maakihtide muutuvuse ideele tulid piiritagused õpetlased temast palju hiljem.

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

Lomonossov oli omaaja silmapaistev poet; ta oli vene keele reformaatoriks ja kaasaegse vene grammatika alusepanijaks. Lomonossovi projekti järgi loodi Venemaal esimene ülikool — Moskva ülikool.

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

KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Mis on molekul, aatom?
2. Mida nimetatakse kohesioonijõududeks 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 teooria arenemine. Gaaside teooria algus kuulub samasse XVII sajandisse, milles mehhaanika sai oma teadusliku põhjenduse. Gaaside teooria arenemisele avaldas mõju osa neidsamu selle eposhi tootmisvajadusi, millest oli jutt mehhaanika 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 gaaside¹ omaduste uurimisele.

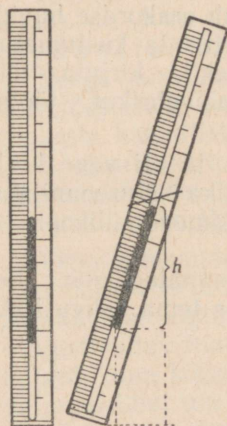
Kui tootmisvajadused seadsid teadlaste ette ülesande uurida gaaside omadusi, siis teadlaste tähelepanu loomulikult oli esialgu keskendatud peamiselt õhule.

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 kõrguse muutumisel.

Aastal 1650 Guericke leiutas õhupumba.

XVII sajandi lõpul hakati uurima gaaside (õhu) kokkusurutavust ja paisvust mehhaaniliste ja soojuslikkude mõjutuste toimel.

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



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

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

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

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 ülespoole seisva toru mistahes asendis võrdub rõhk, mida avaldatakse gaaside, atmo-

¹ Nimetus «gaas» võeti tarvitusele XVII sajandi algul selliste aurude tähistamiseks, mida tol ajal ei saanud vedelaks muuta. Sõna «gaas» tekkis kreeka sõnast «kaoss», mis tähendab «haigutav, ürgne».

sfäärilise 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 -ga 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 kujuneb töö võimalikult suurema arvu V ja p vastavate väärtuste paaride saamiseks toru mitmesuguste kallete puhul. Vaatluste tulemused tuleb kanda järgmisesse tabelisse:

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

Ruumala ja rõhu mõõtmist võib toimetada järgmiselt.

1. Mõõtkte atmosfääri rõhk baromeetri järgi H mm elavhõbedasammast.

2. Asetage toru vertikaalselt kinnise otsaga allapoole; mõõtkte millimeeterpaberi abil õhusamba pikkus millimeetrites ja võtke millimeetrite arv ruumalaks V leppeühikutes; mõõtkte 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°); mõõtkte mõõtejoonlaua abil õhusambakese pikkus millimeetrites, mis annab ruumala suuruse V ; mõõtkte 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 toru kahes asendis (näit. 50° ja 75°).

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

6. Viige toru horisontaalsest asendist välja teatud nurga võrra (umbes 25°) lahtise otsaga alla, mõõtkte mõõtejoonlauaaga õhu ruumala ja elavhõbedasamba h mõlema otsa nivoode vahe vertikaali mööda; arvutage õhu rõhk $p = H - h$.

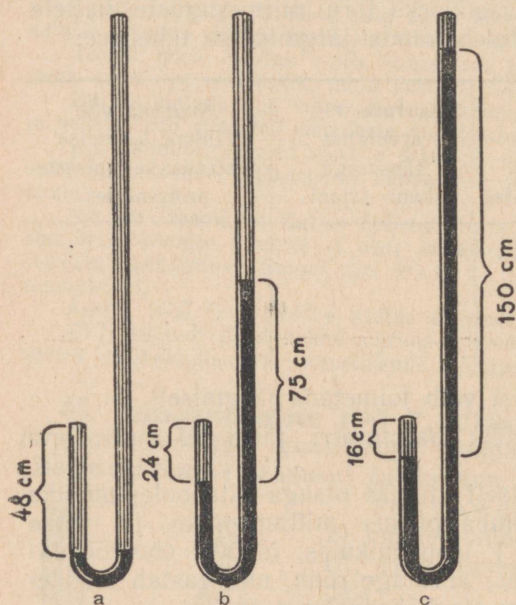
7. Korrake mõõtmisi ja arvutusi vähemalt kahe kaldseisu ja vertikaalseisu jaoks, kui toru lahtine ots on all.

8. Leidke pV keskmine väärtus kõikide mõõtmiste jaoks, määrake üksikute korrutiste erinevus keskmisest korrutisest ja avaldage see protsentides. Kas on need erinevused suured? Kas võib

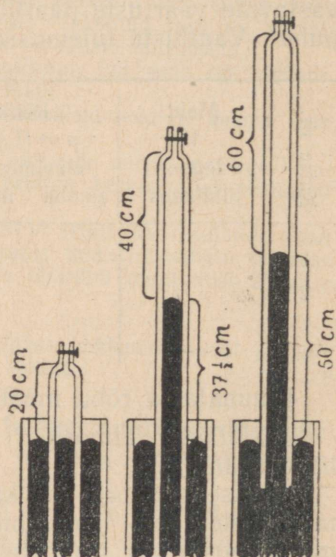
lugada (vaatlusvigade piirides) korrutist pV konstantseks üksikute ruumalade ja rõhkude õige suurte erinevuste puhul?

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 puhul?



Joon. 59. Gaasi ruumala väheneb rõhu suurenemisega.



Joon. 60. Gaasi ruumala suureneb rõhu vähenemisega.

66. Boyle-Mariotte'i seadus. Ühe ja sama gaasimassi rõhu ja ruumala vahelist sõltuvust jääva (konstantse) temperatuuri puhul 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 atmosfäärilise rõhu all. Olgu katse ajal 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).

Võtame katseriista, mis on kujutatud joon. 60, asetame ühest otsast kinnise toru, milles on õhku, nii, et elavhõbe temas ja lahtises laias anum asuks ühel nivool. See asjaolu näitab, et õhk torus on atmosfäärilise rõhu all. Tõstame toru nii, et õhu ruumala saaks kaks korda suuremaks, kui oli alguses: $V_2 = 2V_1$. Siis tõuseb elavhõbe kinnises harus ja nagu näitab mõõtmine, jääb seisma laia anuma nivoo suhtes $37\frac{1}{2}$ cm kõrgusel. Täheleb nüüd tasakaalustab üheatmosfääriline rõhk 75 cm Hg kahekordistunud ruumalaga õhu rõhu ja $37\frac{1}{2}$ cm pikkuse elavhõbedasamba rõhu. 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 anum; siis ta osutub võrdseks 50 cm-ga. Järelikult moodustab õhu rõhk torus ainult kolmandiku atmosfääri (75—50), s. o. $p_3 = \frac{p_1}{3}$.

Kõrvutame esimese ja teise katserea andmed:

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	$p_1V_1,$	$p_1V_1,$	$p_1V_1.$

Sellelaadiliste 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:

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

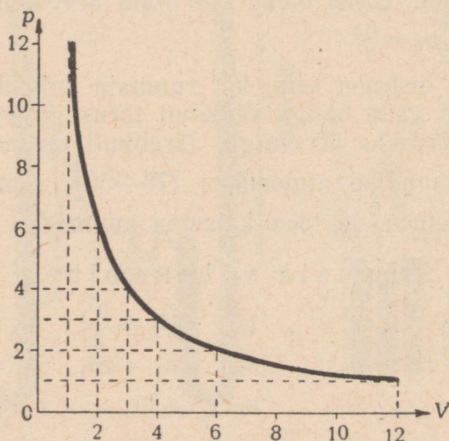
Kui tähistada m -grammise gaasihulga ruumala V -ga ja tema rõhu p -ga, siis võtab seadus järgmise matemaatilise kuju (Boyle-Mariotte'i seaduse valem):

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

Tähega C on siin märgitud korrutise jääv väärtus igas üksikus katses. Erinevates katsetes võivad need jäävad suurused olla erinevad.

Suurus C sõltub võetud gaasi massist, gaasi keemilisest loomusest, temperatuurist, mille juures toimus mõõtmine, ja ühikutest, milledega mõõdetakse gaasi ruumala ja rõhumist.

67. Ruumala ja rõhu sõltuvuse graafik. Nagu võib näha eelnevast, on antud gaasihulga rõhk ja ruumala jääval temperatuuril pöördvõrdelised suurused. Kui kaks suurust on omavahel funktsionaalses sõltuvuses, siis võib seda sõltuvust kujutada kõverjoonega mingi koordinaatteljestiku suhtes (joon. 61).



Joon. 61. Gaasi rõhu sõltuvuse graafik ruumalast.

Võtame abstsissitelje ruumala 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, kui $V = 12 \text{ l}$, $p = 1 \text{ at}$. Leiame joonisel punktid, mis vastavad väärtustele:

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

Läbi leitud punktide tõmbame joone.

Saadud kõverjoont nimetatakse geomeetrias *hüperbooliks*. Füüsikas ta kujutab gaasi oleku muutust jääval temperatuuril, mispärast teda nimetataksegi *isotermiks*¹.

¹ Kreeka keeles *isos* tähendab võrdne.

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

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

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

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

s. o. gaasi tihedus on jääva temperatuuri puhul 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 ühtedel gaasidel ja ühtede rõhkude puhul on kokkusurumine suurem, teistel väiksem, kui peaks olema Boyle-Mariotte'i seaduse järgi; suurte, üle 100 at rõhkude all on kõrvalekaldumised juba suured.

Boyle-Mariotte'i seadusest kõrvalekaldumiste tabel.

V	Õhk		Süsihappegaas		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

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 samal temperatuuril, kui teda panna rõhu alla p_1 :

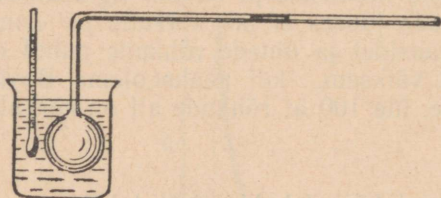
$$\left. \begin{array}{l} \text{Ruumala} \\ \text{Algsuurus} \\ \text{Lõppsuurus} \end{array} \right\} \begin{array}{l} V \\ p \\ x \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} \text{Rõhk} \\ p \\ p_1 \end{array} \right\} x p_1 = V p; \quad x = \frac{V p}{p_1}.$$

Arouline näide. Gaas, mille ruumala on 15 l 75 cm-se Hg rõhu all, on surutud kokku ruumalale 12 l (samal temperatuuril). Kui suur on uus rõhk?

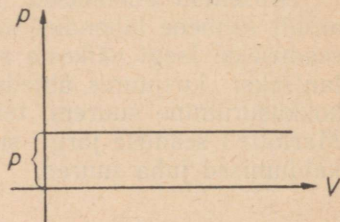
$$\left. \begin{array}{l} 15 \text{ l} - 75 \text{ cm} \\ 12 \text{ l} - x \text{ ,,} \end{array} \right\} 12 \cdot x = 15 \cdot 75; x = \frac{15 \cdot 75}{12}; x = 93,75 \text{ cm Hg.}$$

69. Gay-Lussac'i seadus. Gaaside paisumise mõõtmiseks kasutatakse riista, mida nimetatakse dilatomeetriks¹.

Dilatomeeter (joon. 62) on klaasist kera temale külgesulatatud, täisnurga alla painutatud peenikese klaastoruga. Kera ruumala ja toru ristlõige on täpselt ära mõõdetud. Kera täidetakse uuritava



Joon. 62. Dilatomeeter.



Joon. 63. Isobaar.

gaasi või (niiskussyaba) õhuga. Siis lastakse toru horisontaalsesse ossa tilk mittekergesti auruvat vedelikku, mis suleb uuritava gaasi ruumala. Asetades kera algul sulavasse jäässe, mõõdetakse 0° temperatuuril gaasi ruumala 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 selle sama atmosfäärilise rõhu all.

Dilatomeetri enda väikest paisumist võib mitte arvestada.

Saadud andmed lubavad arvutada gaasi ruumpaisumise koefitsienti (vt. § 54) konstantse rõhu all.

Täpseid mõõtmisi gaaside paisumiste kohta korraldas Gay-Lussac (l.: gei lussak), kes 1802. aastal leidis, et kõikide gaaside ruumala 1° võrra soojenemisel konstantse rõhu puhul suureneb ühe ja sama osa võrra esialgsest, 0° temperatuuril olevast ruumalast. Sellepärast sai Gay-Lussac'i seadus järgmise väljenduse: *kõikide gaaside ruumpaisumise koefitsiendid konstantse rõhu puhul on ühesugused ja võrdsed suurusega* $\beta = \frac{1}{273} = 0,00366^{\circ}$. Gaasi ruumala mistahes temperatuuril t avaldub valemina $V = V_0 (1 + \beta t)$ (vt. § 54).

¹ Ladinakeelsest sõnast *dilatare* — paisutama.

² See arv pole antud Gay-Lussac'i enda, vaid hilisemate uurijate poolt.

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	$\beta =$	{	0,00367.
Ammoniaagi „			0,00380
Vesiniku „			0,00366
Õhu „			0,00367
Heeliumi „			0,00366
Hapniku „			0,00367
Väevlishappeanhüdrüidi jaoks			0,00385
Süsihappegaasi „	0,00373		

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

Seda graafikut nimetatakse isobaariks¹, protsessi ennast isobaariliseks.

70. Laboratoorne töö 8. Õhu ruumpaisumise koefitsiendi määramine (konstantse rõhu all).

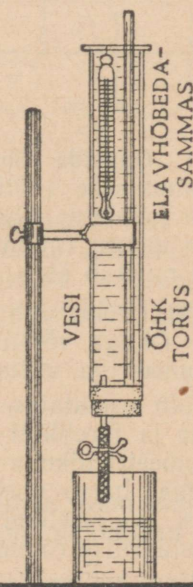
Töövahendid: 1) klaastoru (joon. 64) pikkusega umbes 30 cm ja diameetriga 2,5 mm; toru on ühest otsast kinni sulatatud ja umbes keskele on asetatud väike elavhõbedasambake, mis suleb õhusambakese; 2) termomeeter; 3) jäme klaastoru; 4) mõõtejoonlaud; 5) teekann keeva veega; 6) sulav jää.

Töökäik. 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 vertikaalselt, kinnise otsaga alla, toruke, milles on õhk; märkige ära vee temperatuur t_0° ja torukese lah-

tise otsa kaugus elavhõbedasambakese ülemisest otsast l_0 ; arvutage leppeühikutes õhu ruumala $V_0 = L - l - l_0$.

3. Laske laiast torust sulav jää või külm vesi välja ja kallake sinna sooja vett; asetage sinna termomeeter ja toruke õhuga,

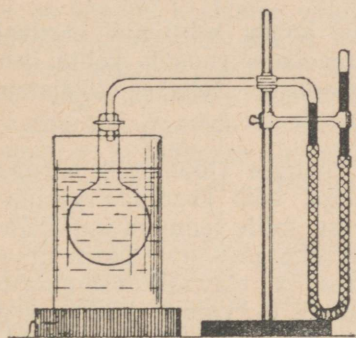


Joon. 64. Katseriist laboratoorse töö nr. 8 juurde.

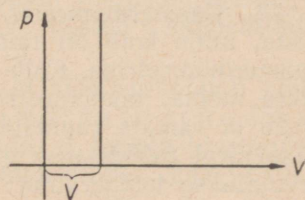
¹ Isos — võrdne, baros — raske.

ja kõrgusega h elavhõbedasamba rõhu summa. Mõõtnud vee temperatuuri t , võime arvutada, missuguse osa võrra muutub 0° temperatuuril võetud algrõhu iga ühik soojenemisel 1° võrra.

Arv, mis näitab, missuguse osa võrra muutub 0° temperatuuril võetud algrõhu iga ühik jääva ruumala puhul soojenemisest 1° võrra, nimetatakse gaasi rõhumise termiliseks koefitsiendiks.



Joon. 65. Katseriist, millega uuritakse gaasi rõhu sõltuvust temperatuurist.



Joon. 66. Isokoor.

Rõhumise termilise koefitsiendi esimese mõõtmise tegi 1787. aastal prantslane Charles (loe: šarl), kes avastas seaduse, mida hiljem hakati nimetama tema nime järgi Charles'i seaduseks ja mis on järgmine: *konstantse ruumala puhul on kõikide gaaside rõhumise termilised koefitsiendid omavahel võrdsed.*

Kui tähistada rõhu koefitsient β -ga, siis:

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

Gaaside ruumpaisumise koefitsient konstantse rõhu puhul ja rõhu termiline koefitsient konstantse ruumala puhul avalduvad omavahel võrdses arvudes.

Charles'i seadus osutub samuti ligikaudseks.

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

Seda sirgjoont nimetatakse isokooriks¹ ja protsessi ennast isokooriliseks.

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

72. Ideaalne gaas. Nagu eespool näidatud, kalduvad kõik gaasid kõrvale Boyle-Marriott'e ja Charles-Gay-Lussac'i seadusest. Antud gaasimassi ruumala jääval temperatuuril ei ole rangelt pöördvõrdeline rõhuga; mitmesuguste gaaside termilised koefitsiendid erinevad üksteisest (kuigi vähe) ja temperatuuri muutumisel ei jää konstantseks. *Gaas, mis täpselt alluks mõlemale gaasi seadusele, kannab «ideaalse gaasi» nime.* Kõige ligemal ideaalse gaasi omadustele on vesinik ja heelium.

Füüsikas käsitletakse ideaalse gaasi kohta kehtivaid seadusi, kuna need avalduvad lihtsamalt, kui reaalsete gaaside kohta kehtivad seadused. Ideaalsete gaaside seadustes tehakse tõelistele, reaalsetele gaasidele vastavad parandused.

73. Gaastermomeeter. Kirjeldatud riistaga (joon. 65) sarnast riista, mille kolb on täidetud vesinikuga, võib kasutada vesinik-gaastermomeetrina. Kolb lastakse ainesse, mille temperatuuri tahetakse mõõta; manomeetri lahtise otsa nihutamise viiakse gaas ühele ja samale ruumalale; õhurõhumise ja elavhõbedasammaste vahe järgi mõõdetakse gaasi rõhku kolvis ja valemi (XI) järgi arvutatakse temperatuur. Gaastermomeetrit kasutatakse teaduslikudes uurimustes ja temaga võrreldakse teisi termomeetreid.

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

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

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

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

Kui temperatuurid Celsiuse järgi on -110° ; -20° ; 0° ; $+37^\circ$; $+100^\circ$; $+150^\circ$, siis absoluutsed temperatuurid on vastavalt: 163° ; 253° ; 273° ; 310° ; 373° ; 423° . Üldiselt, kui temperatuur Celsiuse järgi märkida t -ga, vastav absoluutne temperatuur aga T -ga, siis nende arvude vahel kehtib seos: $T = 273 + t$ ja $t = T - 273$. Temperatuuri -273°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 puhul; selle juures loeti gaase ideaalseteks.

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

On tarvis pöörata 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.

74-a. Gaasi ruumala ja rõhu valemite avaldamine absoluutse temperatuuri kaudu. Absoluutse temperatuuri kasutamine võimaldab märgatavalt lihtsustada gaasi ruumala ja rõhu valemid ja arvutamist nendega.

Valemitesse kuuluvat kaksliiget $1 + \beta t$ võib absoluutse temperatuuri kaudu avaldada järgmiselt:

$$1 + \beta t = 1 + \frac{t}{273} = \frac{273 + t}{273}.$$

Kuid $273 + t$ on T , ja 273 võib asendada T_0 -ga. Siis

$$1 + \beta t = \frac{T}{T_0}.$$

Samuti

$$1 + \beta t_1 = \frac{T_1}{T_0}, \quad 1 + \beta t_2 = \frac{T_2}{T_0} \text{ jne.}$$

Siis Gay-Lussac'i seadust võib anda valemiga

$$V = V_0 \frac{T}{T_0},$$

ja Charles'i seadust — $p = p_0 \frac{T}{T_0}$.

Järelikult on antud gaasimass jääva temperatuuri juures võrdeline absoluutse temperatuuriga. Antud gaasimassi rõhk jääva ruumala juures on võrdeline absoluutse temperatuuriga.

Harjutus 6.

1. Avaldage järgmised temperatuurid absoluutse skaala järgi: 1) valge hõõgumine (1200°); 2) punane hõõgumine (500°); 3) vee keemistemperatuur; 4) jää sulamistemperatuur; 5) elavhõbeda tahkestumistemperatuur (-39°); 6) laboratooriumis saadud madalaim temperatuur ($-272,18^{\circ}$).

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

75. Gaasi oleku valem. Boyle-Mariotte'i seadus määrab kindlaks rõhu ja ruumala vahelise sõltuvuse konstantsel temperatuuril. Gay-Lussac'i ja Charles'i seadused aga annavad kas ruumala või rõhu sõltuvuse temperatuurist, kui üks nendest on konstantne.

Kuid looduses ja tehnikas on enamasti 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 sisepõlemismootori silindris muutuvad üheaegselt kõik gaasi olekut iseloomustavad suurused.

Sellepärast on väga tähtis määrata antud gaasihulga kõigi kolme suuruse — ruumala, rõhu ja temperatuuri vahelist seost.

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.

Ülesanne seisab selles, et gaasi mistahes olekut, kui gaasi ruumala on V , rõhk p ja temperatuur t , avaldada algtingimust iseloomustavate suuruste (temperatuur 0° , ruumala V_0 , ja rõhk p_0) kaudu.

Boyle-Mariotte'i ja Gay-Lussac'i seadused võimaldavad leida kahe suuruse sõltuvust kui kolmas on jääv.

Et lahendada seatud ülesannet, selleks tuleb võetud gaasimass mõttes viia läbi mingi ettekujutatava oleku, mis erineks alg- ning lõppolekust ainult mingi ühe iseloomustava suuruse poolest.

Oletame, et gaas, mis on võetud 0° juures (absoluutne temperatuur T_0) ruumalaga V_0 ja rõhuga p_0 on soojendatud antud lõpptemperatuurini t (absoluutne temperatuur T) sama rõhu p_0 juures. Siis Gay-Lussac'i seaduse järgi tema uus vahepealne ruumala

$$V_1 = V_0 \frac{T}{T_0}$$

Nüüd oletame et selles vahepeelses olekus, sama temperatuuri T juures, mõjub gaasile rõhk p . Kasutades Boyle-Mariotte'i seadust leiame:

$$Vp = V_1p_0.$$

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

	Ruumala	Rõhk	Temperatuur	
Algolek	V_0	p_0	0	} $V_1 = V_0 \frac{T}{T_0}$
Vahepealne olek	V_1	p_0	T	
Lõppolek	V	p	T	} $Vp = V_1p_0$

Asetades V_1 väärtuse viimasesse valemisse, saame:

$$Vp = V_0p_0 \frac{T}{T_0} \quad \text{ehk} \quad \frac{Vp}{T} = \frac{V_0p_0}{T_0}.$$

Kuna sama arutelu võime korrata temperatuuride T_1 , T_2 , $T_3 \dots$ kohta ja iga kord saada sarnased valemid, siis:

$$\frac{V_1p_1}{T_1} = \frac{V_2p_2}{T_2} = \frac{V_3p_3}{T_3} = \dots = \frac{Vp}{T} = \frac{V_0p_0}{T_0},$$

ehk:

$$\boxed{\frac{Vp}{T} = \frac{V_0p_0}{T_0}} \quad \text{(XII-a)}$$

Kuna V_0p_0 on konstantne suurus, siis ka jagatis $\frac{V_0p_0}{273}$ on samuti konstantne suurus, mida võib tähistada B -ga; siis eelmised võrdsed võtavad kuju, mis on tuntud Clapeyroni võrrandi nime all:

$$\boxed{\frac{V_1p_1}{T_1} = \frac{V_2p_2}{T_2}} \quad \text{ehk} \quad \boxed{\frac{Vp}{T} = B} \quad \text{(XII-b)}$$

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

Kui võtta igat gaasi gramm-molekuli (§ 77) suuruses, siis tema ruumala 0° juures on $V_0 = 22\,410 \text{ cm}^3$. Siis gaasi konstant B mistahes gaasi gramm-molekuli jaoks normaalse rõhu juures avaldub ühe ning sama arvuga ja nimelt:

$$82,06 \frac{\text{at} \cdot \text{cm}^3}{\text{kraad} \cdot \text{g-mol}}.$$

Seda normaalse rõhu juures kõikide gaaside kohta kehtivat gramm-molekuli konstanti nimetatakse universaalseks gaasikonstandiks.

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 gaasi üheks olekuks normaalse oleku, 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 viimasesest 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 õhutihja anumaga. Missuguseks kujuneb rõhk anumate ühendamisel?

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°-ne õhk on normaalse rõhu all ja omab 3 l-st ruumala. Määrata tema ruumala 10° temperatuuri ja 74 cm Hg rõhu juures.

4. 15° temperatuuriga vesinikul on 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°-ni?

Vastus: 140 cm Hg.

5. Õhul on 0° temperatuuri ja 75 cm Hg rõhu puhul 1,2 l ruumala. Missuguse temperatuuri puhul on ta ruumala 1 l, kui rõhk on normaalne?

Vastus: -42°.

6. 0° temperatuuri ja normaalse õhurõhu puhul kaalub õhk kolvis I G. Missugune ruumala on sellel õhul, kui temperatuur on -10° ja rõhk on

$$144 \text{ cm Hg? } \text{Õhu } d_0 = 0,00129 \frac{\text{G}}{\text{cm}^3}.$$

Vastus: 498 cm³.

7. Kui palju kaalub 1 cm³ õhku 103 m sügavuses vee all, kui temperatuur on 4°?

Vastus: 0,014 G.

8. Õhumullikesel on ruumala 0,1 cm³ 1 m sügavuses vee all, kui temperatuur on 100°. Missuguse ruumala ta võtab, kui ta tuleb vee alt välja normaalsele rõhule ja 15°-sele temperatuurile?

9. Leida süsihappegaasi erikaal, kui $t = 100^\circ$ ja rõhk on 80 cm Hg, kui $d_0 = 0,002 \frac{\text{G}}{\text{cm}^3}$.

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

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

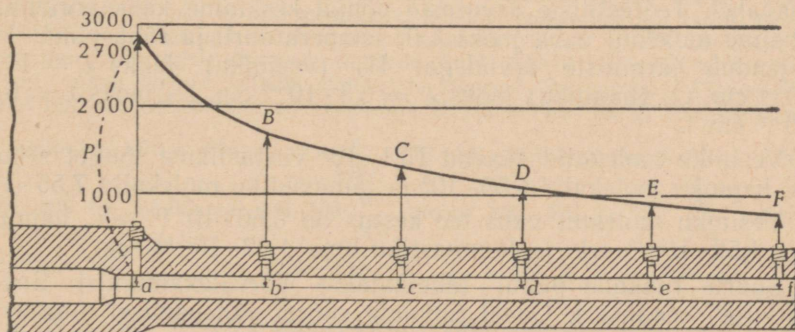
$$\text{Vastus: } 2275 \text{ G}.$$

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

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

$$\text{Vastus: } 260 \text{ kG}.$$

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?



Joon. 67.

76. Gaasi molekulaar-kineetiline teooria. Iga gaas, nagu iga teinegi keha koosneb molekulidest. See asjaolu, et gaas võib täita kiiresti kogu võimaliku ruumi, näitab ühelt poolt tema molekulide väga väikest kohesioonijõudu, teiselt poolt seda, et gaasi molekulid liiguvad translatoorselt suure kiirusega.

Gaasi molekulide liikumist võib kõige lähemalt võrrelda kihulate parve liikumisega ilusal suveõhtul. Kogu parv, nagu gaaski anum, säilitab kaua mingi kindla ruumala, kuid üksikud kihulased temas lendlevad korrapäraselt igas suunas. Molekulid muudavad oma sirgjoonelist liikumist kokkupõrkamise tõttu teiste molekulidega ja anuma seintega, mille juures nemad pööravad 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 meeleorganid ega ka mõõteriistad pole võimelised märkima üksikute molekulide erisuguste impulssidega¹ toimuvaid põrkeid. Tajutakse mingit impulsside keskmist, mis määrabki gaasi rõhumise.

Kuna molekulid liiguvad korrapäratult ja nende arv on väga suur, siis toimub igas suunas keskmiselt ühesugune arv põrkeid, mispärast gaasi rõhumine kõikidele seintele ongi ühesugune. Liikumise sama korrapäratust viib keskmiselt sellele, et kõikide põrkejõudude resultandid, mis mõjuvad seinale, peavad olema risti seinaga või mingi teise pinnaga gaasi sees.

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

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

Molekulid põrkuvad mitte üksi anuma seintega, vaid ka omavahel. Teoreetiliste arvutuste põhjal keskmine kahe põrkumise vaheline molekuli vaba jooks λ 0° temperatuuril ja rõhu puhul 1 at väljendub järgmiste arvudega: H₂ (vesiniku) jaoks $\lambda = 11,2 \cdot 10^{-6}$ cm, O₂ (hapniku) jaoks $\lambda = 6,5 \cdot 10^{-6}$ cm, N₂ jaoks $\lambda = 6,0 \cdot 10^{-6}$ cm*.

Vesiniku molekulid saavad $15,1 \cdot 10^9$ vastastikust tõuget sekundis, hapniku molekulid $6,55 \cdot 10^9$ ja lämmastiku molekulid $7,55 \cdot 10^9$.

Vesiniku molekuli vaba tee 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 puhul täheldatakse kõrvalekaldumist Boyle-Mariotte'i seadusest. Gaasi ruumala suurel vähenemisel muutuvad molekulidevahelised kaugused niivõrd väikesteks, et hakkab ilmema nende vastastikune mõjutus, mis on vähe märgatav harilikel tingimustel. See vastastikune mõjutus suurendab gaasi sees olevat rõhku, mis nüüd enam ei jää pöördvõrdeliseks ruumala suhtes.

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

¹ Impulssi mõõdetakse jõu ja tema mõjumise aja korrutisega.

* Kõik arvud selles ja järgmistes paragrahvides on toodud tutvumiseks, aga mitte sunduslikuks päheõppimiseks.

täidetud ruumala. Selles seisabki gaaside kokkusurumisel tõelise gaasi ideaalsest gaasist kõrvalekaldumise teine põhjus (§ 72).

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

Temperatuuri tõusmisel kasvab molekulide kiirus. Kui gaasi soojenemisel ta ruumala jääb konstantseks, suurenevad tema molekulide kiiruste kasvamisel seinte vastu toimuvate pörgete impulsid ja rõhk järelikult suureneb, millest räägibki Charles'i seadus. Eespool toodud gaasi molekulide suured kiirused tekitavad küsimuse, miks nii aeglaselt toimub gaaside difusioon. See vastuolu on seletatav gaasi molekulide liikumisel tekkiva omavaheliste kokkupörgete hiigelsuure arvuga.

Lisame öeldule ühe märkuse molekulaarse liikumise kiiruse kohta. Kui jutt on molekulidest, siis ei tohi mõelda, et kõikidel molekulidel on täiesti ühesugused kiirused. Korrapäratutel kokkupõrkamistel võivad ühtede molekulide kiirused suurenedada, teiste kiirused väheneda, kuid üldiselt toimuvad kõik nähtused nii, nagu oleksid kõikide molekulide kiirused ühesugused. Tõepoolest näitavad ligikaudsed teoreetilised arvutused, et kui näiteks mingi temperatuuri puhul keskmine kiirus võrdub $485 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$, siis 1% kõikidest molekulidest evib kiirust, mis on madalamal kui $100 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$, umbes 8%—100 ja $200 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$ vahel, 15%—200 ja $300 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$ vahel, 20%—300—400 $\frac{\text{m}}{\text{sek}}$ vahel, 21% — $400—500 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$ vahel, 17% — $500—600 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$ vahel, 10% — $600—700 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$ vahel ja 8% — üle $700 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$.

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

77. Gaasi gramm-molekul ja molekulide arv selles. Gaasi (samuti kui mistahes aine) gramm-molekuliks nimetatakse gaasimassi, mis sisaldab sama palju grammisid, kui suur on arv, millega väljendatakse antud aine molekulkaalu.

Vesiniku gramm-molekul on 2,016 g, hapniku oma 32 g, lämmastiku oma 28 g. Kuna vesiniku tihedus $D = 0,000090 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, hapniku $D = 0,001429 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, lämmastiku $D = 0,001251 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, siis võib valem

$V = \frac{m}{D}$ 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 sõnastas selle lause, Avogadro arvuks.

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

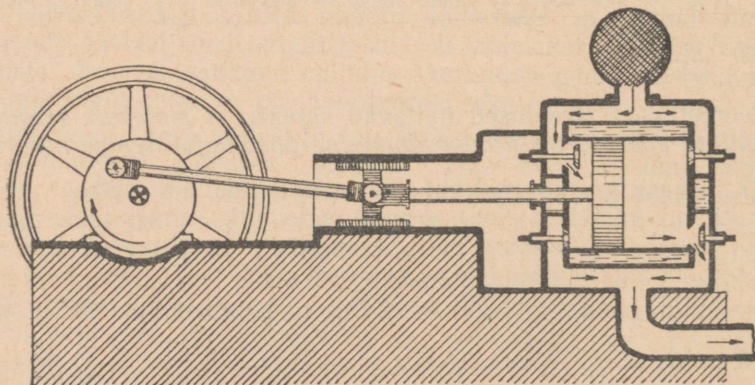
Siit võib saada §-s 57 toodud molekulide arvu ühes cm^3 -is 0° temperatuuri ja üheatmosfäärilise rõhu puhul, ja nimelt

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

Samuti võib arvutada mistahes molekuli või aatomi massi. Näiteks vesiniku aatomi mass, mille molekul on kaheaatomiline,

$$\text{võrdub } \frac{2,016}{2 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}} = 1,67 \cdot 10^{-24} \text{ g.}$$

78. Gaaside omaduste tehniline rakendamine. Gaasid leiavad väga laialdast rakendamist tehnikas. Kokkusurutud kujul on õhk töötavaks aineks, millega pannakse käima mitmesugused niinimetatud pneumaatilised masinad ja tööriistad. Suruõhk, mida surutakse vagunite all olevatesse silindritesse, paneb liikuma vagunite õhkpidurite klotsid. Tänapäeva täiuslikemateks piduriteks on nõukogude leidurite Matrossovi ja Kazantsevi pidurid. Pneumaatilist pidurit rakendatakse samuti trollibussidel ja suurtel 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



Joon. 68. Kompressori läbilõige.

toorainete ning valmistoodete kuivatamiseks ja niisutamiseks ladudes. Masinaid, mis on ette nähtud õhu kokkusurumiseks või ruumide ja kaevanduste ventileerimiseks, kütuse põlemise soodustamiseks ahjudes, pneumaatiliste tööriistade ja masinate käitamiseks, nimetatakse õhupuhumismasinateks.

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

Õhupuhumismasinate võimsus on tänapäeval hiiglasuur: kuni 2000 m^3 õhku minutis ahjude jaoks ja kuni $12000 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$ kaevanduste läbituulutamiseks.

Ventilaatoritest on leidnud laialdast rakendamist tsentrifugaalventilaatorid, mis on ehituselt sarnased tsentrifugaalpumbaga (vt. I osa § 119). Labadega varustatud ratta pöörlemisel pannakse ratta labade vahel olevad õhuosakesed liikuma ja visatakse inertsitõttu 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, viilmed, sugetakud) kõrvaldamiseks, kergete materjalide (laastud, vill, karvad, lina, terad jts.) õhu-transpordiks, kunstliku tõmbe tekitamiseks aurukatelde kolletes jts.

Kompressorina või surupumbana võib rakendada peaaegu iga õhuhõrenduspumpa, mille ehitus on teada algkursusest. Õhu imemisel ühest anumast võib sama kolb tekitada surumist teise. Joonis 68 kujutab kompressori läbilõiget.

Laialt rakendatakse suruõhku sõjatehnikas, nii mere kui ka 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 käima.

Lõpuks kasutatakse gaaside survet igas tulirelvas kuuli, mürsu või miini väljapaiskamiseks. Automaatsetes relvades toimub ümberlaadimine 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 seletada gaasi rõhku molekulaar-kineetilise teooria põhjal?
4. Kuidas sõltub gaasi rõhk temperatuurist kui ruumala on jääv?
5. Kuidas seletuvad molekulaar-kineetilise teooria põhjal Boyle-Mariotte'i ja Gay-Lussac'i seadused ning kõrvalekaldumised nendest?
6. Mida nimetatakse ideaalseks gaasiks ja miks on see mõiste tarvitusele võetud?
7. Mis on absoluutne temperatuur, kuidas ja milleks on see tarvitusele võetud?

8. Missugune sõltuvus on gaasi ruumala ja absoluutse temperatuuri vahel kui rõhk on jääv? Gaasi rõhu ja absoluutse temperatuuri vahel kui ruumala on jääv? Kuidas kujutada neid sõltuvusi graafiliselt?

9. Mida väljendab isotherm? isobaar? isokoor?

10. Mida väljendab gaasi oleku võrrand ideaalse gaasi jaoks?

11. Missugustest suurustest sõltub gaasikonstant?

12. Tooge näiteid gaaside rakendamise kohta tehnikas.

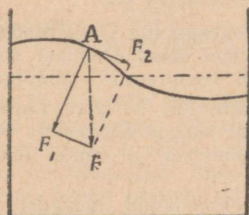
Kirjandus. Игнатъев, Воздух и газообразные тела. Перельман, Физическая хрестоматия, вып. I. Свойства газов. Внукон, Физика и обора страны, кн. 1, стр. 15—17. Лейбсон, Разгаданный воздух, 1945 г.

3. Vedelikkude omadused.

79. **Vedeliku pinna kuju välisjõu 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 võib vedeliku tasakaal saabuda ainult sel juhul, kui



Joon. 69.

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 põhjustada vedelikuosakese liikumist, kuna ta on suunatud

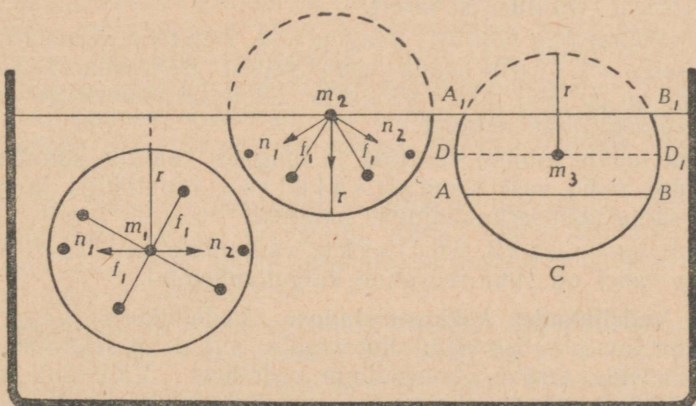
ruumi, mis on täidetud teiste osakestega. Kui väike ka oleks tangentsiaalne komponent, ta tekitab osakeste liugumise mööda pinda, mis toob enesega kaasa pinna kohese muutumise. See muutumine toimub nii kaua, kuni pole kadunud tangentsiaalne komponent, s. o. kuni pole vedeliku pind võtnud mõjuva jõu suhtes 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.

80. **Vedeliku pinnakiht.** Vedeliku molekulide vahel esinev kohe-sioon (§ 59) paneb vedeliku pinnakihi erilisse olekusse. Kui molekuli 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 sümmeetriline¹ molekuli n_2 , mis mõjutab m_1

¹ Sümmeetrilisteks antud punkti suhtes nimetatakse kahte niisugust punkti, mis asetsevad antud punkti läbival sirgjoonel ja on võrdsetel kaugustel temast.

sama suure, kuid vastupidiselt suunatud jõuga f_1 ; kahe sümmeetriliselt asetseva molekuli ja järelkult 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 kujutada tema ümber molekuli mõjusfäär, siis ainult pool mõjusfäärist asetseb vedelikus ja teine pool auras. Vaatleme meie poolt valitud molekulile avaldavat 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. Molekulide vastastikune mõju 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 niisama suure jõuga f_1 ja on niisama suure nurga all, kuid ainult teisel pool vertikaalset diameetrit. Nende resultant kui rombi diagonaal on suunatud diameetrit mööda vertikaalselt alla. Samuti on suunatud kõikide teiste sümmeetriliste molekulide resultantid.

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 , mille kaugus pinnast on väiksem molekuli mõjusfääri raadiusest. Kui kahest sümmeetriliselt asetsevast kihist $BADD_1$ ja $DA_1B_1D_1$ üks on m_3 -st ülalpool, teine allpool, siis nende 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, katsetest saadud andmetel. Molekulaarrõhk on väga suur. Nii on ta eetril 1400 at, piiritusel 2400 at ja veel 11 000 at¹.

Esimesel tutvumisel molekulaarrõhuga tekib küsimus, mispärast vee (või teiste vedelikkude) molekulaarrõhk ei lõmasta 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 igasugusele välisrõhule ei andu molekulaarrõhk vedelikus edasi Pascal'i seaduse kohaselt.

Molekulaarrõhu võrdlus magneti ja rauatüki vahelise külgetõmbejõuga aitab aru saada tema sellest iseärasusest. Oletame, et lauale on pandud tükk vase 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.

Rõhk lauale jääb endiseks, vaatamata sellele, et magneti ja raua vahel on suur seesmine külgetõmbejõud.

81. Vedelikkude kokkusurutavus. Vedelikkude väga väike kokkusurutavus välise rõhu suurenemise puhul 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 jahtumisel kinnisulatatud torudes, kus seintele kleepumise tagajärjel vedelik tõmbus kokku vähem, kui

¹ Esitatud andmed vastavad vedelikkude keemistemperatuuridele normaalse rõhu all.

temperatuuri koefitsiendi järgi otsustades võis oodata, s. t. ta venis.

Lisarõhu kõrvaldamisel võtab vedeliku ruumala endise suuruse. Tähendab, vedelik evib maht-elastsust.

82. Pinnakihi potentsiaalne energia. Pindpinevus. Kuna rõhuline 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 niivoole, 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 paigastnihkumisel nad nihkuvad kohesiooni mõjul nii, et pinnakihi suurus väheneks. *Seepärast iga vedeliku pinnakiht on pinda mööda säärases pingsas olekus, mis püüab pinda kokku tõmmata.*

Vedeliku pinna vähenemist kohesiooni tagajärjel, mis toimub alati siis, kui vedeliku molekulid võivad ümber asetuda, 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 vedeliku pinda ümbritseva joone pikkusühikule.

Niisiis võime anda järgmise definitsiooni: *pindpinevust mõõdetakse jõuga, mis põhjustab 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 .

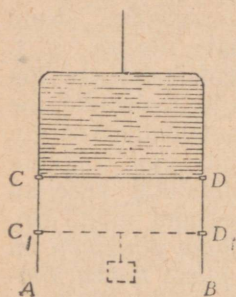
Pindpinevuse suurus on antud järgnevas tabelis $\frac{\text{düün}}{\text{cm}}$ -tes 20° temperatuuril.

Aine	Vesi	Petroot	Elavhõbe	Piiritus	Eeter
α	72,5	24	472	22	16,5

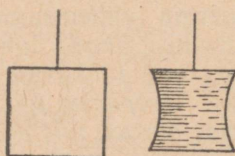
Temperatuuri tõusmisel pindpinevus väheneb, nagu nähtub järgmisest vee kohta kehtivast tabelist:

t	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
α	75,5	74	72,5	71	69,5	67,8	66	64	62

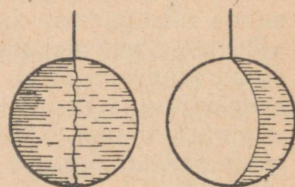
83. Katsed, milles avalduvad pinnakihi omadused. Peatume algul katsete juures, milles avaldub otseselt pinnakihi tung kokku tõmbuda.



Joon. 71. Pinget kelme piiril võib tasakaalustada vihi kaaluga.



Joon. 72. Kelme pinget kiskus ristküliku niidist küljed sissepoole.



Joon. 73. Kelme pinget tõmbab niiti pingule kaart mööda.

1. Traadist ristkülik, mille üks külge (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). Ohus on niidist küljed isekeskis paralleelsed; kelme tekkimise ajal külgede vahel pärast seebivette laskmist painutatakse niidist küljed pindpinevuse poolt kaarekujuliselt sissepoole.

3. Traatrõngas, millele on lõdvalt külge seotud niit, tekitab seebikelme (joon. 73). Kui torkame kelme ühelt poolt niiti läbi, siis pindpinevus tõmbab niidi ringikaare kujuliseks. Selline ringjoone kaare kuju võtmine näitab seda, et pindpinevus mõjub ühtlaselt igale pikkusühikule ja on risti sellega.

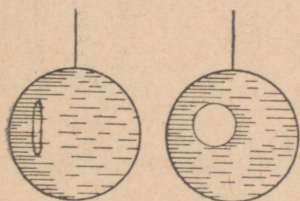
4. Eelmist katset võib muuta nii, et paneme traatrõngas tekkinud kelmele kinnisõlmitud otstega niidi (joon. 74). Kui torkame niidi poolt piiratud kelme osa läbi, siis võtab niit ringjoone kuju.

5. Pinnakelme erilist omadust võib kindlaks teha, kui klaasi kallata vett ja raputada selle pinnale õhuke kiht karukolla (lükopodiumi) seemneid ning pikkamisi vajutada sinna rasvatud sõrm

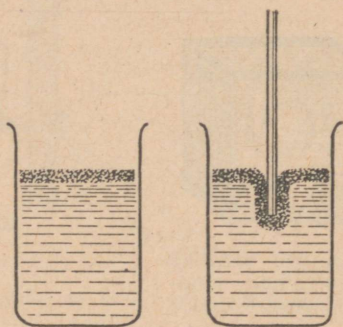
või klaaspulk (joon. 75). Läbi klaasi võib näha, kuidas sõrme või klaaspulga all paindub kelme. Kui sõrm või klaaspulk võtta veest välja, siis osutuvad nad kuivaks.

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 võib järeldada, et vedelik võtab pindpinevuse toimele kera kuju. Me näeme tõepoolest kera kuju kaste- ja vihma-tilkadel.



Joon. 74. Pindpinevus mõjub ühtlaselt igale niidi pikkusühikule ja on sellega risti.



Joon. 75. Rasvatud klaaspulk vette laskmisel painutab pinnakelme.

6. Klaasplaadile valatud väike elavhõbeda hulk jaguneb väikesteks kerakesteks. Mida väiksem on elavhõbeda hulk, seda ligemal on tilga kuju kera kujule.

7. Pindpinevuse toimele vedelikul tekkinud kuju võib näha ka suurema vedeliku hulga puhul, kui tasakaalustada selle kaalu mingi teise jõuga. Vedelikku lastud 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 lükatakse lahusesse lastud aniliinitilk alt üles jõuga, mis suuruselt võrdub väljatõrjutud lahuse kaaluga; viimane aga on aniliini ja lahuse erikaalude võrdumise tõttu võrdne aniliinitilga kaaluga. Seepärast tasakaalustub aniliinitilga kaal vastupidiselt suunatud üleslükkejõuga ja tilk saab kuju pindpinevuse toimele; niisuguses lahuses on aniliinitilk kerakujuline (joon. 76)¹.

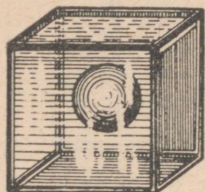
Moodustanud mitu kerakest ja lähendanud neid üksteisele, võime näha nende liitumist suuremaks kerakeseks. Seejuures nad säilitavad kera kuju sellepärast, et kahe kera ruumalade liitmisel

¹ See katse on tuntud Plateau (l.: Platoo) katse nime all.

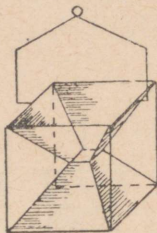
ühise kera pindala on väiksem kahe liidetava kera pindalade summast.

8. Kui kelmed tekivad traadist karkasside (raamistikkude) vahele, millel on mitmesugused geomeetrilised kujud (joon. 77, 78), siis igal karkassil võtab vedeliku kelme täiesti kindla kuju ja nimelt niisuguse, mille puhul tema pindala on väiksem 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 seebitükikesed hakkavad seda mööda siksakiliselt jooksuma. Pinda mööda jooksevad laiali kampri- või seebilahuse joad, ebaühtlaselt vähendades eri suundades 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 mitte märgavateks. Märgavate vedelike näiteid: vesi ja piiritus puhta klaasi suhtes, elavhõbe vase, raua, inglistina ja tsingi suhtes¹.

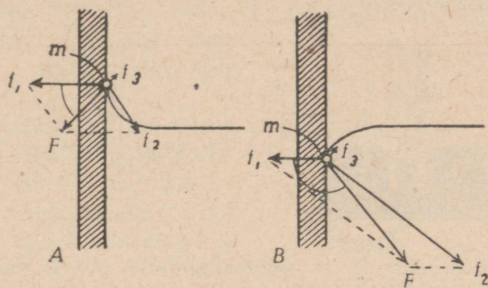
Mittemärgavate vedelike näiteid: vesi rasvakihiga kaetud klaasi suhtes (üldse igasuguse rasvakihi suhtes), elavhõbe klaasi suhtes.

Tahke keha ja mittemärgava vedeliku vahelist adhesiooni võib mõõta §-s 59 toodud katsele analoogilise katsega, viies näiteks klaasplaati kokkupuutumisse elavhõbedaga.

¹ Eriti siis, kui neid enne väävelhappelahuses niisutatud lapiga hõõruda.

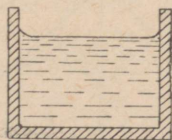
85. **Menisk.** Kuna vedelikud on harilikult paigutatud anumasse ja tahke keha ning vedeliku vahel on tegemist adhesiooniga, siis peab arvama, et viimane avaldab mõju vedeliku pinna kujule anuma seinte ääres.

Vaatleme molekuli m vedeliku ja anuma seina piiril- ja kujutleme selle ümber molekuli mõjusfääri. Nagu võib aru saada joonisest 79, tuleb pool sfääri tahke keha kohta, veerand vedeliku kohta ja veerand vedeliku auru kohta. Poolsfääris olevad tahke keha molekulid mõjuvad molekulile m resultantjõuga f_1 , mis on



Joon. 79. Meniski tekkimine: A — märgamise ja B — mittemärgamise puhul.

suunatud anuma seina sisse perpendikulaarselt; vedeliku molekulid, mis asuvad sfääri alumises 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 suunatud auru sisse pinna suhtes 45° nurga all. Kõikide jõudude (kaasa arvatud kaal) resultanti võib leida parallelo-



Joon. 80. Märgava vedeliku nõgus menisk.



Joon. 81. Mittemärgava vedeliku kumer menisk.

grammi reegli põhjal. Kuna jõud f_3 ja kaal on väga väikesed, võrreldes teiste jõududega, siis joonise lihtsustamiseks võib piirduda ainult kahe esimese jõu resultandi F 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.

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

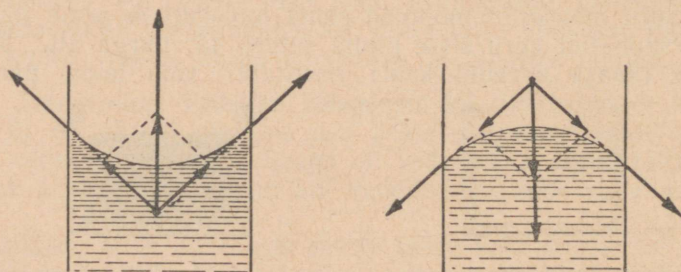
võib olla tasakaalus ainult sel juhul, kui tema pind on igas punktis risti selles punktis mõjuva jõuga. Seepärast *märgava vedeliku pind anuma seinas ääres paindub ja tõuseb seda mööda üles* (joon. 80); *mittemärgava vedeliku pind paindub ja langeb alla anuma seinas ääres* (joon. 81). Seinast teatud kaugusel on pinna kju määratud vertikaalselt alla suunatud raskusjõuga ja pinnarõhuga; nende jõudude toimele kujuneb pind horisontaalseks. Vedeliku kõverat pinda nimetatakse *meniskiks*.

Seega on *märgavatel vedelikkudel torudes nõgus menisk ja mittemärgavatel — kumer*.



Joon. 82. Menisk torudes: A — mittemärgamise puhul; B — märgamisel.

Meniski kõverus on seda selgemini märgatav, mida väiksem on vedeliku pind. Seepärast on ta suur kitsastes torudes (joon. 82) ja vähem märgatav laiades anumates. Viimastes võib pinna kõverust märgata ainult seinte läheduses.



Joon. 83. Pinnarõhk sõltub meniski kujust.

86. Pinnarõhu sõltuvus meniski kujust. Katsetel täheldatavad mitmesugused meniski kujud mõjuvad pinnarõhu suurusele.

Tõepoolest, kui vedelikku piirava pinna kju 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 anumades seisab kõrgemal kui jämedas (joon. 84a). 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 hüdrostaatilise rõhk kompenseerib molekulaarrõhu puudujäägi.

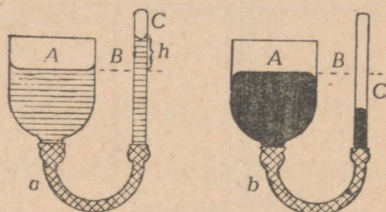
Kui samadesse ühendatud anumatesse (joon. 84b) kaliata elavhõbedat, siis elavhõbeda pind peenemas torus jääb madalamaks kui jämedas.

Samuti korralduvad igasuguste, antud tahket keha mittemärgavate vedelikkude nivood.

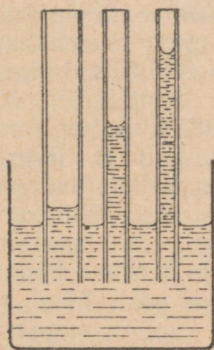
Kumerama meniski suurem siserõhk surub vedeliku peenes torus niikaua madalamale, kuni see molekulaarrõhu ülejääk tasakaalustatakse vedelikusamba hüdrostaatilise rõhuga jämeda toru selles osas, mis on kõrgemal vedeliku nivoost peenemas torus.

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).

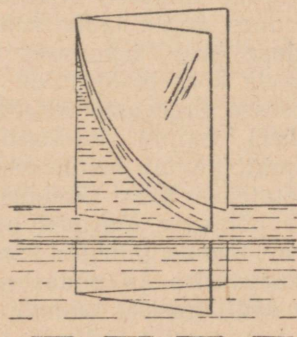
Väga peened torud kannavad kapillaartorude nime, ladinakeelsest sõnast *capillus* — juus.



Joon. 84. Märgava vedeliku tõus ja mittemärgava langus kapillaartorudes.



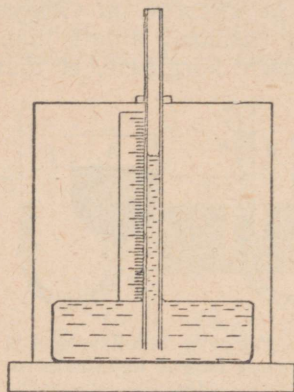
Joon. 85. Vedeliku tõus torus sõltub toru diameetrist.



Joon. 86. Märgava vedeliku tõus kahetahulises nurgas.

Vedelikkude omadust tõusta või langeda kapillaartorudes, võrreldes laiade anumate nivoodega, nimetatakse kapillaarsuseks.

Kui lasta laia anumasse, milles on vesi, kaks klaasplaati, mis on kokku pandud kahetahulise nurga kujuliselt (joon. 86), siis võib näha, et vedelik plaatide vahel seisab kõrgemal kui väljaspool neid ja seda kõrgemal, mida ligemal servale.



Joon. 87. Pindpinevuse mõõteriist.

ülelõigatud vedelikusamba kaalu, kus samba kõrgus on h ja tihe-
 dus D .

Kaal on võrdne $\pi r^2 h D g$.

Nende jõudude võrdsusest võib määrata α :

$$2\pi r \alpha = \pi r^2 h D g; \alpha = \frac{r h D g}{2}. \text{ Vee jaoks on } \alpha = \frac{r h g}{2}.$$

Pindpinevus, märgamine ja kapillaarsus esinevad looduses alati ja neid kasutatakse ära tehnikas. Väga paljud poorsed kehad imevad endasse vedelikku. See imemine tuleb sellest, et vedelik, olles antud tahke keha suhtes märgav, tõuseb kapillaarsuse-
 seaduse järgi keha sees pooridest moodustunud kapillaare mööda seda kõrgemale, 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 tuletatakse kaks järeldust maa harimiseks. Kui on tarvis takistada põhjavee tõusmist pinnale ja selle kaudu aurumist, siis tuleb ära lõhkuda pinnase kapillaarid. Seda tehakse künniga.

Niiskusvaestes ja põuastes maakohtades peab künd pinnase niiskuse säilitamiseks toimuma võimalikult vara ja sügavalt. Kui aga on tarvis esile 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 rul-

Katsed lubasid tuletada 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 mõõda mõjub jõud $2\pi r \alpha$, kus α on pindpinevus, mis arvestatakse ühe pikkusühiku kohta. See jõud tasakaalustab

liga üle või tambitakse kinni, mille tõttu kapillaarkäigud pinnases muutuvad peenemaks.

Taimede toitumine pinnasest saadavate soolade lahustega toimub juhtkimpude (trahheede) kaudu. Juhtkimbud on väga peenikesed kapillaarid; järelikult üheks lahuste tõusmise põhjuseks pinnasest taimede latvadesse 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 klaasimärgavat 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 a arvutus valemi järgi.

6. Korrake katset sellesama või teiste torudega, leidke a keskmine väärtus, võrrelge seda tabeli omaga ja leidke protsentuaalne viga.

89. **Vedeliku molekulaar-kineetiline teooria.** Difusioon ja võõrkeha osakeste Browni liikumine vedelikus viivad kaheldamatule otsusele, et vedeliku osakesed liiguvad. Vedelikkude molekulide kohesiooni suurus ei luba arvata, et vedeliku molekulid saaksid läbida sirgjoonelisi teid ilma teiste molekulide suurema 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 lii-

kumiste koos oksaga liiguvad (ronivad) 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° ja teine kord 30°? 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 anumal?

8. Missugune on vee ja petrooli tõusu kõrguste suhe, kui muud tingimused on ühesugused?

KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Kuidas asetub vedeliku pind väliste jõudude suhtes, kui vedelik on paigalolekus?

2. Mis võib öelda vedeliku kokkusurutatavuse kohta välisurve 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 tõestada 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 pinnarõhk 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. Perelman, Huvitav füüsika 1. osa, pt. V.

4. Tahke keha omadused.

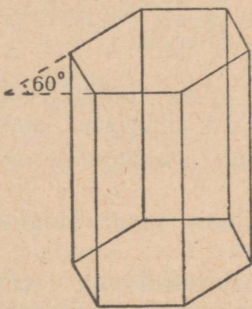
90. Kristalliline olek. Asudes tahkes olekus aine omaduste tundmaõppimisele, on kõigepealt tarvis täpsustada, mida tuleb mõista tahke keha all.

Selle sõna täpses tähenduses *tuleb tahke keha all mõista homogeenset keha, mis koosneb kristallidest.*

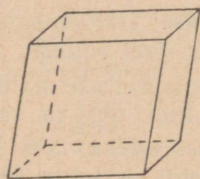
Kristalliks nimetatakse kindla geomeetrilise kujuga aineosakest, mis on piiratud loomulikkude tasapinnaliste tahkudega.

Kristallidest koosnevat keha nimetatakse kristalliliseks.

Kristalli tunnuseks pole ainult korrapärane, geomeetriline kuju tasapinnaliste tahkudega. Oluliseks tunnuseks on omaduste eri-



Joon. 88. Jää kristall.



Joon. 89. Islandi pao kristalli kuju — romboeeder.

nevus vastavalt suundadele. Ühe ja sama aine kristall juhib erinevates suundades isemoodi soojust ja elektrit, isemoodi laseb läbi valgust ja lõhastub lõökidest.

Kui võtta klaasplaat, katta ta õhukese vahakihiga ja puudutada teda tulise traadiga, siis võib näha, et sulanud vaha moodustab ringi: traadi poolt soojendatud klaas soojenes igas suunas ühteviisi.

Kui lõigata kristallist (mis ei kuulu regulaarsesse süsteemi) plaat ja korrata temaga sama katset, siis sulanud vaha täidab ellipsi pindala — järelikult on kristalli soojusejuhtivus erinevates suundades erinev.

Kristallid tekivad sulanud aine tahkestumisel (näiteks väävel), vedeliku aurumisel küllastunud lahusest (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 kuuetahtulisi prismsid (joonis 88); islandi pao kristall on romboedrikujuline (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 (mitmekujuseks).

Üks nendest kujudest osutub 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 märgata 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, tinglikus mõttes kuuluvad samuti kehad, mis on amorfses¹ olekus.

Amorfsust iseloomustab kristallide puudumine ja omaduste ühesugusus igas suunas.

Amorfsete kehade näideteks on klaas, opaal, vaigud, merivaik, bituumen, liim, pigi ja vaha.

Amorfses olekus on kehade kokkusurutavus, soojusjuhtivus, elektrijuhtivus, valguse kiirus ja mehhaanilised omadused igas suunas ühesugused. Murrukoht on karpjas, mitte aga tasapinnaline nagu kristallidel.

Sulamisel lähevad amorfsed kehad vedelasse olekusse järkjärgult (§ 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 vedelas olekus 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 kaalu mõjul oma kuju. Pikk klaasitoru, asetatud otstega tugelede, kõverdub aja jooksul oma kaalu mõjul; lehtrisse visatud pigitükid valguvad lehtrit mööda allapoole 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 vajub sellest läbi

¹ Kreeka keeles *amorfos* — kujuta.

põhja ja korgitükk kerkib pinnale. Sellised kujumuutused toimuvad temperatuuri tõusmisel kiiremini.

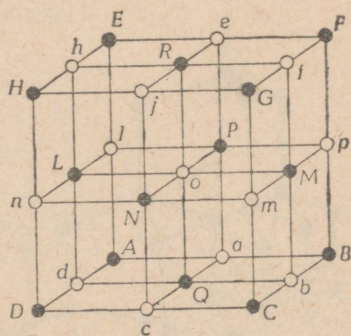
Kuna amorfses olekus molekulid ei jõudnud võtta kristallilisele olekule omast korrastatud asetust ja sulamissoojust seejuures ei eraldunud, siis amorfse aine energia tagavara on suurem kui kristallilisel ainel. Kuid ilma välise mõjutuseta võib keha energia muutuda ainult vähenemise suunas. *Seepärast 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 suhkruga 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 selles korrapäraste ja võrdsetel kaugustel asetsevate ridadena.

1891. aastal tuletas silmapaistev vene teadlane J. Fjodorov¹ 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 röntgenikiirte² abil. Nende meetodite väljatöötamisel etendas tähtsat osa teine vene teadlane J. Vulf. Määratu uurimise hulk kõige mitmekesisemaid uurimusi kristallide struktuuri



Joon. 90. Kivisoola kristalli ruumvõre: ● — naatriumi ioonid, ○ — kloori ioonid.

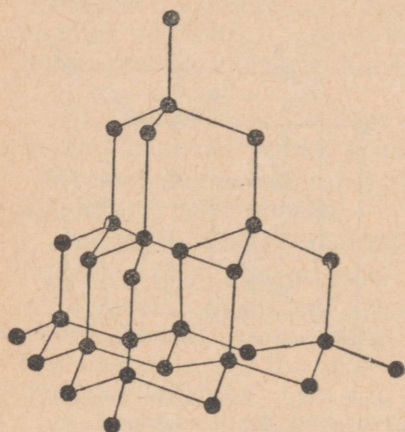
¹ Jevgraf Stepanovič Fjodorov (1853—1919) on kristallograafia teoreetiliste aluste loojaks. Tema tegi teaduses esimesena kindlaks, et kristalle moodustavad osakesed võivad üksteisega kombineeruda mitte rohkem kui 230-l viisil (seadusel); igale seadusele vastavalt võivad kristalliseeruda ainult teatud keemilised ained. J. Fjodorov lõi kristalloeemilise 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 uued rikkalikumad võimalused aine uurimiseks. Kõik geoloogid ja kristallograafid tunnevad «Fjodorovi gonimeetrit» ja «Fjodorovi universaallauakest». J. Fjodorov uuris Uraalis paljude rajoonide geoloogilist ehitust. Ta oli Peterburi Mäeinstituudi professoriks ja direktoriks; pidas loenguid Moskva Põllumajanduse Instituudis (praegune Timirjazevi-nimeline Põllumajanduse Akadeemia).

² Kuna enne röntgenikiirte õppimist (III osa) pole võimalik seletada selle uurimise meetodit, siis peab siin piirduma ainult uurimise tulemuste esitamisega.

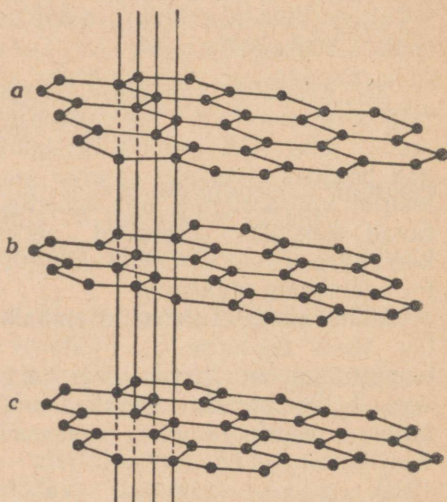
kohta kinnitasid hiilgavalt J. Fjodorovi väiteid. J. Fjodorovi poolt antud kristallilise ehituse seadused on tänapäeval vankumatuks aluseks, millele ehitab oma hoone nüüdisaja õpetus kristallidest ehk kristallograafia ja ühes sellega ka tänapäeva õpetus aine ehitusest.

Vaatleme kivisoola kristalli ehitust (joon. 90). Kivisool on kloori ja naatriumi keemiline ühend — NaCl.

Kivisoola kristall koosneb üksikutest kloori- ja naatriumi aatomitest, misjuures nende aatomid pole neutraalsed, vaid kannavad



Joon. 90-a.



Joon. 90-b.

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 positiivse laenguga suuruselt võrdne negatiivne laeng. Kloori ja naatriumi ioonid on igas kolmes suunas asetatud vaheldumisi võrdsetele kaugustele. Nii naatriumi ioon (joonise must ring) kui ka kloori ioon (joonise valge ring) asetsevad teise elemendi kuueiooni keskele!

Jõud, millega ioonid mõjuvad vastastikku ja mis annavad kristallile tugevuse, pole midagi muud kui elektriliselt laetud kehade vastastikused mõjud (vt. III osa 1. ptk.).

Ioonide, molekulide või aatomite poolt tekitatud ridade lõikepunktid moodustavad ruumis niinimetatud ruumvõre. Iga kahe rea lõikumine annab võre sõlme — iooni, molekuli või aatomi asukoha.

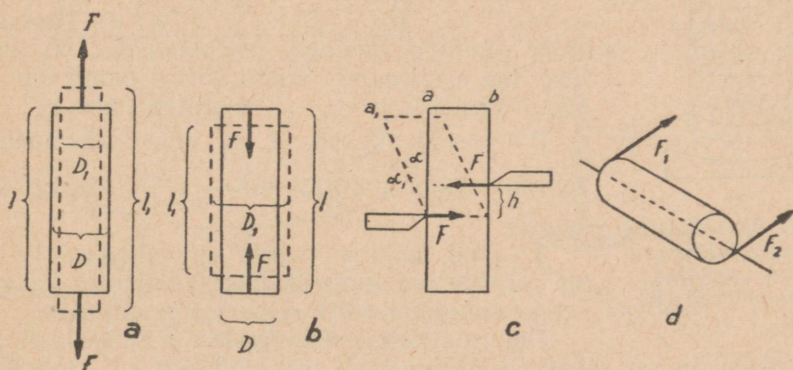
Kristalliseerumise momendil kohesioonijõud korraldavad molekulid tihedamalt ühtedes suundades ja hõredamalt teistes. Mole-

ku'lid või nende osad — ioonid — korralduvad peaaesjalikult paralleelsetes tasapindades; mitmesugused paralleelsete tasapindade grupid võivad lõikuda ruumis mitmesuguste nurkade all, millest tekivadki kristallide mitmesugused kujud.

Kristallide kujude mitmekesisus nähtavasti mõjutab kristalliliste ainete füüsikaliste omaduste mitmekesisust. Nii on teemandi kristalli ruumvõrel joonisel 90-a kujutatud väljumus, teine süsiniku eriliik — grafiit — aga 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 nii kuju kui ka ruumala muutus korraga mõlemal mõjutuse osalisel.



Joon. 91. Deformatsiooni põhiliiikide skeem.

Keha kuju või ruumala muutust nimetatakse deformatsiooniks¹.

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 mööda keha pikitelge vastassuunaliselt väljapoole (joon. 91 a).

Deformatsiooni nimetatakse tõmbedeformatsiooniks. Tõmbe puhul keha pikeneb pikisuunas ja väheneb ristisuunas; keha ruumala suureneb.

Tõmbedeformatsiooni iseloomustus:

a) Kui algpikkus on l , pikkus peale tõmmet l_1 , siis $\Delta l = l_1 - l$ nimetatakse absoluutseks piknemiseks; absoluutse

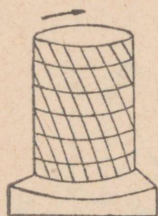
¹ Deformatio tähendab ladina keeles kuju muutust.

pikenemise suhet algpikkusega $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ nimetatakse suhteliseks piknemiseks.

b) Kui varva algsdiameter on D , peale tõmmet — D_1 , siis $\Delta D = D_1 - D$ nimetatakse absoluutseks ristkokkusurumiseks; absoluutse ristkokkusurumise suhet algsdiametriga $\epsilon_q = \frac{\Delta D}{D}$ nimetatakse suhteliseks ristkokkusurumiseks.

Tõmbe juures on ϵ positiivne arv, ϵ_q aga negatiivne arv.

2. Jõud mõjuvad mööda keha pikitelge vastassuunaliselt sissepoole (joon. 91 b).



Joon. 92. Väanatud silindri moodustajad asetsevad kruvijoonele.

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.

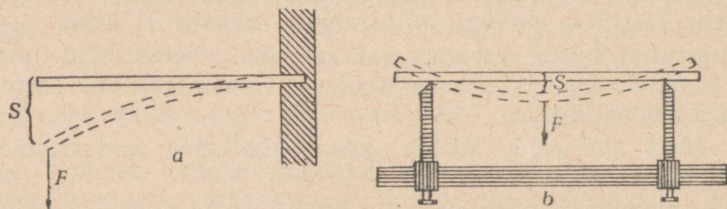
Poisson leidis, et iga aine jaoks teatud deformatsiooni piirides suhe $\frac{\epsilon}{\epsilon_q}$ on konstantne suurus.

3. Jõud mõjuvad varva pikiteljega risti, on paralleelsed ning 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).



Joon. 93. Paine.

Deformatsiooni nimetatakse väändeks (joon. 92).

Väane tekib masinate võllides, kruvides, puurides, kruvikeerajates jts.

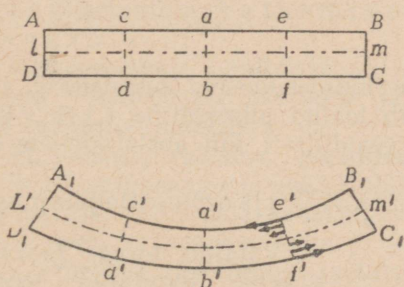
5. Deformatsiooniga, mida nimetatakse paindeks, on tegemist siis, kui varb (palk) pannakse otstega aluste peale ja koor-

matakse teda keskelt, või kinnitatakse ta ühest otsast ja koormatakse teisest otsast.

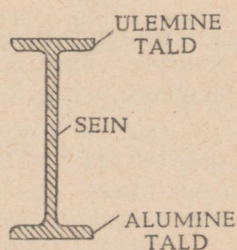
Iseloomustab painet läbipaindumine S (joon. 93).

Et määrata prussi vastupidavust paindele, on tarvis teada mitte ükski 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.



Joon. 94. Deformatsioon painde puhul. punktiirjoon on neutraalne kiht, noolekesed löikes e' on selles löikes mõjuvad välisjõud.



Joon. 95. I-raua läbilõige.

Seega on prussi kihid seda suurema pinge all, mida kaugemal nemad asuvad neutraalsest kihist (joon. 94).

Seepärast on sama suure materjali hulga juures toru vastupidavam paindele kui täisvarb (varva keskmine osa ei ole pinge all, keskmises osas asetsev materjal ei kannu koormust ja osutub ülearuseks). Meie skeleti luud, olles torud, hoiavad meid ülal paremini kui siis, kui nad oleksid niisama suurest ainehulgast täisvarvad.

Kõrreliste varred (kõrred) on torulised; selle tõttu panevad nad välistele jõududele, näiteks tuulele, paremini vastu kui sel juhul, kui kogu kõrre materjal oleks kontsentreerunud täisvarresse.

I-raud (joon. 95) täidab ka 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).

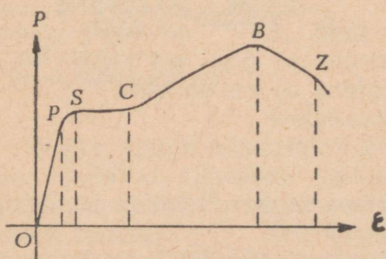
Et välja selgitada deformatsiooni sõltuvust koormuse suuruselt, valime ühe mingi deformatsiooni liigi. Peatume tõmbel. Koormust hakkame iseloomustama erilise suurusega, mida nimetatakse pingeks. *Pinge on suurus, mis on mõõdetav ühele pinnahikule mõjuva jõuga.*

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 abstsissiteljele kanname suhtelise pikenemise ($\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$) ja ordinaatteljele pinge p .



Joon. 96. Graafik, mis kujutab valatud terase suhtelise pikenemise ϵ sõltuvust koormusest p .

Valatud terase jaoks on graafik kujutatud joonisel 96. Graafik võimaldab eraldada järgmised staadiumid, mida läbib uuritav aine (metall) koormuse suurendamisel.

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 pinge vahel, nimetatakse elastseks deformatsiooniks. Elastsete deformatsioonide puhul taastub 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 suurendamisel (kõvera osa PS) pikenemine kasvab kiiremini kui pinge juurdekasv; võrdelisus on rikutud. Katse näitab, et sel juhul koormamise lakkamisel ei kao defor-

matsioon täielikult. Sellist deformatsiooni nimetatakse mitte-elastseks deformatsiooniks (järeljäävaks 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 abstsissiteljega. 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 ahenemine ja lõpuks katkemine mingil kohal. Pinget, mille puhul tekib katkemine, nimetatakse katkemispingeks ehk purustavaks pingeks.

Katkemispinge tundmisel on suur tähtsus ehitiste materjalide valikul. Sellepärast uuritakse iga materjali omadused 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 suhtumise järgi koormuse suurenemisse järgmisteks liikideks.

1. *Sitked ained.* Ainet nimetatakse sitkeks, kui temal ilmneb voolavus enne katkemist. Niisuguste ainete juures ilmneb teravalt piirkond, kus deformatsioon ja pinge on võrdelised. Järelikult on nendel ainetel lai elastsete deformatsioonide piirkond. Seepärast nimetatakse selliseid aineid elastseteks. Sellesse liiki kuuluvad paljud metallid, nende hulgas on esimesel kohal teras.

2. *Rabedad ained.* Ainet nimetatakse rabedaks, kui temal 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 muudetud 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, hõõguv raud.

Küllaldaste koormustega võib ka 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 terasrööpaid; kül-

stantsimise 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. Ainete omaduste seesuguse muutumisega hiigelsuurte rõhkude all on seletatav mitmesuguste kivimite tekkinine.

96. Lubatud pinged. Seda pinget keha hädaohutikus kohas, mille puhul võib keha lügeda küllaldaselt tugevaks ja kestavaks, 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 tõmbe ja surve:

Materjali nimetus	Tõmbepepinge kG mm ² -tes		Survepinge kG. mm ² -tes	
	katkemis- pinge	lubatud	purustav	lubatud
Raud val'simisel	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 deformatsiooniks. Elastse deformatsiooni seaduse avastas inglise füüsik Hooke (l.: huuk) (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:

$$\varepsilon = \frac{p}{E}. \quad (\text{XIII-a})$$

Suurust E nimetatakse elastsus- ehk Young'i mooduliks (mööduks).

Kui asendada ε ja p nende väärtustega, siis võib Hooke'i seaduse valemit arendada järgmiselt:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{ES} \quad \text{ehk} \quad \boxed{\Delta l = \frac{Fl}{ES}} \quad (\text{XIII-b})$$

Seadust sel kujul sõnastatakse 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 $\Delta l = l$ ja

$$S = 1; \text{ siis } \frac{\Delta l}{l} = 1 \text{ ja } E = F.$$

Järelikult *elastsusmoodul on arvuliselt võrdne pingega, mille puhul absoluutne pikenemine oleks 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 $E = \frac{Fl}{\Delta l S}$ järgi.

Antud E puhul võib arvutada iga suurust, mis kuulub valemisse XIII-b.

98. **Laboratoorne töö 10.** Deformatsiooni suuruse ja deformeeriva jõu vahelise sõltuvuse uurimine.

Töö vahendid: 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.

Töö käik. 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.

3. Riputage vedru alumisele konksule üks võrdsetest koormustest ja märkige ära osuti näit.

4. Lisage järk-järgult ühe koormuse kaupa vedrule raskust juurde, kirjutades tabelisse kogu raskus ja vastavad osuti näidud.

5. Riputanud üles 6—12 koormust (sõltuvalt vedru omadustest), võtke koormused ära ühekaupa ja kirjutage iga kord tabeli vastavasse lahtrisse see skaala jaotis, mille kohale jäi peatuma horisontaalne osuti.

6. Iga koormuse arvu jaoks arvutage osuti näitude keskmine, mis on saadud koormuste lisamisel ja äravõtmisel.

Katse nr.	Koormuse suurus F .	Osuti näidud koormamisel	Osuti näidud koormusest vabanemisel	Kahe osuti näidu keskmine	Vedru pikkuse juurdekasv Δl	Pikkuse juurdekasvu ja koormuse suhe $\frac{\Delta l}{F}$
1.	0					

7. Lahutades igast tabeli viienda lahtri arvust sama lahtri järgnev arv, arvutage antud koormatisele 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 iga-suguse 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 taastamisel 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 difusioon, kuigi väga aeglane, 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 liikumine¹.

Kristallilises kehas on peaaegu kõikidel aatomitel² teatud tasakaalu-asendid ja aatomid ei liigu gruppide kaupa üksteise suhtes (erinevus vedelikust). Kristallilise keha aatomid ainult võnguvad tasakaalu-asendi ümber ja ei liigu translatoorselt (erinevus gaasidest).

Nende võnkumiste keskmine energia on konstantse temperatuuri puhul 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 mõõdet on piiratud puuri mõõdetega.

Harjutus 9.

1. Elektrolüütvasest traat pikkusega 1,5 m ja ristlõikega 3 mm² pikenes 20 kG-se jõu mõjul 0,9 mm võrra. Leida Young'i moodul.

$$\text{Vastus: } 11\,100 \frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$$

2. Missugust jõudu on tarvis ümmarguse duralumiiniumist varva katkibimiseks, kui varva diameeter on 0,8 cm ja tugevuse piir katkemise vastu 40 $\frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$?

$$\text{Vastus: } \approx 2000 \text{ kG.}$$

3. 2,4 m pikkuse malmsamba ristlõige on 1500 cm². Leida 10 000 kG-sest koormusest tekkinud samba kokkusurumise suurus, kui Young'i moodul on 8000 $\frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$.

$$\text{Vastus: } \approx 0,02 \text{ mm.}$$

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 $\frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$.

$$\text{Vastus: } \approx 0,7 \text{ mm.}$$

5. Kas ületatakse elastsuspiiri 40 $\frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$, kui eelmise ülesande traadile riputada 4 kG-ne koormus?

6. Kas kannab ülesandes 4 traat koormust 10 kG, kui tugevus katkemise vastu on 60 $\frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$?

¹ Ei puudu võimalus, et eri juhtudel mõned aatomid lähevad välja naaberaatomite mõju alt ja liiguvad translatoorselt: nii toimub tahkete kehade aurumine.

² või ioonidel.

7. Noolutatud terase elastsuspiir on $58,3 \frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$, Young'i moodul aga $20\,000 \frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$. Kas on tegemist elastse või jääva deformatsiooniga, kui traat, mille pikkus on 2 m ja ristlõige $0,8 \text{ mm}^2$, pikeneb 6 mm võrra?

8. Arvutada telliskorstna suurim lubatud kõrgus, kui survetugevus on $100 \frac{\text{kG}}{\text{cm}^2}$, tugevuse varu on 10 ja tellise erikaal on $1,6 \frac{\text{G}}{\text{cm}^3}$.

Vastus: 62,5 m.

9. Missugust jõudu on tarvis, et raudvarba, mille pikkus on 1,6 m ja ristlõige $0,8 \text{ mm}^2$, venitada ilma temperatuuri muutmiseta sama palju, kui ta võib pikeneda soojenemisel 0° -st kuni 40° -ni?

Vastus: $\approx 8 \text{ kG}$.

10. Missugune on väikseim pikkus, mille juures vasktraat võib katkeda oma enese raskusest, kui traadi tõmbetugevus on $4200 \frac{\text{kG}}{\text{cm}^2}$ (vase erikaal on $8,9 \frac{\text{G}}{\text{cm}^3}$)?

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 $1000 \frac{\text{kG}}{\text{mm}^2}$.

Vastus: 4 mm^2 .

KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Missuguseid kehi nimetatakse tahketeks selle sõna täpses tähenduses?
2. Mida nimetatakse kristalliks?
3. Millega seletatakse kristallilise kaju korrapärasust?
4. Mida nimetatakse aine elastsuseks?
5. Missuguse elastsuse liigiga on tegemist ainel 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, rabadad ja plastilised ained?
11. Mida nimetatakse elastsusmooduliks ja missugune on selle füüsikaline tähendus?
12. Missugustes ühikutes mõõdetakse elastsusmoodulit?
13. Missugused energia muundumised võivad esineda deformatsioonides?

Kirjandus. Перelman. Huvitav füüsika I, pt. V. Вульф, Симметрия и её проявления в природе. Ходаков, Архитектура кристаллов.

IV. Aine agregaatoleku muutumine.

I. Sulamine ja tahkestumine.

101. Sulamise ja tahkestumise temperatuur. Sulamise ja tahkestumise nähtusi käsitleti põhijoontes juba mittetäieliku kesk-kooli kursuses. Tuletame meelde põhilisi fakte ja reegleid.

Sulamiseks nimetatakse keha üleminekut tahkest olekust vedelasse, kui kehale antakse soojust.

Tahkestumiseks nimetatakse üleminekut vedelast olekust tahkesse, kui keha soojust ära annab.

Iga kristallilise aine jaoks on teatud välisrõhu juures kindel sulamistemperatuur, viimane osutub ka tahkestumistemperatuuriks.

Sulamistemperatuuri normaalrõhu puhul nimetatakse sulamispunktiks.

Amorfset kehad — klaas, pigi, vaha, parafiin — pehmenevad soojenemisel järk-järgult, muutudes ikka vähem sitketeks ja nad ei evi kindlat sulamistemperatuuri. Samuti toimub ka nende tahkestumise protsess.

Puhtkristalliliste ainete sulamine ja tahkestumine normaalrõhu puhul 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 sulava 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 tekkinud vedeliku temperatuuri.

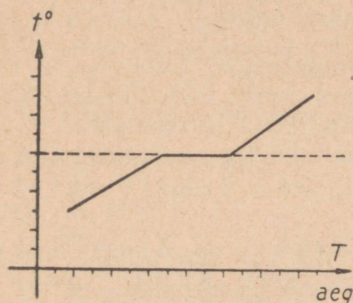
Kui kujutada graafiliselt aine temperatuuri sõltuvust ajast, mille jooksul tema saab soojust, kandes koordinaattelgedele aja ja temperatuuri, siis graafik näeb välja nii, nagu on kujutatud joon. 97, kusjuures horisontaalne lõik osutab temperatuuri konstantsusele sulamise ajal.

Vastupidine käik — vedeliku jahtumine, tahkestumine ja tahke keha jahtumine on kujutatud joon. 98.

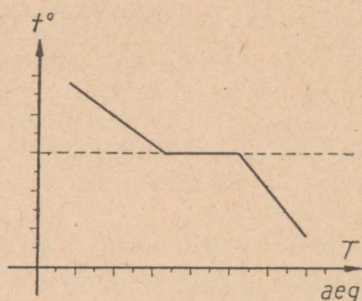
Kõikidest sama liiki katsetest võib tuletada seaduse:

Kristallilise aine kogu sulamise ja tahkestumise ajaks jääb temperatuur konstantseks.

Sulamid sulavad peaaegu alati madalamal temperatuuril kui nende koostismetallid. Näit. sulab inglistina 238° , seatina 327° temperatuuril; inglis- ja seatina su'am (vahekord 1:2) sulab umbes 170° temperatuuril.



Joon. 97.



Joon. 98.

Peale sulamistemperatuuri muutumise muutuvad ka sulamite teised omadused, võrreldes puhaste metallide omadustega. Suureneb näiteks tugevus. Lennukiehituses 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 hüposulfiidiga (väävlisshapu naatrium). Hüposulfiidi sulamispunkt on 48° . Hüposulfiid sulab katseklaasis ja jääb temas vedelasse olekusse isegi toatemperatuurini jahtumisel. Kui visata katseklaasi hüposulfiidkristallike 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.

Vee ülejahutamine toimub ka looduses. Uduatilgakesed võivad jääda jäätumatuks isegi tugevate külmade puhul. Niisugused tilgakesed moodustavad maha langedes kiilasjää. Nad on ka hädaohtlikud lennukitele, 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 temperatuuri tõus-soojendamisel näitab tahke keha molekulide võnkliikumise energia suurenemist.

Edasine soojuse juurdevool väljastpoolt, kui temperatuur saavutab sulamispunkti, kulutatakse aine molekulide (või ionide) vaheliste seoste muutmisele, tööks kohesioonijõudude vastu. Soojuse kulu seoste muutmise tööks ei tõsta molekulide liikumisenegiat ja järelikult ei ole avastatav termomeetriga; ta läheb täielikult oleku muutmiseks. Sellepärast oli selle soojuse osa endiseks nimetuseks varjatud soojus.

Mitmesugused ained erinevad üksteisest selle soojushulga poolest, mis on vajalik igaühe sulatamiseks võrdsetes tingimustes. Seepärast on selle aine iseloomustamiseks tarvitusele võetud 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 eraldub 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

$$\boxed{Q = \lambda m.} \quad (\text{XIV})$$

Tänapäeval pole ühtegi harilikes tingimustes tahket keemilist elementi, mida ei saaks muuta vedelaks. Isegi süsinikku, mis normaalarõhu all temperatuuri tõusmisega läheb tahkest olekust otse üle gaasilisse, saadi juba 1915. a. vedelas olekus 22-atmosfäärilise rõhu all ja umbes 8000° temperatuuril.

103. Soojusliku tasakaalu võrrand sulamisel või tahkestumisel. Vaatame, missuguse kuju saavad soojushulga arvutamisevalemid 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 c_t ? Segu lõplik temperatuur — θ .

Vedela aine poolt jahtumisel äraantud soojushulk temperatuurist t tahkestumistemperatuurini t_0 :

$$Q = c_v m (t - t_0).$$

Aine poolt tahkestumisel äraantud soojushulk ilma temperatuuri muutuseta (sulamis-soojus):

$$Q_1 = \lambda m.$$

Tahke aine poolt tahkestumisel äraantud soojushulk tahkestumistemperatuurist t_0 kuni segu temperatuurini θ :

$$Q_2 = c_t m (t_0 - \theta).$$

$$Q + Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4.$$

$$c_v m (t - t_0) + \lambda m + c_t m (t_0 - \theta) = (c_1 m_1 + c_2 m_2) (\theta - t_1).$$

Siit määrame sulamissoojuse:

$$\lambda = \frac{(c_1 m_1 + c_2 m_2) (\theta - t_1) - c_v m (t - t_0) - c_t m (t_0 - \theta)}{m}.$$

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 :

$$Q_4 = c_2 m_2 (\theta - t_1).$$

104. Keha ruumala muutumine sulamisel ja tahkestumisel. Rõhuv enamik kehi (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 pinna nõgusus seletub sellega, et parafiini ruumala on vähenenud. Nõgusat pinda võib näha ka terase- ja seatinatükkidel, mis on seletatav, nagu parafiinigi juures, nende ruumalade vähenemisega tahkestumisel.

Jää ja malm seevastu 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, mitte aga ei vähenda oma ruumala. Külmumisei toimub vee ruumala suurenemine sellise suure jõuga, et isegi paksuseinalised veega täidetud ja tihedalt suletud malmballoonid lõhkevad, kui vesi nendes külmub.

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 pinnamoole. Vesi, mis tungib kivimite väikseimasse pragudesse mäeharjadel, külmub nendes, suurendades oma paisumisega pragusid, kuni tekivad kaljude purunenised, libisemised ja varisemised; nii toimub päevast päeva mägede alanemine ja orgude täitumine laguainetega.

105. Rõhu mõju sulamispunktile. Mitmesuguste rõhkude all olevate ainete sulamise uurimine näitas, et ained selles suhtes jagunevad nendekssamadeks kaheks grupiks. Nendel ainetel, mille ruumala sulamisel suureneb, tõuseb sulamistemperatuur rõhu suurenemisel, rõhu vähenemisel 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 suurenemisel sulamistemperatuur, rõhu vähenemisel ta tõuseb.

Sel juhul aitab rõhk kaasa ruumala vähenemisele, mis toimub sulamisel, sellepärast saabub sulamine varem, s. t. madalamal temperatuuril kui normaalrõhu puhul.

Jää sulamistemperatuur langeb $0,0075^\circ$ võrra iga juurdetulnud atmosfääri kohta.

106. Laboratoorne töö 11. Jää sulamissoojuse määramine.

Töövahendid: 1) kalorimeeter; 2) kaalud vihtidega; 3) termomeeter; 4) peeneks raiutud jää; 5) vesi.

Katse nr.	Kalorimeetri mass m	Vee mass M	Jää mass m_1	Vee temperatuur t	Segu temperatuur θ	Jää sulamissoojus

Töökäik. 1. Kaaluge ära kalorimeeter.

2. Kandke kalorimeetri mass ja teised andmed tabelisse.

3. Määrake vee mass ja valage vesi kalorimeetrisse.

Märkus. Vett peab kalorimeetrisse valama nii palju, et elavhõbeda-sambakest termomeetris oleks hõlpus vaadelda.

4. Mõõtke ja kirjutage üles vee temperatuur kalorimeetris just enne jää vette laskmist.

5. Võtke väikesed jäätükid, kuivatage nad filterpaberiga ja laske nad kalorimeetri vette.

6. Segades segaja abil vett jääga, jälgige, millal sulavad viimased jäätükikesed. Kirjutage üles vee temperatuur jää sulamise lõpul.

7. Kaaluge nüüd ära vesi kalorimeetris ja määrake lahutamise teel jää mass.

8. Võttes tabelist kalorimeetri metaalli 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°-st jääd muudeti soojendamisega 30°-seks veeks. Kui palju kulutati soojust?

2. 8 kg jääd temperatuuriga -30° muudeti soojendamisega 20°-seks veeks. Kui palju kulus soojust?

Vastus: 920 kcal.

3. Kui palju jääd temperatuuriga $t_1 = 0^\circ$ on vaja lasta 5 l vette temperatuuriga $t_2 = 40^\circ$, et saada 0°-st vett?

Vastus: 2,5 kg.

4. 2 l vett temperatuuriga $t_1 = 90^\circ$ on vaja kiiresti jahutada 10°-ni. Määrake, kui palju 0°-st jääd peab selleks laskma vette?

Vastus 1,8 kg.

5. Kui palju on tarvis soojust, et sulatada 10 kg vaske, mille temperatuur on $t = 10^\circ$?

6. 150 g sulatatud inglistina sulamistemperatuuriga kallatakse 300 g vette temperatuuriga $t = 12^\circ$. Arvutada lõpptemperatuur segunemisel.

Vastus: $\approx 25^\circ$.

7. 5 kg seatina on tarvis sulatada jootmislambi abil. Kui palju petrooli kulutatakse sulatamise ajal, kui lambi kasutegur on 30%, seatina algtemperatuur aga 17°.

Vastus: ≈ 22 g.

8. Haavlite valmistamisel jookseb sulatatud seatina sulamistemperatuuris jugadena vette. Määrata, missuguseks kujuneb 20 l vee temperatuur, kui tema algtemperatuur $t = 10^\circ$ ja temaga jahutatakse 50 kg haavleid?

Vastus: $\approx 44^\circ$.

9. Tänavasõidu- ja kõnniteelt, mille pindala on 10 000 m², on lumi koristatud lumesulatajate abil. Määrata, kui palju on selleks kulutatud puid, kui lumekatte paksus oli 10 cm, lume erikaal on 0,1, lume temperatuur -20°, puude kütteväärtus 3200 $\frac{\text{cal}}{\text{kg}}$, lumesulatajate kasutegur 70%.

Vastus: ≈ 4000 kg.

10. Kevadiste hommikukülmade ajal tekib taimedel härmatis. Kas härmatis tekkimine 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** (ehk aurustumiseks).

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 tarvi-taksime eriliste laboratoorsete katsete abi, kindlaks teha järgmised aurumise välised tunnused: 1) aurumine toimub igasugusel temperatuuril, 2) aurumine toimub ainult vedeliku pinnalt.

Kerge on samuti leida igapäevastest vaatlustest näiteid, mis annavad võimalust ära näidata 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 toimub ta kiiremini tuule käes, sest tuul viib ära tekkinud aurud. Kinnises anum as aurumine vedeliku peal olevasse ruumi järk-järgult aeglustub ja saabub moment, kus auru hulk ja vedeliku hulk enam ei muutu. Sellistes tingimustes nimetatakse auru seda ruumi küllastavaks¹ auruks.

Kui antud ruumis võib veel muutuda aurude hulk, siis nimetatakse niisugustes tingimustes auru mitte küllastavaks auruks.

109. Aurumise seletamine molekulaar-kineetilise teooria abil.

Molekulaar-kineetilise teooria põhjal on vedeliku molekulid alalisel liikumises, misjuures erinevatel molekulidel on erinev kiirus. Vedeliku pealispinnal suure kiirusega liikuvad molekulid võivad sealt välja lennata niisugusele kaugusele (väljapoole molekuli mõjusfääri), millisel lakkab neile mõjumast 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 pealispinnast, ja auru tekkimine toimub kiiremini. Kui vedeliku temperatuur tõuseb, siis suureneb molekulide liikumise keskmine kiirus, suureneb vedelikust väljalennanud molekulide arv ja jällegi toimub kiiremini auru tekkimine. Kui vedelik on suletud kinnisesse anumasse, siis tema auru molekulid, mis liiguvad sirgjoonelisi teid mööda vedeliku peal olevas ruumis, põrkuvad kokku omavahel ja anuma seintega. Nende põrkumiste juures võib molekulide liikumiste suund muududa nii, 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 auru hulk; auru on saanud küllastavaks. *Küllastamise korral molekulide väljalend ei lakka*, vaid väljalendavate molekulide arv saab sama ajavahemiku jooksul vedelikku sattuvate molekulide arvuga võrdseks. Sellist vedeliku ja auru vahekorda nimetatakse dünaamiliseks (liikuvaks) tasakaaluks. Järelikult küllastavaks auruks nimetatakse auru, mis on oma vedelikuga

¹ Mõnes raamatus nimetatakse niisugust auru küllastunud auruks.

dünaamilises tasakaalus. Sama aine vedelikuga kinnises ruumis kauemat aega koos olev aur on alati küllastav.

110. Aurumissoojus. Auru tekkimisel liiguvad auru molekulid vastu kohesioonijõude, ületades nende jõudude takistust. Igasuguse takistuse ületamiseks on tarvis kulutada energiat. Auru tekkimiseks 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 auru tekkimisega käib kaasas soojuse neelamine ja igasuguse auru muutumisega vedelikuks (kondensatsioon, tihenemine) soojuse eraldumine. Ühesugustel muudel tingimustel vajab iga vedelik isesugust soojushulka auru tekkimisel. Kehade selle omaduse iseloomustamiseks on tarvitusele võetud eriline suurus, mida nimetatakse aurumissoojuseks.

Aurumissoojus on suurus, mida mõõdetakse soojushulgaga, mis on vajalik 1 g vedeliku muutmiseks auruks auru tekkimise temperatuuril.

Aurumissoojuse ühikuteks on

$$\frac{\text{cal}}{\text{g}} \quad \text{ja} \quad \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Kui tähistada aurumissoojust r -ga, auruva vedeliku massi m -ga, auru tekkimiseks vajalikku soojushulka Q -ga, siis

$$\boxed{Q = rm.} \quad (\text{XV})$$

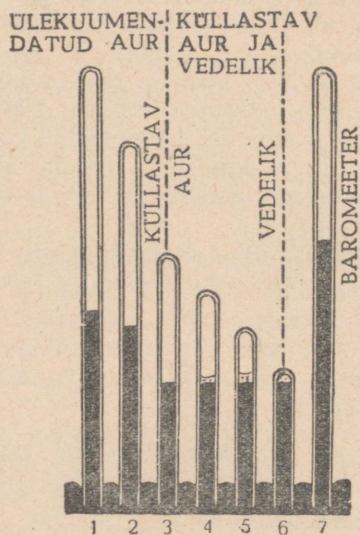
Kondenseerumisel eraldab iga gramm auru niisuguse soojushulga, mis oleks vajalik samal temperatuuril 1 g vee muutmiseks auruks.

Vaatlused annavad palju näiteid temperatuuri langemise kohta aurumisel või tema tõusu 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 eeteriga, 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 jahe-dana poorsetes anumates: tungides läbi pooride, niiskuse kiht aurub, alandades anuma ja järelejäänud vee temperatuuri; 6) vee

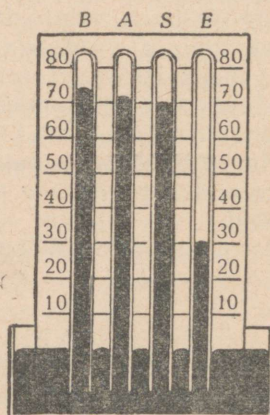
või piima jahutamiseks mässitakse anum märga riidesse; 7) tuulevaikse ilmaga võivad vihm või lumi takistada temperatuuri alane-
mist soojust eraldumise tagajärjel auru kondenseerumisel sademe-
teks; 8) aurukeskküttes, mida rakendatakse enamasti vabrikuhoo-
netes, saunades jms., saadakse soojust auru kondenseerumisel
veeks.

Jahtumist aurumise juures võib näidata katseliselt, kui niisu-
tada käsna või vatti eetriga ja lasta eetril auruda. Siis ilmub käs-
nale härmatis: eeter ja ümbritsev õhk jahtuvad aurumisel kuni 0°
ja madalama temperatuurini ja õhust sadestub härmatise näol
temas sisalduv niiskus.

**111. Auru ruumala ja rõhu vaheline sõltuvus konstantsel tem-
peratuuril.** Et uurida auru ruumala ja rõhu vahelist sõltuvust,



Joon. 99. Auru rõhu muutumise sõltuvalt ruumala muutumisest ja mitteküllastava auru üleminek teataval temperatuuril küllastavaks auruks.



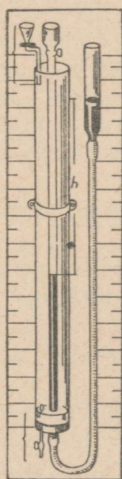
Joon. 100. Mitmesuguste küllastavate aurude rõhud on erinevad: torus A — vesi, torus S — piiritus; torus E — eeter; torus B — elavhõbe.

peab tekitama auru mingis kinnises ruumis ja mõõtma tema rõhku mitmesuguste ruumalade juures. Seda on sobiv teha Torricelli toru elavhõbedapealses ruumis.

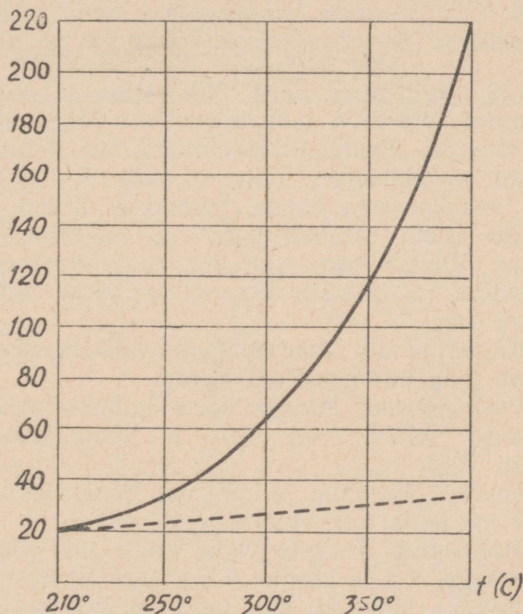
Võtame kaks elavhõbebaromeetrit ja laseme ühesse neist koolu-
tatud pipeti abil üks-kaks tilka uuritavat vedelikku, näit. eetrit
(joon. 99).

Vedeliku tilk tõuseb elavhõbedapealsesse ruumi ja aurub seal.
Auru rõhul elavhõbe langeb. Selle toru ja baromeetri elavhõbeda

nivoode vahe annab auru rõhu elavhõbedasamba sentimeetrites (joon. 99, asendid 1 ja 7). Kui torus ei ilmne mingeid vedeliku jälgi, siis võib auru pidada mitteküllastavaks. Tõstame esimest toru anumast ülespoole ja suurendame sellega auru ruumala. Võrreldes elavhõbedasambaid uuritavas torus ja baromeetri torus, meie näeme, et ruumala suurenemisel auru rõhk väheneb. Toru langetamisega ruumala vähendades näeme rõhu suurenemist (joon. 99, asendid 2 ja 7).



Joon. 101. Katseriist auru rõhkude mõõtmiseks mitmesuguste temperatuuride puhul.



Joon. 102. Pideva kõverjoonega on kujutatud auru rõhu muutumine, punktiirjoonega ideaalse gaasi rõhu muutumine temperatuuri tõusmisel.

Edasisel ruumala vähenemisel tekib üliõhukene vedelikukiht (joon. 99, asend 3). Vedeliku ilmumine on ruumi auruga küllastamise tunnuseks. Toru ja baromeetri elavhõbeda nivoode vahe annab küllastava auru rõhu. Katse näitab, et konstantse temperatuuri puhul on küllastava auru rõhk suurem mitteküllastava auru rõhust.

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 ühel ja samal temperatuuril 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 puhul 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 letrisse 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 jämeda klaastoruga, lastakse sellest vett läbi ja muudetakse selle temperatuuri (joon. 101).

Teades õhurõhku ja mõlema haru elavhõbedasammaste vahet, saab arvutada auru rõhku.

Moodustub nivooe vahe, mis on võrdne elavhõbedasamba kõrgusega h . See kõrgus h cm.Hg (keemispunktist kõrgemal temperatuuril) mõõdab, kui palju on küllastava auru rõhk suurem õhurõhust.

Mõõtes baromeetriga õhurõhku H cm Hg, saame arvutamisel küllastava auru rõhu võrdse $(H + h)$ cm-ga Hg.

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 keemistemperatuuril 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 konstantsel temperatuuril vedelikust väljalendavate 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 põrked anuma seinte pindala ühiku pihta) muutumatuks.

2. Temperatuuri tõusmisega kasvavad molekulide liikumise kiirused: samal ajal suureneb väljalendavate molekulide hulk, mis moodustavad auru, ja rõhk kasvab.

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 „

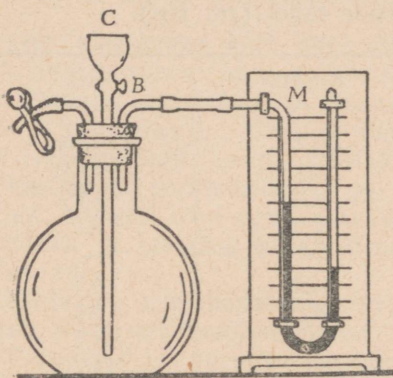
Küllastava auru rõhk kasvab temperatuuri tõusmisel kiiremini kui ideaalse gaasi rõhk (joon. 102). Ideaalse gaasi rõhk suureneb temperatuuri tõusmisel ainult molekulide kasvavast kiirusest.

Küllastava auru rõhk aga suureneb temperatuuri tõusmisel kahel põhjusel: molekulide kiiruste kasvamisest ja auru molekulide arvu suurenemisest samas ruumalas.

Niisiis ruumi küllastavate aurude jaoks on 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 ruumalade muutumiste puhul jääda muutumatuks.

Küllastava veeauru rõhu p tabel elavhõbedasamba millimeetrites —20° kuni 30°-ni 1° tagant ja 30° kuni 150°-ni iga 10° tagant on antud leheküljel 139.

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 läbib kolm toru. Uks toru (*B*) on ühendatud manomeetriga *M*, teine (*C*) lõpeb kraaniga ja lehtriga, kolmas lõpeb kummitorusega, 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



Joon. 103. Katseriist gaaside ja aurude segu rõhu mõõtmiseks.

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 ühtib piirituse küllastava auru rõhuga, mis

on tekkinud samal temperatuuril tühjuses. Jätkates katset, täidame leetri eetriga ja laseme anumasse piirituse peale kihi eetrit. Siis näeme elavhõbeda järkjärgulist alanemist vasakus harus ja uut elavhõbeda kõrguste vahe vähenemist.

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 niisama suureks kui siis, kui antud aur üksi täidaks kogu ruumala.
3. Aurude ja gaaside segu rõhk võrdub segusse kuuluvate aurude ja gaaside osarõhkude summaga. (Daltoni seadus.)

Daltoni seadus on rakendatav ainult niisuguse segu puhul, mille koosteosad ei reageeri omavahel keemiliselt ja mida vedelik ei absorbeeri.

114. Keemine. Küllastava auru omaduste põhjal saab seletada vedeliku keemist. Anumasse kallatud vedelik sisaldab õhku; soojendamisel õhk eraldub, moodustades pisimaid mullikesi.

Nendesse sisemistesse õhumullikestesse toimub aurumine niisama nagu õhku, mis on vedeliku pinna kohal. Kuid sisemised mullikesed muutuvad varsti küllastunud vedeliku auruga. Vedeliku soojendamisel kasvab lakkamatult küllastava auru rõhk õhumullikeste sees. Lõpuks saavutatakse temperatuur, mille puhul küllastava auru rõhk muutub võrdseks välisrõhuga. Nüüd piisab väikseimast rõhu juurdekasvust, et aur sisemistest mullikestest välja paiskuks.

Küllastavate veeaurude rõhu p tabel (Hg millimeetrites).

t°	p mm	t°	p mm	t°	p mm	t°	p mm	t°	p mm	t°	p mm	t°	p $\frac{\text{kG}}{\text{cm}^2}$
-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	253,7	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

Aurude eraldumist vedeliku sisemusest nimetataksegi vedeliku keemiseks.

Kõigest öeldust järgneb:

1. Keemine tekib niisugusel temperatuuril, mille puhul küllastava auru rõhk saab võrdseks välisrõhuga.

2. Iga vedelik võib keeda ainult antud rõhule vastaval temperatuuril.

Keemistemperatuuri normaalrõhu korral nimetatakse keemispunktiiks.

3. Välisrõhu vähenemisel alaneb keemistemperatuur; rõhu suurenemisel ta tõuseb.

Mida kõrgemal maapinnast, seda madalamal temperatuuril hakkab vesi keema.

Vee keemine aurukatlas, kus tekiv aur avaldab vedelikule atmosfäärilisest suuremat rõhku, toimub 100 kraadist kõrgemal temperatuuridel.

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 auru 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 puhul.

Vee aur 100° temperatuuril 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: vee küllastunud aur lastakse kalorimeetri veest läbi.

Kokkupuutumisel külmema veega aur kondenseerub, eraldades soojust. Kondenseerumisest saadud vee jahtumine jätkub segumisel kalorimeetri veega. Auru kondenseerumisel ja vee jahtumisel eraldatud soojusest soojenevad kalorimeeter ja vesi selles.

Ühtede kehade kondenseerumisel ja jahtumisel äraantud soojushulk peab võrduma kõikide soojenevate kehade poolt saadud soojushulgaga.

Olgu kalorimeetrisse, mille mass $m_1 = 80$ g ja erisoojus $c_1 = 0,09 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{kraad}}$, valatud $m_2 = 100$ g vett algtemperatuuriga $t_1 = 20^\circ$.

Veest lastakse läbi $m = 6$ g veeauru keemistemperatuuriga $t = 100^\circ$. Leida keemissoojus r , kui segu lõpptemperatuur $\theta = 52,8^\circ$.

Kondenseerumisel auru poolt äraantud soojus ilma temperatuuri muutuseta:

$$Q = rm;$$

jahtumisel 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.

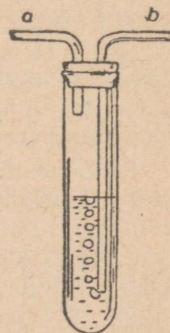
Töövahendid: 1) kalorimeeter; 2) keedukolb; 3) termomeeter; 4) kaalud vihtidega; 5) statiiv rõngaga ja näpitsaga; 6) aurukuivataja.

Märkus. Aurukuivataja on vajalik 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, nendest 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 resultaadi kirjutada tabelisse:

2. Ühendada keedukolb aurukuivatajaga ja panna vesi keema.

3. Kui aurukuivataja torust hakkab tugeva joana tulema auru, lasta toru ots kalorimeetri vette, märkida üles vee temperatuur just enne toru sisselaskmist.



Joon. 104. Aurukuivataja.

4. Segades segajaga vett, lasta läbi auru, kuni vee temperatuur kalorimeetris tõuseb $10-15^{\circ}$ 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 eraldab aurust tekkinud vesi jahtumisel 100° -st kuni temperatuurini Θ ?

9. Kui palju soojust eraldab aur üleminekul veeks?

10. Kui palju soojust eraldab 1 g auru üleminekul vedelasse olekusse temperatuuril $t = 100^{\circ}$?

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 jäbilaskmist	Läbilastud auru mass m	Keemisoosjus r

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 lehrisse 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 aur kokku suruda, siis võib tekitada niisugust rõhku, mille puhul baromeetritorus ilmub vedeliku kiht ja aur muutub küllastavaks: ruumala vähenemisel piisab samast auruühikust, et küllastada uut vähendatud ruumi. Kui vastupidi, liikuvat 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 nihutamist ja hakata jahutama baromeetritoru auruga täide-

tud otsa jää või külma vette kastetud lapi abil, siis võime küllaldaselt jahutamisel jällegi avastada vedeliku kihi tekkimist, s. o. küllastava auru ilmumist. Järelikult võib mitteküllastavat auru jahutamiselega viia niisuguse temperatuurini, mille puhul tema rõhk saab võrdseks rõhuga küllastamisel ja aur muutub küllastavaks; edasine jahutamine toob endaga kaasa küllastava auru muutmise 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 puhul ei ole võimalik muuta auru vedelikuks ainult rõhu suurendamise teel. 1869. a. tuldi järeldusele, et iga vedeliku jaoks on olemas temperatuur, millest kõrgemal tema auru pole võimalik ühegi rõhuga muuta vedelikuks. Sellist temperatuuri nimetatakse kriitiliseks.

Kriitilisest kõrgemal temperatuuril ei leidu ühtegi ainet vedelas olekus, olgu rõhk kui tahes suur.

Rõhku, mille all peab olema aine kriitilisel temperatuuril, et kaoks erinevus vedeliku ja auru vahel, nimetatakse kriitiliseks rõhuks.

Seda olekut, milles on vedeliku ja selle küllastunud auru segu kinnises anumaskriitilise rõhu ja temperatuuri puhul, 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 puhul muutub võrdseks nulliga.

Vee kriitiline temperatuur on $374,2^{\circ}$, piirituse oma $243,1^{\circ}$, eetri oma $193,8^{\circ}$ ja süsihappe oma $31,1^{\circ}$. 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 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 samal ajal kokkusurumise (komprimeerimise) kaudu. Möödunud sajandi teiseks pooleks jäi kõikidest tol ajal tuntud gaasidest ainult kuus¹,

¹ Lämmastik, vesinik, hapnik, lämmastikhapend, süsinikoksüüd, metaan ehk soogaas; neid nimetati püsivateks (permanentseteks) gaasideks.

mida ei saanud veel muuta vedelikuks. Nende veeldamine viibis veel veerand sajandit sellepärast, et temperatuuri madaldamise tehnika ei olnud veel küllaldasel kõrgusel. Samal ajal, kui rõhu suurendamiseks olid juba olemas masinad, mille abil võis rõhud viia kuni mitme tuhande, hiljem aga kümnete tuhandete atmosfäärideni, piirdus madalate temperatuuride saamine temperatuuriga umbes 110° alla 0° . Kuid nende kuue gaasi veeldamiseks ei piisanud ainult rõhust ilma edasise temperatuuri madaldamiseta alla nulli, sest temperatuurid ületasid ikka nende kriitilisi temperatuure.

Tõepoolest on hapniku kriitiline temperatuur $-188,8^{\circ}$, lämmastiku oma $-147,1^{\circ}$ ja vesiniku oma $-239,9^{\circ}$. 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 aurusi, millised normaalarõhu ja harilikkuude temperatuuride puhul alati jäävad väga kaugele küllastumisest.

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; kiirel sulamisel, kui soojuse juurdevool väljastpoolt puudub, võetakse soojust sulavatelt kehadelt enestelt ja toimub tunduv temperatuuri alenemine.

Edasine jahtumine saadi värskelt veeldatud gaasi aurumisel ja keemisei madala rõhu all. §-s 110 selgitati, et igasugune aurumine toimub soojuse neelamisega. Madaldatud rõhu all aurumine muutub intensiivsemaks ja algab keemine tavalisest madalamal temperatuuril. Keemissoojus suureneb madalamates temperatuurides.

Gaasid	Hapnik	Ohk	Lämmastik	Vesinik	Heelium
Keemistemperatuur	-183	-193	-196	-253	-269
Tahkestumistemperatuur	-218	—	-210	-259	-271,9 ²

¹ On teada umbes kümnekond teisi segusid, mis võimaldavad temperatuuri madaldamist 15° kuni 50° -ni alla nulli.

² 26-atmosfäärilise rõhu puhul.

Kui ei ole soojuse juurdevoolu väljastpoolt, võetakse soojus keevalt vedelikult eneselt. Sellepärast annavad madala keemistemperatuuriga vedelikud õhupumba kupli all keedes temperatuuri suure langemise. Süsihappegaasist (kriitiline temperatuur $+31^{\circ}\text{C}$) toatemperatuuris komprimeerimisel saadud vedel süsihape aurub anumast väljalastult atmosfäärilise rõhu puhul nii kiiresti, et jahtumisest muutub tahkeks süsihappeks. Tahke süsihappe ja eetri segu aurub 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. Öhu temperatuur näiteks langeb $0,26^{\circ}\text{C}$ 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, komprimeeritakse gaas kuni 200 atmosfäärini ja jahutatakse kõige külmemas olemasoleva külmutuslahusega (näiteks kuni -110°); selle järel vähendatakse gaasi rõhku kiiresti; selle paisumisega gaas jahtub veel niivõrd, et ta 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 puhul on -196° ; madalama rõhu all on see veel madalam. Madala rõhu all keev lämmastik võib olla vesiniku jahutajaks jne. Madaldatud rõhu all keemisel on temperatuuri langemine nii suur, et osa vedelast gaasist läheb tahkesse olekusse. Hiljuti õnnestus saada temperatuuri kõigest $0,005^{\circ}$ ülalpool absoluutset nulli (teiste, siin kirjeldamata jäänud võtetega).

Eelmises tabelis on keemis- ja tahkestumistemperatuurid toodud nende ainete jaoks, mis harilikult on gaasid.

Vedela õhu jaoks, mille temperatuur on peaaegu 190° võrra 0° -st madalam, on teda ümbritsev õhk temperatuuriga $t = 20^{\circ}$ tüliseks kehaks. Sellise õhuga kokkupuutumisel hakkab vedel õhk keema ja kiiresti auruma.

Et säilitada vedelat õhku võimalikult kaua, tuleb takistada soojuse juurdevoolu ümbritsevatelt kehadel. Selle eesmärgiga



Joon. 105. Dewari anum.

kasutatakse vedela õhu säilitamiseks erilisi, nn. Dewari 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).

121. Vedelate gaaside kasutamine. Gaaside veeldamisel on tehniline ja teaduslik tähtsus. Tehnika mõttes kergendab gaaside veeldamine nende gaaside transportimist, milliseid kasutatakse tehnikas, meditsiinis jts., kuna vedelas olekus on samas ruumalas rohkem ainet. Nii toimetatakse vedel süsihappegaas terasballoonides gaseeritud jookide tööstustesse.

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) ja niisutatakse petrooliga; osa padrunist täidetakse vatiga. Tarvitamise kohal asetatakse padrun puur-auku, lastakse sisse vedelat õhku ja pannakse kohe süütenööri abil lõhkema. Töökohal lõhkemata jäänud padrunid ei ole kardetavad, nii nagu dünamiit- ja teised padrunid, kuna vedel õhk aurub kiiresti.

Samal viisil kasutatakse vedelat õhku käändude juurimisel, pinna kobestamisel jne.

Vedela õhu abil saab kergesti puhast hapnikku selle tõttu, et lämmastiku keemispunkt on madalamal kui hapniku oma ja lämmastik aurub enne hapnikku. Vedelat õhku kasutatakse paljude teiste vedelikkude ja gaaside tahkestamise vahendina.

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 teaduslike 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 rabadaks 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 klaasitäit 10° -st vett (250 cm^3) keemiseni ja keeta temast välja auruna 20 g ?

2. 20 g veeauru temperatuuriga $t_1 = 100^{\circ}$ lastakse läbi 800 g veest, mille temperatuur $t = 10^{\circ}$. Määrata segu temperatuur.

Vastus: 25° .

3. 2 l vett, mille temperatuur $t = 10^{\circ}$, soojendatakse kuni 80° -ni, lastes temasse 100° -st veeauru. Kuipalju veeauru tuli läbi lasta?

Vastus: 250 g .

4. 500 g vette on lastud 63 g 100° -st veeauru. Peale auru läbilaskmist saadi temperatuur 80° . Kui kõrge on vee esialgne temperatuur?

Vastus: $9,6^{\circ}$.

5. 250 g vette, mille temperatuur $t = 16^{\circ}$, lastakse 12 g eetri auru eetri keemistemperatuuril; vee temperatuur tõusis kuni $20,7^{\circ}$ -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 mittekuillastava auru rõhk sõltub ruumalast?
15. Missugusel viisil on võimalik muuta mittekuillastavat 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. Maakeral 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.

Ohurõhk on kuiva õhu rõhu ja temas sisalduva veeauru rõhu summa. Antud temperatuuril 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 see hulk küllastamisele. 6 mm elavhõbedasambale vastav veeauru rõhumine on palaval juulikuul päeval veel väga kaugel küllastamisest, kuna jahedal sügispäeval võib ta küllastada õhku. Ohu niiskuse iseloomustamiseks on peale absoluutse niiskuse veel tarvitusele võetud relatiivne (suhteline) niiskus. Relatiivseks niiskuseks nimetatakse protsentides avaldatud absoluutse niiskuse suhet selle auru rõhuga, mis antud temperatuuril õhku küllastab. Küllastava veeauru rõhumine, nagu eespool öeldud, on täpselt läbi uuritud ja selle rõhu kohta mitmesuguste temperatuuride jaoks tabelid koostatud (vt. tabelit §-s 114). Kui näiteks õhu temperatuur on $t = 20^\circ$ ja õhus oleva veeauru rõhk, nagu eespool oli antud, on $f = 6$ mm Hg, siis annab tabel §-s 114 küllastava auru rõhu 20° -sel temperatuuril $F = 17,54$ ja relatiivne niiskus on siis $\frac{6 \cdot 100}{17,54} = 34\%$.

Üldse, kui absoluutne niiskus on f mm, küllastava auru rõhk õhu temperatuuril 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° temperatuuril ja normaalrõhu 760 mm Hg juures on 1293 g. Rõhu H mm puhul on ta mass $\frac{1293 \cdot H}{760}$ (§ 68), temperatuuri t° ja rõhu H mm puhul on 1 m³ õhu mass $\frac{1293 \cdot H}{760(1 + \beta t)}$ (§ 71). Veeauru tihedus õhu suhtes on 0,622. Seepärast avaldub 1 m³ veeauru mass rõhu F ja temperatuuri t korral $m = \frac{1293 \cdot 0,622}{760} \cdot \frac{F}{1 + \beta t}$ kaudu, kus β võib võtta võrdseks $\frac{1}{273} = 0,00366$. Pärast arvulisi teisendusi $m = \frac{1,0582}{1 + \beta t} \cdot F$. Murd $\frac{1,0582}{1 + \beta t}$ on harilikkude õhutemperatuuride puhul lähedane 1-le.

Õhu 1 m³-s sisalduva veeauru mass grammides ja selle rõhk elavhõbedasamba millimeetrites on peaaegu ühtivad arvud, nagu seda näha võib juurdelisatud tabelist.

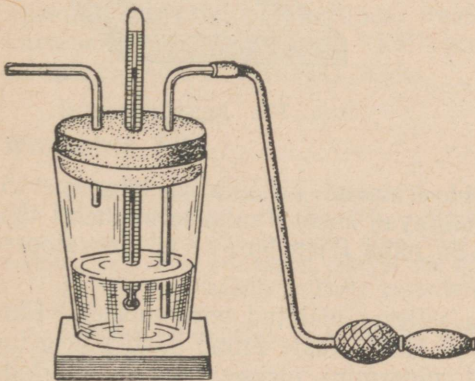
Absoluutset niiskust võib väljendada 1 m³ õhus sisalduva vee-
 auru grammide arvuga.

Temperatuur t°	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

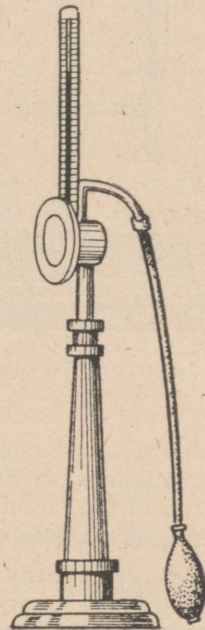
123. Kastepunkt. Üks absoluutse niiskuse määramise viisidest põhjeneb kastepunkti määramisel. Kastepunktiks nimetatakse sellist temperatuuri, mille puhul õhus leiduv aur muutub küllastavaks. §-s 117 oli märgitud, et mitte küllastavat aur saab teha küllastavaks temperatuuri madaldamise kaudu. Kaste jälgede ilmumine jahutatavate esemete pinnale on küllastamise tunnuseks; kaste ilmumise temperatuuri märgitakse kastepunktina.

Niiskuse mõõtmise riistu nimetatakse hügroomeetriteks¹.

124. Hügroomeeter. Hügroomeetril on seade temperatuuri madaldamiseks ja termomeeter selle mõõtmiseks. Temperatuuri madaldamist võib esile kutsuda eetri kiire aurumise, mis võtab vajaliku soojuse anumalt ja ümbritsevalt õhult. Seepärast võib lihtsaimaks hügroomeetriks olla mistahes anum, millesse on kallatud eetrit ja pistetud termomeeter (joon. 106). Kui eetrisse pistetud toru



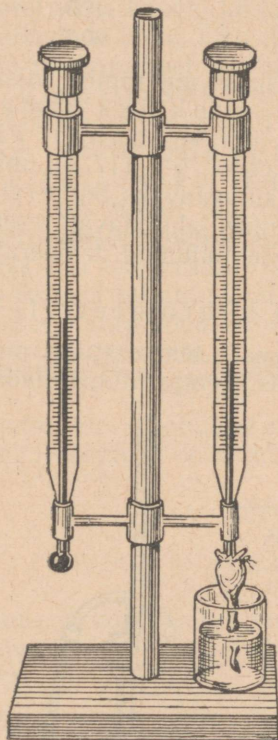
Joon. 106. Lihtsaim hügroomeeter.



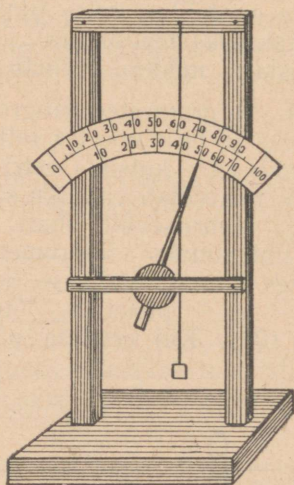
Joon. 107. Lambrecht'i hügroomeeter.

¹ Kreekakeelsest sõnast *hygros* — niiske.

kaudu puhuda õhku, siis võib tekitada niisugust temperatuuri alanemist, et õhus olev veeaur muutub küllastavaks ja moodustab anuma seinal õhukese niiskuse kihi. Temperatuur kaste ilmumise esimesel momendil ongi kastepunkt. Seejärel leitakse tabelist kastepunktis õhku küllastava veeauru rõhk f ; see rõhk on õhus olemasoleva auru rõhk antud temperatuuril, s. o. õhu absoluutne niiskus.



Joon. 108. Psühromeeter.



Joon. 109. Juushügromeeter.

Laboratoorsed hüromeetrid erinevad kirjeldatud hüromeetritest selle poolest, et nad võimaldavad kaste ilmumise momenti täpsemalt määrata. Joonisel 107 on näha *Lambrecht*i laboratoorse hüromeetri välimus.

Karpi on kallatud eetrit ja sellesse pistetud termomeeter. Läbi eetri puhutakse kummipirni abil õhku. Kaste ilmub hästi poleeritud ja küllatud karbi seinale. Et täpsemini oleks võimalik märkida kaste ilmumist, on karbi seina külge tehtud samast metallist raam, mis pilu abil on allpool karbist eraldatud. Kuna raam jahtub 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 ajal 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 näitude 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 näidule 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, viiakse juus üle ploki, mille külge on kinnitatud pikk osuti. Juukse pikenedes keerab vihike oma raskusega plokki ühes suunas, juukse lühenemisel aga teises suunas. Plokiga ühenduses olev osuti liigub kaart mööda, millele on kantud relatiivse niiskuse suurused protsentides. Jaotus 0 märgitakse õhu täieliku kuivuse puhul; jaotus 100 — küllastamise korral; 0 ja 100 vahemik jaotatakse sajaks võrdseks osaks.

Harjutus 12.

1. Miks puhutakse hügromeetri eestriist õhku läbi?
2. Mispärast tõuseb vesi üles psühromeetri batistis?
3. Millal on ühe ja sama absoluutse niiskuse puhul 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 $t = 20^\circ$ ja kastepunkt $t_0 = 9^\circ$.
Vastus: 51%.
6. Määrata kastepunkt, kui õhu temperatuur on 18° ja relatiivne niiskus $B = 60\%$.
Vastus: $10,1^\circ$.

7. Määrata kastepunkt, kui õhu temperatuur on 20° , 24° või 16° ja relatiivne niiskus 50%, 60% või 80%.

8. Missuguse õhutemperatuuri puhul on kastepunkt $t_0 = 7^{\circ}$, kui $B = 75\%$?

Vastus: $11,2^{\circ}$.

9. Päeval on õhu temperatuur $t = 22^{\circ}$; $B = 60\%$. Kas tekib öösel kastet, kui maapinna temperatuur langeb 10° -ni?

10. Öhu temperatuur on 0° , relatiivne niiskus $B = 70\%$. Kas öösel tekib härmatist, kui maapinna temperatuur langeb -5° -ni?

11. Psühromeetri kuiva termomeetri näidud on: 10° , 12° , 18° , 24° , 30° . Märja termomeetri vastavad näidud on: 8° , 9° , 14° , 18° , 22° . 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. Mil viisil saab määrata kastepunkti?
5. Missugused katseriistad on olemas 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 puhul.** Gaaside omaduste käsitlusel nägime, et gaasi rõhk suureneb komprimeerimisel ja soojendamisel. 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 feha tööd, kui talle antakse võimalus paisuda.

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 täidab silindri, mis on suletud kerge, gaasi mitteläbilaskva, hõõrdumiseteta liikuva kolviga (joon. 110). Aeglasel soojenemisel 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

$$F = pS.$$

Kolvile tõstmise töö on võrdne

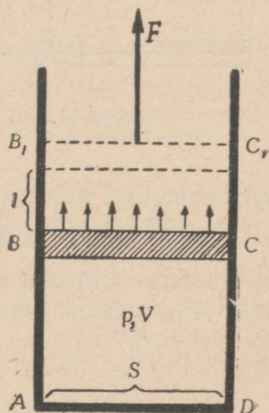
$$A = pSl.$$

Kuid Sl kujutab endast ruumala juurdekasvu gaasi paisumisel:

$$Sl = V_1 - V = \Delta V.$$

Siit

$$A = p \cdot \Delta V.$$



Joon. 110.

uue rea ristkülikuid, millede pindalade summa jõuab ligemale pinnale, mida piirab kõverjoon, abstsissi osa ja äärmised ordinaadid. Kui lõpmatult suurendada murdjoone lülide arvu, siis, nagu geometriast teada, murdjoone pikkus läheneb kõverjoone pikkusele kui piirile. Seepärast me tuleme järgmisele lõppjäreldele: gaasi paisumise töö on arvuliselt võrdne pindalaga, mida piiravad abstsissitelg, gaasi oleku muutumise käiku kujutav kõverjoon ja gaasi ruumala alg- ning lõppväärtusele vastavad ordinaadid.

Põhinedes sellel järeldele, võib gaasi või auru oleku muutumise graafiku järgi arvutada soojusjõumasinate tööd.

Enne kui üle minna soojusjõumasinate graafiku saamisele, meenutame masinate eneste ehitust.

129. Aurujõumasinate. Masinate, mis muudavad kütuse energia veeauru energiaks, viimase aga mehhaaniliseks tööks, nimetatakse aurujõumasinateks.

Veest tekkinud küllastav aur võtab normaalrõhu puhul enda alla 1700 korda suurema ruumala kui vesi, millest ta on tekkinud.

1 tehnilise atmosfääri ($1 \frac{\text{kG}}{\text{cm}^2}$) rõhu puhul on vee keemise temperatuur $99,1^\circ$, 5 tehnilise atmosfääri puhul — 151° ; 10 at — 179° ; 15 at — 197° ; 20 at — 211° jne.

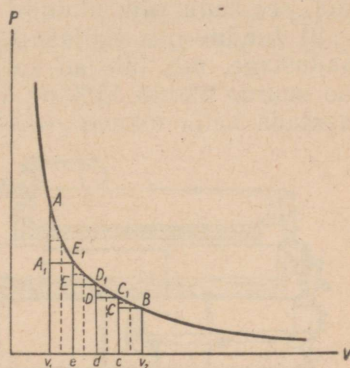
Aurujõumasinate ehitatakse kahte liiki: aurumasinate ja auru-turbiinide.

Kuna aurujõumasinate töötavad auru abil, siis iga aurujõumasina juures peab olema aurutekitaja — katel (joon. 113) ühes küttekoldega, kus toimub kütuse keemilise energia muundumine soojuseks.

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 küttekolde restile (1), mis koosneb paralleelsetest vahedega eraldatud malmvarbadest.

Küttekolde alumisest osast, tuhakastist ehk tõmbeaugust tuleb läbi resti piilude põlemiseks vajalik õhk. Põlemisaadused lähevad välja õhku suitsutorude (3) kaudu.

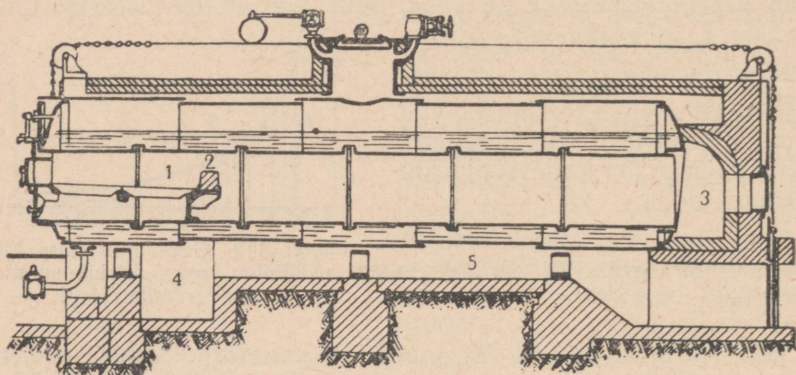
Kogu kütuses sisalduv energia ei muundu auruenergiaks. Küttekolde on suuri energiakadusid ja nimelt:



Joon. 112. Gaasi paisumise töö mõõtmine gaasi oleku muutumise graafiku järgi.

1) ei toimu kütuse täielikku ärapõlemist. Tahke kütuse korral kukub osa temast 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 põlemis-saadustega, mis tulevad katla alt temperatuuriga 300—400°; selle kao suurus ulatub 15%-ni; tänapäeva tehnika püüab seda osa ära kasutada katla toitevee soojendamiseks;



Joon. 113.

3) osa soojust kaob kiirgamise teel.

Üldine kadu ulatub kuni 30%.

Vedelatest kütustest kasutatakse katelde kütmiseks peasjalikult naftat või masuuti, s. o. nafta jäätmeid.

Vedela kütuse põlemise 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, avause 4 ja aurutoru 5 kaudu tuleb aur, mis suure kiirusega voolab tüüsi 6 tüüsi 7, haarates kaasa ja pihustades kahe tüüsi vahelt tulevat vedelikku. Joonisel kujutatud kruvid ja kraanid on vedela kütuse ja auru juurdevoolu reguleerimiseks.

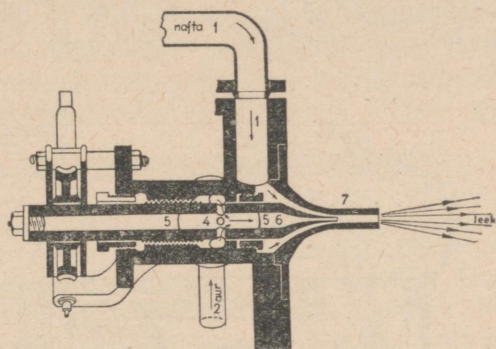
Vedela kütusega küttekolded, kus kütused pihusti abil pihustatakse, on kõige täiuslikumad mehhaaniliste küttekollete tüübid. Sel juhul ei ole peaaegu olemas põlemata jäänud kütust, nõge ega sädemeid.

Vedela kütuse reservuaari läbivast spiraalitorust lastakse läbi auru; sel viisil toimunud nafta eelsoojendusega saavutatakse kütuse kasutegur kuni 90%.

Pihusti leek on koonusekujuline ja tema temperatuur kuni 1600°.

Gaasilise kütuse põletamisel tarvitatakse gaasipõletit, mis põhijoontes sarnaneb pihustile, ainult selle vahega,

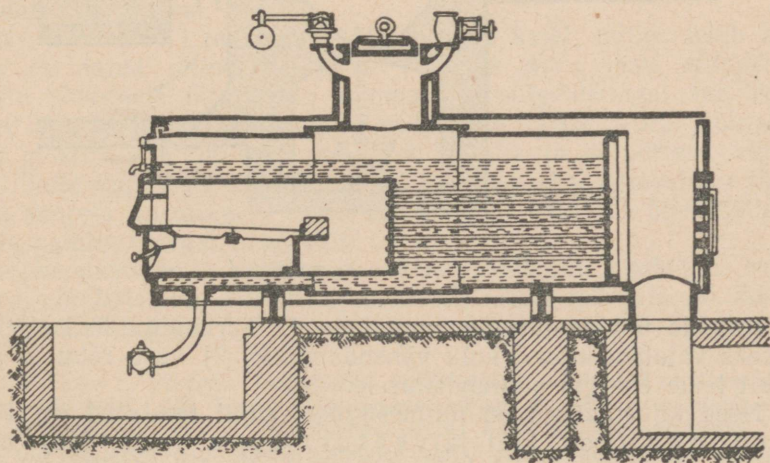
et ühe toru kaudu antakse küttegaasi, teise kaudu — õhku. Gaasid evivad kütusena tähtsust looduslik ehk naftagaas, metallurgiliste ahjude gaasid ja generaatorigaas (kunstlik). Viimast tarvatakse peamiselt gaasimootorite juures. Gaasipõletitega, samuti kui pihustitega kütmise kasutegur on suur. Seepärast on sotsialistliku ülesehituse arendamiseks esikohale tõstetud söerajoonide



Joon. 114. Pihusti.

gasifitseerimise probleem. Gasifitseerimine seisab kivisöe ümber töötamises gaasiks kohapeal, kaevandustes, sel viisil saadud gaasi edasiandmises gaasijuhtmete kaudu tarvitamiskohtadesse ja tema põletamises nendes kohtades aurukatelde küttekolletes või gaasimootorites.

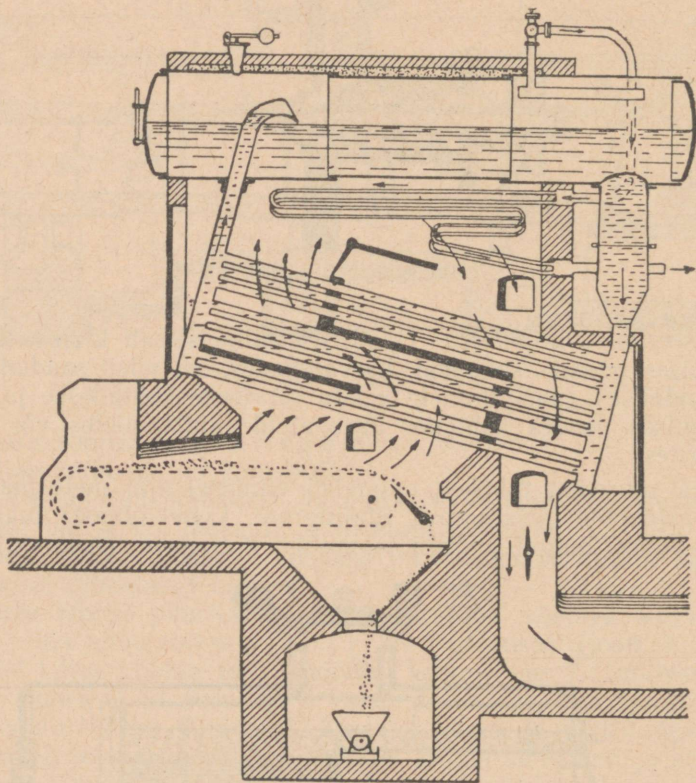
Ikka suuremat tähtsust omandab viimasel ajal meie maa paljudes rajoonides (Saraatovi, Stalingradi, Lvovi oblast) maa sisesuses suurel hulgal leiduva loomuliku küttegaasi (metaani) toot-



Joon. 115. Suitsutoru-aurukatel.

mine. 1946. a. seltsimees Stalini näpunäidete järgi ehitatud gaasi-juhe Saraatov—Moskva kindlustab pealinnale 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 läbib lai leektoru (mõnikord on neid kaks või kolm), milles asub küttekolle.



Joon. 116. Veektoru-aurukatel.

Katelde täiustamine on suunatud: 1) auruhulga ühiku tekitamiseks vajaliku kütuse kulu vähendamisele, 2) auru rõhu ja järelt tema energia suurendamisele.

Need täiustamised on mitmesugusel kujul teostatud suitsutorudega (joon. 115) ja veektorudega (joon. 116) aurukateldes. Suitsutorukatel kujutab endast silindrit, mille sisse on mahutatud mitusada kaunis peenikest suitsutoru. Küttegaasid läbi-

vad neid torusid. Veetorukatel koosneb kahest reservuaarist, mille vahelt käivad läbi torud. Reservuaarid ja torud on täidetud veega. Küttegaasid soojendavad esmajärjekorras torusid ja ülemist reservuaari, seejärel alumist reservuaari.

Eriti tähtsat osa katlaehitamise arengus etendasid tuntud vene inseneri V. Šuhhovi¹ tööd. Tema lõi veetorukatla erilise konstruktsiooni, mis on tuntud oma lihtsusega ja katla üksikute põhi-osade 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 temal 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 veeauru rakendava masina ehitas Papin 1690. aastal ja kirjeldas seda oma 1695. aastal ilmunud raamatus.

Papini masinas ei olnud katel, kolvisilinder ja jahutaja veel eraldatud üksteisest.

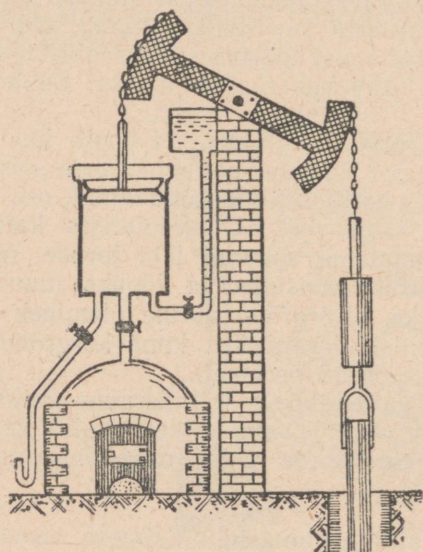
Newcomeni masinas (1711. a.) oli katel, milles tekib aur, juba eraldatud silindrist (joon. 117) ja auru lasti silindrisse kraani üksteisele järgnevate avamiste ja sulgemistega; aur tõstis kolvi üles ja laskis sellega alla veepumba varda. Auru jahutamiseks ja kondenseerimiseks pritsiti kolvi alla ja silindrisse külma vett. Selle tagajärjel jäi rõhk kolvi all väikeseks. Atmosfääri rõhk, olles suurem aururõhust silindris, langetas kolvi ja ühes sellega tõstis pumba varrast ning vett.

Newcomeni masina paremus, võrreldes Papini mudeliga, seisab selles, et katel oli eraldatud silindrist, kuid jahutaja oli ikkagi veel koos silindriga.

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 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.

Kuna nendes mõlemates masinatüüpides tööd sooritav liikumine toimus atmosfääri rõhuga, siis on neid õigem nimetada atmosfääri-, kuid mitte aurumasinateks.

Auru jahutamine silindris põhjustas ka silindri enda suure jahtumise ja silindri uuesti ülessoojendamine nõudis kütuse lisakulu.



Joon. 117. Newcomeni aurumasina skeem.

Papini ja Newcomeni masinad olid väga ebatäiuslikud ja pideva töö saamiseks kõlbmatud, nad olid ainult «tulemõju» pumbad.

Esimesena tõi välja universaalse aurujõumasina idee vene soojustehnik Ivan Ivanovitš Polzunov (1730—1766). Tema 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 tamme ehitaja, mäeinsener ning metallurg, mehhaanik ja matemaatik, füüsik ning

meteoroloog, silmapaistev pedagoog ning meister joonistamises ja joonestamises — selleks kõigeiks sai mitmekülgselt andekas iseõppija Polzunov»¹.

¹ V. Danilevski raamatust «Aurumasina looja Polzunov, 1947». I. Polzunov töötas Barnauli mäetehastes. Aru saades aurujõumasina 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 rakendas Polzunov esimest korda: a) silindri kahekordistamist, millega saavutas masina ühtlasema käigu; b) automaatset aurujaotamist; c) kett-ülekannt. Esimest korda tehnika ajaloos rakendas Polzunov aurumasinat metallurgilise tehase teenindamiseks. Vaatamata kõikidele ülemuse poolt tehtud takistustele, lõpetas Polzunov 1765. a. oma masina monteerimise. Rasked töötingimused laostasid Polzunovi tervise ja ta suri mõni päev enne masina käikulaskmist. Peale tema surma lasti masin käiku ja see töötas edukalt mitu kuud. Kuid Polzunovi masin rikuti ruttu asjatundmatu vahelasegamine tõttu. Vaatamata sellele avaldas Polzunovi leiutis suurt mõju aurumasina edasisele arengule. Välismaised spetsialistid, kes sagedasti käisid Barnaulis, nägid Polzunovi masinat ja tutvusid selle töötamisega.

Neil aastail, kui I. Polzunov ehitas oma masina, J. Watt töötas Newcomeni aurupumba täiustamise kallal.

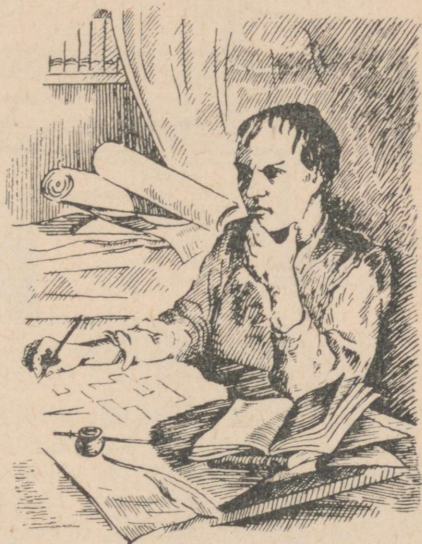
1764. a. ehitati J. Watt'i täiustatud pump. Kuid alles 18 aastat pärast Polzunovi tööd tuli J. Watt universaalse aurujõumasina ideele ja 1784. a. ehitas oma aurumasina tehase ülesahnete täitmiseks.

Auru järjestikune sisse-laskmine ühele ja teisele poole kolbi, mida rakendas Watt, võimaldas mõlemad kolvi liikumised teha auru arvel ja seega anda kahepoolse tegevusega aurumasina tüüpi (joon. 118).

Watt'i poolt automaatse siiber-aurujaotaja tarvitusele võtmisega viidi peajoonete lõpule aurumasina leiutamine.

Aurumasinate ehitamise alal käis järgnevatel aegadel võitlus kasuteguri tõstmise pärast. Nüüdisaja statsionaarsete aurumasinate kasutegur on 12—15%, veduritel — 8%.

Tuginedes VI klassis saadud põhiteadmistele aurumasina ehitusest, vaatleme järgnevalt mõningaid ehituse üksikasju.



I. Polzunov (1730—1766).

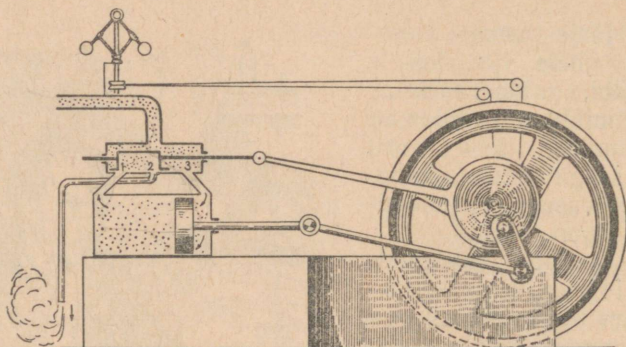
133. Aurusiiber. Tänapäeva aurumasin on välja töötatud sajandite jooksul järkjärgulise täiustamise teel.

Aurumasin kasutab auru energiat, mida aur on saanud soojendamise tõttu 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.

Aurumasina esialgse kuju täiustamine teostati silindri automaatse ühendamise teel vaheldumisi katla ja kondensaatoriga nimetatud siibrikarbi abil.

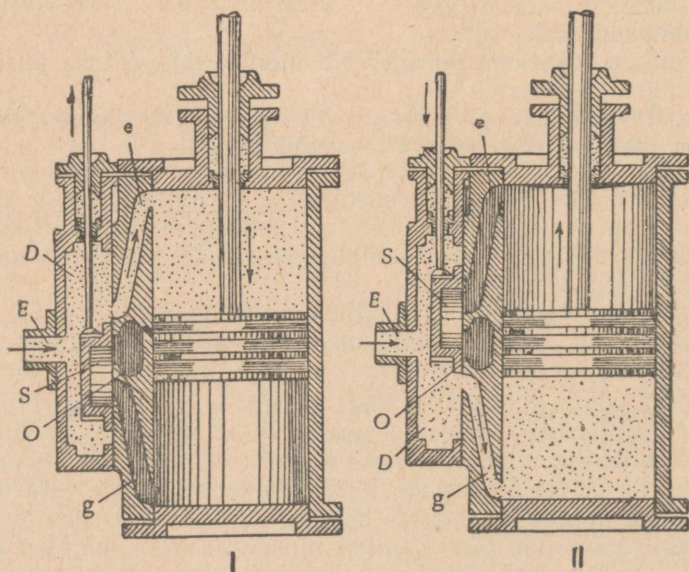
Silindri külge seinale tehakse kaks kanalit *e* ja *g* (joon. 119), mis suubuvad silindrisse äärtest. Kanali välised otsad on kaetud karbiga *D*, millesse tuleb veel kaks kanalit: *E*, mis ühendab karbi katlaga, ja *O*, mis ühendab karbi kondensaatoriga. Karbi sees varva otsas, mis on ühenduses kolviga ja pannakse selle poolt liikuma, käib väike karbike *S*, mida nimetatakse siibrikaks (aurujaotaja). Siiber saab üheaegselt katta ainult kahte kanalit: ühte silindriga ja teist kondensaatoriga ühenduses olevat. Jooni-

sel 119 I kujutatud seisus läheb aur katlast kanali *e* kaudu silindri ülemisse ossa, kuna samal ajal on silindri alumine osa kanali *g* ja siibri kaudu ühenduses kondensaatoriga. Niipea kui silinder osutub kondensaatoriga ühenduses olevaks, saab rõhumine kolvile altpoolt väiksemaks rõhumisest ülaltpoolt ja kolb laskub alla. Erilise meh-



Joon. 118. Kahepoolse tegevusega aurumasina skeem.

hanismi 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



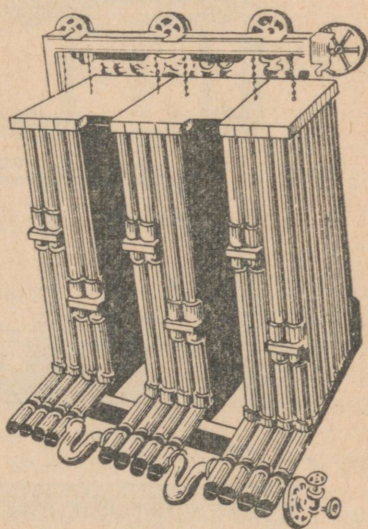
Joon. 119. Aurusilinder kolviga ja siibrikarbiga.

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 pöörlema statsionaarse masina hooratta või veduri rattad, nagu teame seda VI klassi kursusest.

Hooratta pöörlemine antakse transmissioonirihmadega edasi tööpinkide ratastele.

134. Watt'i aurumasina täiustamised. Eespool kirjeldatud aurumasin täidab oma ülesannet jõumasina, kuid evib paljude kadude tõttu väikest kasutegurit. Viimase tõstmiseks on aurumasin ehitusse (põhiprintsiibi säilitamise juures) sisse toodud 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 haaratakse 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 *ekonomaiser* nime.



Joon. 120. Ekonomaiser.

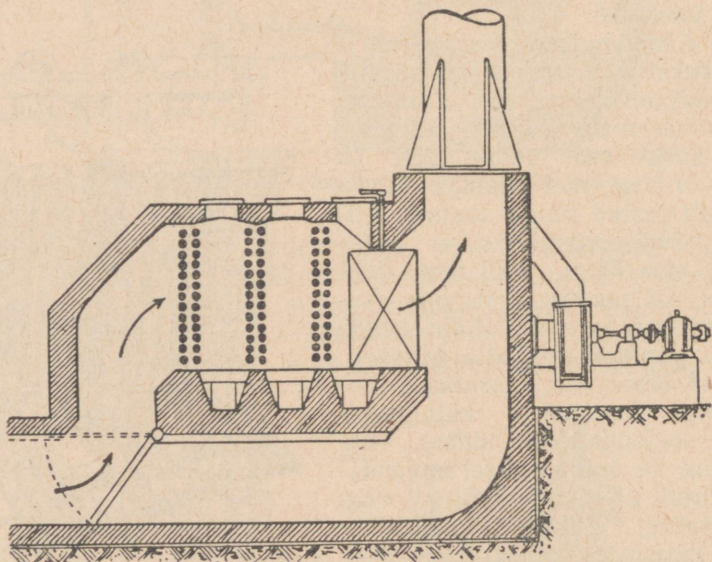
Ekonomaiser torud on näidatud joonisel 120 ja gaaside käik ekonomaiseris joonisel 121.

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 soojust.

2. *Ülekuumendatud aur.* Küllastatud aur, mis endaga auru tekkimisel veepiisku kaasa viib ja igal vähemalgi temperatuuri langemisel 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 puhul auru seisundi muutumine toimub gaasilise oleku võrrandi järgi. Jahtumisel ei muundu ülekuumendatud aur mitte kohe vedelikuks, vaid annab enne ära soojust, mis on kulutatud tema kuumutamiseks. Peale selle on ta kergem küllastatud aurust, sellepärast on sama ruumalaga silindri täitmiseks vajalik kaalult väiksem hulk ülekuumendatud auru.

3. *Auru paisutamine.* 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



Joon. 121. Gaaside käik ekonomaiseris.

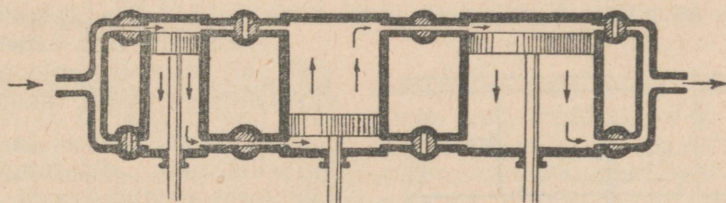
(siis hakkab hooratas ära andma oma varemkogutud energiat, hoides seega kiirust muutumatuna). Kolvi tagasikäigul läheb äratöötanud «väljapigistatud» aur väiksema rõhuga ja väiksemal hulgal jahutajasse (kondensaatorisse) ja järelikult väheneb jahutajale äraantav masina tööks kasutu soojushulk.

Seda Watt'i poolt 1782. a. tarvitusele võetud täiustust nimetatakse auru paisutamiseks. 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 paisutamine.* Tulusam on teostada auru jahutamist katla temperatuurist jahutaja temperatuurini mitte korruga, vaid astmeliselt, viies teda läbi mitme silindri rõhu järkjärgulise

langetamisega. Kui silindri tagasikäigul heitaur (madalama temperatuuriga kui katlas, kuid kõrgemaga kui jahutajas) läheb algul teise silindrisse, kus ta paneb kolvi liikuma, ja ainult teisest silindrist läheb üle jahutajasse, siis nimetatakse sellist masinat kahekordse paisutamise ehk kompaundmasinaks¹, kolme või nelja silindri juures — kolme- või neljakordse paisutamise masinaks (joon. 122).

Kuna iga paisutamise 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.



Joon. 122. Kolmekordse paisutamise aurumasina skeem.

135. Aurumasina indikaatordiagramm. Aurumasina tötavaks 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 tööd auru paisutamisel.

Kolvi tagasikäigu eel ühendub heitaur jahutajaga, tema rõhk langeb ja selle alandatud rõhu all 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 aurukatlagaga ning auru ruumala ja rõhu algväärtused taastuvad.

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 poolt paisutamisel tehtud

¹ Laialdast tarvitamist leidsid kompaundvedurid vene inseneride, eriti A. Borodini töö tulemusena.

töö ja auru kallal komprimeerimisel tehtud töö vahega, s. o. kokkuvõttes — auru tööga ühe perioodi jooksul.

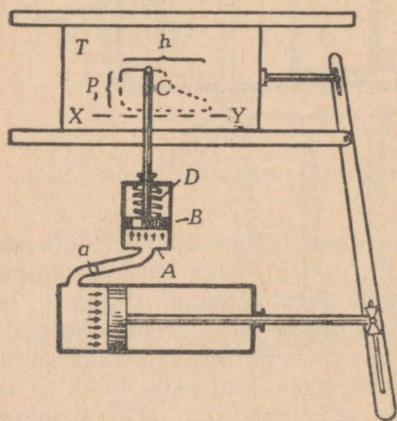
Eespool ülesseatud eesmärgi saavutamiseks ehitas juba Watt riista, mis automaatselt joonestas graafiku rõhu sõltuvuse kohta ruumalast ühe tsükli jooksul.

Seda riista nimetatakse indikaatoriks ja tema poolt joonestatavat kinnist kõverjoont — indikaatoridiagrammiks.

Indikaator kujutab endast väikest silindrit *A* (joon. 123) kolviga *B*. Silindri *A* kolvialune osa ühendatakse toru *a* kaudu auru silindri 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 teeb jooni liikuvale plaadile (planšetile).

Aurusilindri varb paneb kangide abil plianšeti 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 atmosfäärirõhule 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 rõhk 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 mastap, 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 annab aurumasina auru töö ühikute arvu ühe perioodi jooksul (vastavalt valitud mastaabile).

Vaadeldes diagrammi, võib näha, et ülemine, abstsisssteljega rööpne joon vastab töö sellele osale, kus silinder on ühenduses katlaga; siin on aururõhk konstantne. Siis toimub katlast tuleva auru äralõikamine 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 temperatuuril ja rõhuga. Vasakpoolne vertikaalne kõverjoone osa annab rõhu suurenemise silindri ühendumisel katlaga kolvi äärmises seisangus.

Prægusel ajal ehitatakse teisi, täiuslikumat süsteemi indikaatoreid.

136. Aurumasina kasutegur. Aurumasin peab andma soojushulgast Q , mida ta katlast ühes auruga saab, soojushulga Q_1 kondensaatorile, kuhu läheb heitaur, viies endaga kaasa soojust.

Tuleb meeles pidada, et soojusjõumasina töötamise põhiliseks tingimuseks ei ole mitte üksi soojendajast teatud hulga soojuse saamine, vaid ka sellest ühe osa vältimatu edasiandmine kondensaatorile.

Suhet

$$\boxed{\eta_s = \frac{Q - Q_1}{Q}} \quad (\text{XVII})$$

nimetatakse aurumasina soojuslikuks 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:

$$\boxed{\eta_s = \frac{T - T_1}{T}} \quad (\text{XVIII})$$

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 ($T = 423^\circ$) ja kondensaatori temperatuur oleks $T_1 = 273^\circ$, siis oleks ideaalse masina $\eta = 35\%$.

Kondensaatori temperatuuri tõusmisel kuni $T = 333^\circ$ oleks $\eta = 21\%$.

Kõik tehnilised masinad annavad väiksema kasuteguri, kui saame valemi XVIII järgi arvutades.

Nüüdisaja masinates püütakse tõsta katla temperatuuri; et aga keemistemperatuur 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 liikuvate osade töötlemise kvaliteedist ja nende kokkupaneku korralikkusest. Jõumasina poolt antud energiahulga suhet jõumasinasse sisseviidud energiahulgaga nimetatakse ökonoomiliseks kasuteguriks.

Aurumasina võimsus võllil kannab efektiiv-võimsuse nime.

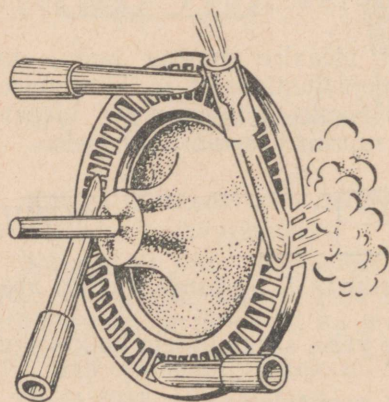
Indikaatordiagrammi järgi arvatud võimsus on indikaatorvõimsus.

Masina efektiiv-võimsuse suhet indikaatorvõimsusega nimetatakse mehhaaniliseks kasuteguriks.

Ökonoomiline kasutegur on mitteliikuvates aurumasinates 12—15%, liikuvates 6—8%.

137. Auruturbiinid. Kuna aurumasinate juures kolvi translatoorne liikumine võlli ühe pöörde jooksul kaks korda muutub nulliks, siis tunduv osa energiast kulub kolvi ja masina teiste võnkuvate osade inertsü ületamiseks. Võnkumised tekitavad suuri pingeid masinaosades ja kutsuvad välja kardetavaid vibratsioone masina kiirel pöörlemisel. Osade tugevuse tõstmiseks tuleb nad ehitada massiivsed, mis suuresti tõstab aurumasina raskust.

Tänapäeva tehnikas rakendatakse sagedamini auruturbiine, mis on vabad paljudest kolviga varustatud aurujõumasinate puudustest. Nendes puudub osade edasi-tagasi võnkuv liikumine, pöörlemine toimub palju kiiremini (meil tarvitatava standardi järgi 3000 pööret minutis), sellepärast on sama võimsuse puhul auruturbiinide kaal palju väiksem kui kolviga varustatud aurujõumasinatel. Nad võtavad vähem ruumi ja on suurema kasuteguriga kui aurumasinad.



Joon. 124. Auru käik auruturbiinis.

Auruturbiinid kasutavad ära auru kineetilise energia. Kui lasta aur katlast jahutajasse või otse õhku, siis ta voolab välja suure kiirusega. Kui suure kiirusega liikuv aur satub ratta labadele (joon. 124), siis tema kineeti-

line energia muundub ratta ja sellega ühenduses oleva võlli pöörlemise energiaks. Auru rõhu all pöörlev ratas moodustabki auru-turbiini põhiosa.

Praeguse kuju on turbiinid saanud XIX sajandi lõpul, ehkki nende töötamise printsiipi tunti juba vanal ajal (Herõni auruvurr, II s. enne meie ajaarvamist).

Praegusel ajal valmistatakse meie tehastes elektrijaamadele kõrgrõhu-turbiine, mis arendavad kuni 100 000-kilovatilist võimsust. Sellise võimsusega kolviga varustatud aurumasina ehitus on praktiliselt võimatu.

Peale elektrijaamade on auruturbiinid laialdast rakendamist leidnud sõjalaevadel ja suurtel ookeanilaevaldel võimsa ja vähe ruumi võtva jõumasinaana.

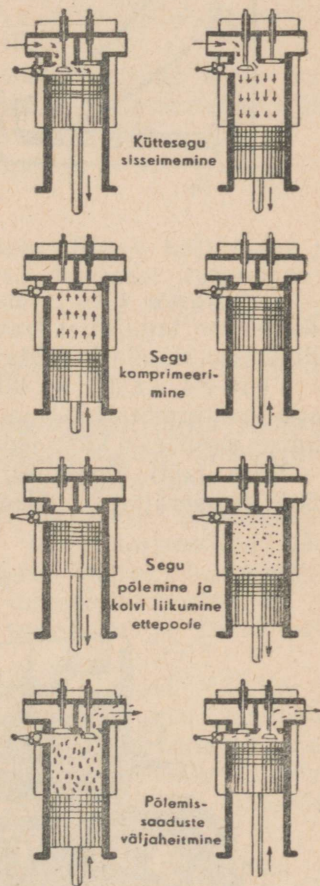
Turbiiniehituse viimaseks sõnaks on gaasiturbiinid, mis töötavad mitte auru, vaid vedela küttaaine põlemisel saadud hõõgivate gaaside jõuga. Gaasiturbiinid võistlevad lennuasjanduses edukalt sisepõlemismootoritega.

Soojuseadmete kasuteguri suurendamiseks võib kasutada ka seda soojusehulka, mis läheb jahutajasse.

Selle asemel, et lasta aurust saadud soojendatud vett jõkke või järve, suunatakse ta vesikütte torudesse kommunaalotstarbeks või kasutatakse ära tööstuslikeks vajadusteks. Jaama, mis kasutab ära «soojuse ülejääke», nimetatakse soojuselektritsentraaliks (ТЭЦ)¹.

Ta varustab tarbijaid mitte ainult mehhaanilise töö arvel saadud elektrenergia, vaid ka soojusega. ТЭЦ leiab laialdast kasutamist meie sotsialistlikus majanduses.

138. Sisepõlemismootorid. Aurujõumasina 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.

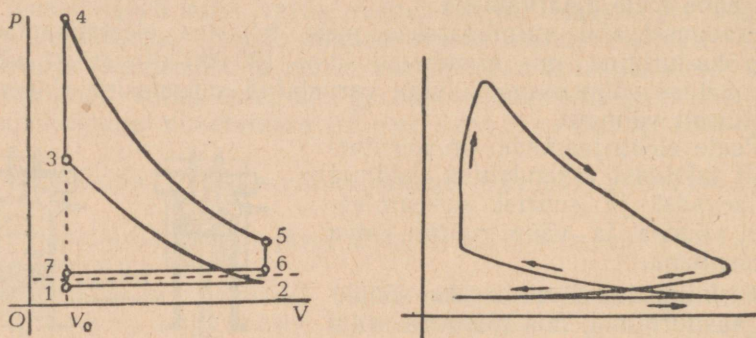


Joon. 125. Sisepõlemismootori neli takti. Joonise vasakpoolne osa vastab takti algusele, parempoolne tema lõpule.

¹ ТЭЦ — теплоэлектроцентраль.

Kõige levinuma gaasimootori leiutas Otto (1861) ja vedelkütusemootori Diesel (1897).

Otto mootori printsiibist võib kõige paremini aru saada nelja-taktilise mootori analüüsi kaudu (joon. 125); joonise vasak pool annab pildi taktide algusest, parem pool nende lõpust.

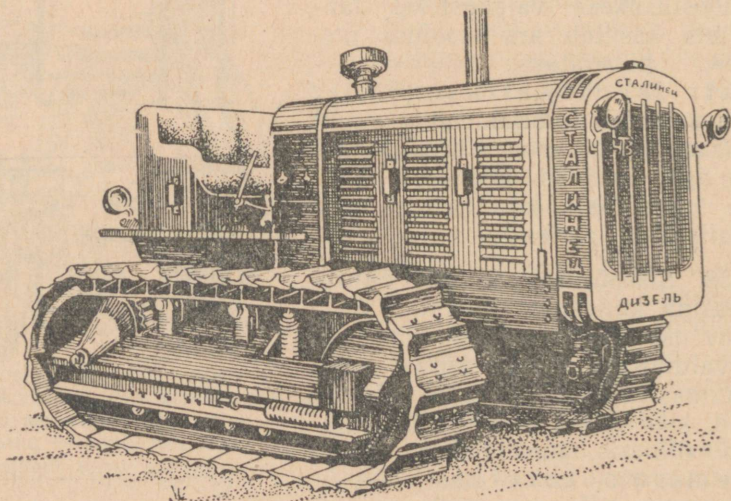


Joon. 126 ja 127.

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 $t = 125^\circ$, lõpul $t = 600^\circ$).

Teise takti lõpul tekitatakse elektrisädemega segu süttimine 1500° temperatuuril. Gaasi temperatuuri tõusmisega kasvab ka



Joon. 128. Linttraktor.

rõhk, mis tõukab kolvi, mis omakorda paneb vända abil pöörlema võlli. See kolvi liikumine moodustab kolmanda takti, mis osutub «töötaktiks».

Võlli pöörlemise jätkumine inertsitõttu 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%.

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%.

Peale kõrge kasuteguri evivad sisepõlemismootorid katla ärajäämise tõttu järgmisi paremusi, võrreldes aurumasinatega: väiksemat kogu, kiiremat käivitamist ja väiksemat ohtu.

Otto mootori indikaatoridiagrammi skeem ja tõeline indikaatoridiagramm on antud joonistel 126 ja 127.

139. Sisepõlemismootorite rakendamine. Kõrge kasuteguri ja muude eeliste tõttu leiavad diiselmootorid laialdast rakendamist väikestes vabrikute-tehaste jõujaamades, kust nad tõrjuvad välja aurumasinaid.

Sisepõlemismootorite peamiseks rakendusala 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.

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 Svetsovi 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.

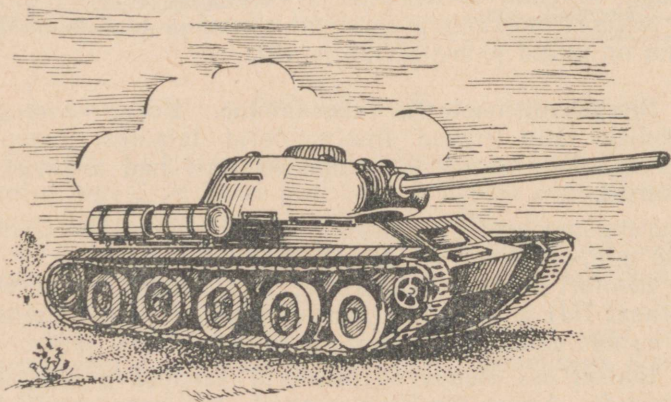
Hiigelsuurt osa etendab sisepõlemismootor ka meie maa ja tema ääretute avaruste rahulikus elus. Autotransport ja lennukasjandus, mis nii hoogsalt arenesid stalinlike viisaastakute jooksul loodud tööstuslikul baasil, on sügavalt juurdunud meie igapäevasesse ellu.

Eriline tähtsus on sisepõlemismootori rakendamisel 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 mootorveduriteks. Mootorvedurite suureks eeliseks auruveduritega võrreldes on nende suur ökonoomsus. Mootorvedur ei kuluta kütta-ainet seisu ajal, evib suurt kasutegurit ja tarvitab palju vähem vett kui auruvedur. Seepärast on eriti tulus kasutada mootorvedureid maa veevaestes rajoonides.

Laevu, mida pannakse liikuma diiselmootoritega, nimetatakse mootorlaevadeks. Neid ehitatakse alates väikestest puksiir-laevadest kuni hiiglasuurte ookeani liinilaevadeni. Väikesi kutreid ja mootorpaate varustatakse harilikult automootori tüüpi petrolimootoritega.



Joon. 129. Tank.

Lõpuks tulirelv sarnaneb sisepõlemismootoriga.

76 mm kahuri kasutegur võrdub 33%-ga. Järelikult seisab niisugune kahur oma ökonoomsuse poolest kõige täiuslikumate sisepõlemismootorite lähedal.

Püssirohu plahvatuses saadud energiast heidetakse 40% kahuri torust välja koos temast väljalendavate soojendatud gaasidega.

Kahuri enda soojendamiseks läheb 22%, gaaside liikumisele ja tagasipörkele kulub 5%.

Kasulikult kulutatud energiast muundub 32,8% mürsu liikumapanemise, 0,2% aga mürsu pöörlemapanemise energiaks. Laengu püssirohust saadud energia on 338 000 kGm.

Võrdluseks toome põletusaine poolt antava energia jaotuse lennuki mootoris. 58% läheb kaduma väljalaskeklappide kaudu ja silindri seintest kiirgamise teel. Segu komprimeerimiseks kulub

12% ja mehhaanilise kao peale 4%. Ainult 26% läheb kasulikuks tööks — propelleri pöörlemapanemisele.

139-a. Öhu-reaktiivmootor. Üks tähtsamaid kohti transpordis, kus jõumasina rakendatakse sisepõlemismootoreid, on lennuasjandus.

Lennuasjandusel on hiigelsuur tähtsus nii sotsialistliku majanduse arendamisel rahuajal kui ka sotsialistliku kodumaa kaitsmisel imperialistlike röövlite vastu. Tänu «vene lennuasjanduse isa» N. Žukovski (I osa § 112) teoreetilistele töödele ja nõukogude konstruktorite leidurivaimule ületasid nõukogude lennukid omaduste poolest välismaa omad.

Lennutehnika arenemine nõudis uue lennukimootori loomist, mis oleks võimeline tõstma lennuki kiirust ja lennukõrgust.

Nagu aurumasinadki on sisepõlemismootorid jõumasinateks, mis töötavad kolbidega, mis panevad pöörlema kruvid ja propellerid. Kolbidega töötavad jõumasinad on väga hääd suhteliselt väikeste kiiruste ja kõrguste jaoks, kuid ei rahulda nõudeid kiiruste puhul, mis lähenevad hääle kiirusele õhus; samuti ei rahulda nad nõudeid lendude puhul väga suurtes kõrgustes.

Kiiruse kasvamisel hakkab kolbidega töötava masina veojõud pärast maksimumi ületamist langema. Samasugune on veojõu muutumise käik kõrguse kasvamisel. Kütuse kulu kõrguse kasvamisega kasvab. Kiiruse kasvamisega kasutegur langeb. Propeller hakkab suurte kiiruste juures halvemini töötama. Suurtes kõrgustes hõredas õhus pole lennuki tiibadel millelegi toetuda. Lühemat aega andis suurimat kiirust ($760 \frac{\text{km}}{t}$) kolb-mootoriga varustatud katselennuk ilma igasuguse kasuliku koormiseta.

Suurte kiiruste ja kõrguste saavutamiseks on tarvis muuta jõumasina põhimõttelisi aluseid.

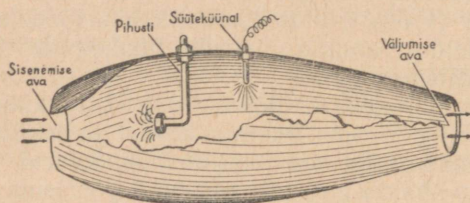
Selleks aluseks võib olla kehade vastastikune mõju mehhaanika kolmanda seaduse järgi: *iga keha poolt väljatõrjutud tahke keha, vedeliku või gaasi juga mõjub omaltpoolt väljatõrjujale sama suure, kuid vastassuunalise jõuga* (I osa § 29-a).

Kui lasta suuremad gaasimassid hiigelsuure kiirusega vabalt õhku, selle asemel et lasta neid kolvi taha, siis panevad nemad oma mõjuga ehk reaktsiooniga lennuki liikuma.

See ongi nõndanimetatud reaktiivmootori töötamise alus. Ülikiire liikumise teooria ja reaktiivmootorite konstruktsioonide väljatöötamise poolest kuulub meie maale esikoht. Ülikiirete lennukite ehitamise aluseks on Sotsialistliku Töö Kangelase akadeemik Sergei Aleksejevitš Tšaplõgini tööd (I osa § 29-a).

Rakettliikumise teooria töötas välja silmapaistev vene teadlane Konstantin Eduardovitš Tsiolkovski (I osa 29-a). Tema andis raketi ehitamise matemaatilise teooria. Tema tõestas, et raketi liikumise kiirus sõltub gaaside liikumise kiirusest ja kütuse kütteväärtusest. Tema koostas esimesena vedela kütusega töötava suure reisiraketi projekti, mille eeskujul tänaseni ehitatakse kõik

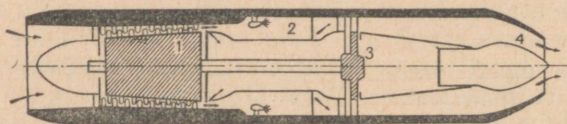
vedela kütusega töötavad reaktiivmootorid mitte ainult meil, vaid ka välismaal. Kaua enne reaktiivlennukite loomist ennustas Tsiolkovski: «Propellerlennukite ajastule järgneb reaktiivlennukite ajastu.» Ja tõepoolest, 18. augustil 1946. a. tõusid Tušino lennukohale Stalini preemia laureaatide Gurevitši, Iljušini, Lavotškini, Mikojani, Suhhoi, Tupolevi ja Jakovlevi poolt loodud reaktiivlennukid.



Joon. 130. Otsevoolu õhu-reaktiivmootor.

Nagu eespool öeldud, on reaktiivlennukite liikumiseks vajalik suurte gaasimasside väljaheitmine väga suure kiirusega. Selleks peab mootor olema varustatud mitte ainult suure kütusetagavaraga, vaid ka hapniku tagavaraga, et kindlustada kütuse täielikku ärapõlemist. Need tagavarad suurendavad märgatavalt lennuki kaalu. Ühe raketilennuki tüübi juures moodustab kütuse kaal 49% üldkaalust, kuna sisepõlemismootoriga hävitajas on kütuse kaal 12% üldkaalust.

Sellepärast tulid konstruktorid mõttele võtta kütuse põlemiseks vajalik hapnik ümbritsevast õhust. Lihtsaimal viisil on see mõte teostunud otsevoolulises õhureaktiivmoo-



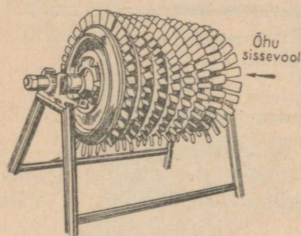
Joon. 131. Gaasiturbiiniga reaktiivmootori skeem: 1. Kompressor. 2. Põlemiskamber. 3. Gaasiturbiin. 4. Väljalaske tüüs.

toris (joon. 130). See kujutab endast terasest toru väikse ahendusega mõlemas otsas. Eespool olevast avast sisenev õhk kohtub põlemiskambri põlevate gaaside frondiga ja surutakse seal kokku. Kokkusurumise tõttu suureneb kambris gaasi rõhk. Lennuki lendamisel hääle kiirusega suureneb rõhk kahekordseks. Atmosfäärist suurema rõhu puhul hakkavad kuumad gaasid väljalaske avast voolama pealetuleva voolu kiirusest suurema kiirusega ja mõjutavad mootorit reaktiivjõuga. Otsevoolulise mootori ehitus ja juhtimine on väga lihtne. Tema peamine puudus on selles, et ta hoovõtmiseks vajab lisamootorit ja et ta võib anda suu-

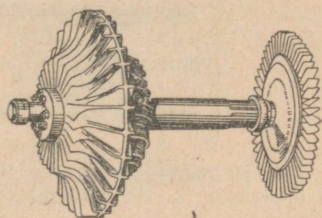
remat veojõudu ainult hääle kiirusest suuremate kiiruste puhul.

Laialt levinud uueks õhu-reaktiivmootorite tüübiks on turbokompressor- ehk gaasiturbiinmootor. Selles ei toimu õhu kokkusurumine mitte isevoolu teel, vaid kompressori abil. Kompressori paneb käima gaasiturbiin, mis ise töötab mootorist väljuvate gaaside jõul.

Gaasiturbiiniga õhu-reaktiivmootor koosneb järgmistest põhi- osadest (joon. 131). Silindri sisselaske ava vastas on kompressor, mis surub õhu kuni kolme atmosfäärini kokku. Kompressorist läheb mitukümmend kuupmeetrit õhku sekundis põlemiskambrisse.



Joon. 132. Gaasiturbiin ja kompressor ühel võllil.



Joon. 133. Teljelise kompressori ketad labadega. Õhu sissekäik vasakult.

Õhu hapniku arvel toimub põlemiskambris sinna pihustiga (§ 130) pihustatud kütuse (petrooli) põlemine. Tekkinud kuumad gaasid pörkuvad tohutu kiirusega gaasiturbiini labade vastu ja seejärel lendavad välja väljalaske avast. Osa gaaside energiast kulub turbiini ratta pöörlema panemiseks ja ülejäänud osa veojõu tekitamiseks.

Gaasiturbiinil ja kompressoril on ühine võll (pöörlemistelg) (joon. 132). Gaasiturbiini ehituse kirjeldus on § 137. Üheks kompressori liigiks on teljeline kompressor. See koosneb (joon. 133) reast ühel võllil asuvatest ratastest, mille töölabad on painutatud nii nagu propelleril või tuuleveskil. Pöörlevate labade vahele on paigutatud liikumatud, suunavad labad.

Esimese ketta pöörlevad labad haaravad õhu ja juhivad selle liikumatutele labadele. Viimased juhivad selle teise ketta liikuvatele labadele, mis õhuvoolu omakorda paiskavad järgmistele liikumatutele labadele jne. Õhujoa tekitamise resultaadina kompressori poolt suureneb õhurõhk. Kompressor toidab turbiini gaasiga, turbiin aga ühise võlli kaudu paneb pöörlema kompressori.

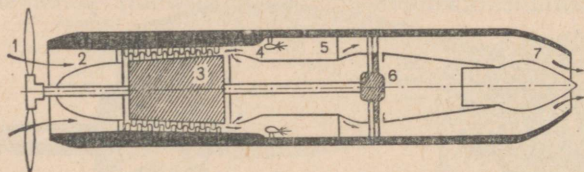
Turbokompressormootor on lihtsam, väiksem ja kergem lennuki mootorist ja võib töötada bensiini asemel petrooliga. Turbiini käivitamiseks kasutatakse väikest käivitusmootorit, mis paneb pöörlema turbiini võlli. Kui hakkab tulema suruõhku, siis käivitusmootor lülitatakse välja.

Gaasiturbiiniga reaktiivmootori kasutegur tõuseb ühes kiiruse kasvamisega. Et saada suuremat kasutegurit ka väiksemate kii-

ruste juures, asetatakse turbiini ja kompressori võllile propeller (joon. 134). Nii on loodud propelleriga gaasiturbiinmootor, mis ühendab endas reaktiivmootoriga ja propelleriga mootori eeliseid.

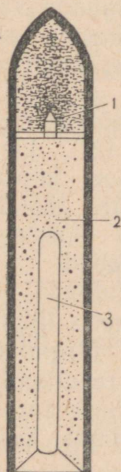
Serialiselt (mitte katseks) valmistatud reaktiivlennuk arendab kuni $990 \frac{\text{km}}{\text{t}}$ -list kiirust. Väga suurtel kõrgustel, kus õhku on vähe, hakkab õhu-reaktiivmootor samuti «hingeldama», nagu seda teevad kolvimootorid juba väiksematel kõrgustel.

Nende asemele astub rakettmootor.



Joon. 134. Propelleriga gaasiturbiinmootori skeem: 1. Propeller. 2. Reduktor¹. 3. Kompressor. 4. Pihustid. 5. Põlemiskambriid. 6. Gaasiturbiin. 7. Väljalaske tüüs.

139-b. Rakett. a) Rakett — sõjarelv. Rakett on iseliikuv mürsk, mida paneb liikuma väljapaiskuva joa reaktsioon. On olemas reaktiiv-miinpildujaid. Vene teadlaste ja leidurite jõupingutustega on loodud tähelepanuäratavad, vaenlastele hirmu tekitavad kaardiväe miinpildujad, mida nimetatakse «katjušadeks». Reaktiivrelva torule ei avalda gaasid survet; sellepärast võib teda asendada lihtsa seadega — kerge toruga või juhtroõpmega. Kuna mürsk on ühest otsast lähtine, siis on rõhk seintele väike ja seinte paksus on ainult mõned millimeetrid.



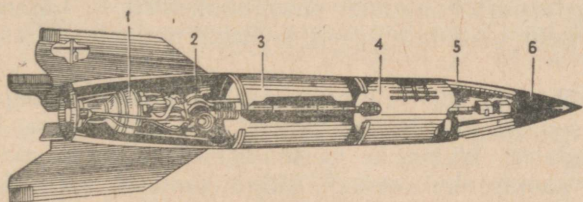
Joon. 135. Lahinguraketi läbilõige: 1. Lõhkeaine. 2. Raketti liikumapanev aine. 3. Tühik.

Juhttorusid võib kokku ühendada mitu ja sellega suurendada relva lahinguvõimet. Seda tüüpi miinpildujad on oma ehituselt märksa lihtsamad harilikest suurtükkidest. Autodele asetatutena on miinpildujad väga liikuvad ja seega tõeliselt võimsaks ja hirmsaks sõjarelvaks.

Vene raketrelva loojaks oli juba sada aastat tagasi kindral-leitnant Konstantin Ivanovič Konstantinov. Tema lahingurakett on kujutatud joonisel 135. Sajandi jooksul pärast teda on töötanud raketi täiustamise kallal paljud vene leidurid: Treteski, Sokovin, Kibaltšitš, Tsiolkovski, Tihonravov, Tihomirov, Vetšinkin jt.

¹ Reduktor — hammasülekanne, mis vähendab pöörete arvu.

Viimases sõjas rakendasid fašistid Londoni pommitamiseks kaugelaskeraketti, mille skeem on kujutatud joonisel 136. Ühe minuti jooksul pärast starti tõuseb rakett 30 km kõrgusele. Sel momendil lülitatakse välja mootor, mis on andnud raketile kiiruse $5700 \frac{\text{km}}{\text{t}}$. Automaatne mehhanism annab raketile vertikaalse lennu asemel kaldlennu ja pärast seda ei erine raketi lend enam millegi poolest suurtüki mürsu lennust. Lennu kaugus on umbes 300 km ja lennuaeg — 5 minutit. Peale purustamise eesmärkide kasutatakse rakette ka kasulikkudeks ülesanneteks. Kahe-kolme raketi lõhkemine rahepilves segab ära õhumassid, takistab seega rahe tekkimist ja kutsub välja vihma. Pääste-raketiga lastakse



Joon. 136. Kaugelaskerakett: 1. Põlemiskamber. 2. Turbiin ja kütuse pumbad. 3. Vedela hapniku paak. 4. Piirituse paak. 5. Juhtimisruum. 6. Laengu kamber.

uppuvale laevale tross. «Rakett-kirjakandja» viskab postikoorma raskelt ligipääsetavatesse kohtadesse.

b) Rakettlennukid. Rakettmootorid kannavad endal nii kütuse kui oksüdeerija. Vedeliku rakettmootori võimsus sõltub ainult kütuse kulust. Võimsus ja veojõud ei sõltu lennukiirusest. Rakettmootorid võivad töötada ka õhuta ruumis.

Suure kütusekoorma kiire äratarvitamise tõttu on rakettmootori töötamisaeg lühike. Kuid üle $10\,000 \frac{\text{km}}{\text{t}}$ kiiruse tõttu võivad nad ruttu tõusta 100-km-lisele kõrgusele ja sellelt kõrguselt võivad selliste mootoritega varustatud lennukid inertsil mõjul lennata veel tuhandeid kilomeetreid.

Selliste mootorite abil võib täituda meie aja suure lenduri Tškalovi unistus lennata ümber maakera, milleks kuluks umbes neli tundi.

Juba Tsiolkovski töötas välja üleni metallist õhulaeva projekti, mis liigub reaktiivjõuga; samuti andis ta kosmilise raketirongi projekti, millega võib lennata kuule ja asteroididele.

Nende ideede edasiarendamises pani Tsiolkovski suuri lootusi noorsoole: «Meil Nõukogude Liidus on palju noori lendajaid — nii ma nimetan lapsi-lennukimudelitegijaid ja lapsi-purilendureid ning noori lennukitelt. Neile ma panen kõige julgemad lootused. Nemad aitavad ellu viia minu avastusi.»

140. Külmutusmasin. Külmutustehnika leiab laialdast rakendamist rahvamajanduses. Toiduainetetööstuses ja raudteetranspordis tarvitatakse kergesti riknevate produktide vedamisel nende säilitamiseks jääd, mida saadakse kunstlikul teel külmutusmasinate abil.

Peale selle kasutatakse jahutamist laialdaselt ka keemiatööstuses. Mäeasjanduses tarvitatakse mõnedel juhtudel šahtide ehitamisel maa külmutamise võtet (Moskva metroo tunnelite ehitamisel). Kunstsiidi ja kunstkautšuki tootmine, käärimise ning suhkru- ja seebitööstusharud, 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 mehhaanilise energia või soojuse kulu arvel. Külmutusmasin koosneb järgmistest põhiosadest: a) a u r u s t a j a s t, milles vedel aine, muutudes auruks, võtab ümbritsevast keskkonnast soojust ja kutsub seega esile jahenemise; b) k o m p r e s s o r i s t, milles toimub tööaine aurude rõhu suurenemine, s. o. nende komprimeerimine, milleks kulutataksegi tööd väljastpoolt; c) k o n d e n s a a t o r i s t, milles jahutava vee mõjul komprimeeritud aurud muunduvad vedelikuks. Kondensaatorist läheb saadud vedelik uuesti aurustajasse.

Vaatleme külmutusprotsessi masina juures, milles tööaineks on ammoniaak. Kompressor surub ammoniaagi aurusid 12 kG/cm^2 rõhu all spiraalatorusse — kondensaatorisse. Komprimeerimisel ammoniaagi aurud soojenevad. Need jahutatakse läbivoolava veega paagis, kusjuures vesi kujutab endast seda keha, mis saab soojust.

Kondensaatoris muunduvad ammoniaagi aurud vedelikuks. Kondensaatorist läheb ammoniaak teise spiraalatorusse — aurustajasse, kus rõhk on umbes 3 kG/cm^2 . Aurumiseks vajaliku soojuse võtab ammoniaak 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 sooritama tööd välise jõu abil*. Soe keha saab sealjuures mitte ainult seda soojust, mis on ära võetud külmalt kehalt, vaid samuti ka seda, mida saadakse sooritatud tööst.

Harjutus 13.

1. Auru keskmine rõhk kahepoolse aurussisselaskega aurumasinas on võrdne $2,175 \text{ kG/cm}^2$ (võib võtta 2). Kolvi diameeter $D = 49 \text{ cm}$; kolvi varva diameeter D_1 võrdub $6,5 \text{ cm}$. Kolvi käik $L = 100 \text{ cm}$. Mehhaaniline kasutegur $\eta = 0,85$. Leida 150 pöörde puhul 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 $186,9^\circ$, keemissoojus võrdub $478,2$, ülesoojendatud auru erisoojus on $0,5$, nafta kütteväärtus on $10\,000$ ja kasutegur $0,75$?

Vastus: $\approx 75 \text{ kg}$.

3. Arvutada 1800 mm diameetriga ja 7500 mm pikkusega silindrilise katla küttepind, kui põlemisproduktid soojendavad katelt mitte ainult väljast-poolt, vaid läbivad teda ühe 1050 mm diameetriga leektoru kaudu. Soojuse ülekandest võtavad osa $0,5$ katla külgpindalast ja $0,9$ leektoru pindalast (miks mitte kogu pindalad?)¹.

Vastus: $43,4 \text{ m}^2$.

4. Proov, mis tehti 12 at rõhu ja 380° auru temperatuuri juures töötava reisijaterongi aurudevuriga, näitas auru kulu $12,5 \text{ kg}$ 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 läbib üks leektoru diameetriga 885 mm , masin kulutab $11,1 \text{ kg}$ auru 1 HJ kohta 1 tunnis ja katel suudab anda auru $20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{ tund}}$? (Andmed soojuse ülekandest katla pinna poolt võtta 3. ülesandest.)

Vastus: $\approx 70 \text{ HJ}$.

6. Millega võrdub nafta aurutootlikkus, mida mõõdetakse 1 kg kütuse põletamisel saadud auru kilogrammide arvuga, kui katla kasutegur on 70% ja kui ta annab küllastavat auru 12 at rõhu juures? (Ülejäänud andmed võtta eelmistest ülesannetest.)

Vastus: $10,7$.

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.

7. Leida 76 mm-se 1902. a. mudeli kahuri kasutegur, kui mürsu kaal on $6,5 \text{ kG}$, algkiirus $588 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$, püssirohu laeng $0,88 \text{ kG}$, püssirohu kütteväärtus $900 \frac{\text{cal}}{\text{tund}}$.

Vastus: $\approx 34\%$.

9. Leida vintpüssi kasutegur, kui kuuli mass on $9,6 \text{ g}$, kuuli väljalendamise kiirus $880 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$, püssirohu kaal $3,2 \text{ g}$ ja püssirohu kütteväärtus 900 .

Vastus: 31% .

10. Arvutada vintpüssi ja 76 mm-se kahuri võimsus eelmistest ülesannetest, kui vintpüssi lasu kestus on $0,002 \text{ sek}$. ja kahuri oma $0,01 \text{ sek}$.

¹ Ülesanded 1—3 on võetud raamatust: Л. Е. Левинсон, Машиноведение.

KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Millised on auruga töötavate masinate liigid?
2. Kuidas on ehitatud aurukatelde küttekolle? Kui suured on soojuse kaod temas?
3. Kuidas töötab aurumasin?
4. Millistes suundades on toimunud aurumasina täiustamine?
5. Kuidas saadakse indikaatordiagramm ja milline on tema tähtsus?
6. Millel põhjened auruturbiini ehitus?
7. Missugune on aurumasinate soojuslik, ökonoomiline ja mehhaaniline kasutegur?
8. Mis kutsus välja siseõlemismootorite leiutamise?
9. Milline on siseõlemismootorite ehituse printsiip?
10. Mispärast on reaktiivsed lennukimootorid paremad kui kolbmootorid?

Kirjandus. Лебединский, Элементарное учение об энергии. 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. Данилевский В. В., Русская техника, 1947. Гумилевский, Русские инженеры, 1947. Ильяшенко С. М., Быстрее звука. Лжарипов В., Rakett.

LISAD.

Tabel 1.

Tahkete kehade soojuslikud konstandid.

Kehad	Joon- paisumise koefitsient	Eri- soojus	Sulamis- temperatuur	Sulamis- soojus	Keemis- temperatuur normaalse rõhu puhul
Alumiinium	0,000024	—	658	80	1800
Volfram	0,000004	0,21	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	—
Inglitina	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	Erisoojus	Sulamis- temperatuur	Keemis- temperatuur	Keemis- soojus
Piiritus	0,001	0,58	—114	78	202
Vesi	0,00018	1	0	100	539
Petroot	0,001	0,51	—	~170—260	~75
Elavhõbe	0,00018	0,033	—38,9	357	63
Eeter	0,00166	0,56	—123,6	35	90
Linaõli	—	—	—	316	—

Tabel 3.

Gaaside erisoojus.

(Konstantse rõhu puhul.)

Õhk	0,24	Lämmastik	0,25
Hapnik	0,22	Vesinik	3,41

Õhu relatiivse niiskuse psühromeetriline tabel.

(Võetud A. Batšinski füüsikotehniliste tabelite käsiraamatust nr. 55.)

Kuiva termomeetri näidud kraadides	Kuiva ja niiske termomeetri näitude vahe										
	0°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
0	100	82	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	48	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°, niiske 16°; seega on näitude vahe 6°. Siis on relatiivne niiskus (protsentides) 22°-ga algava rea ja 6°-ga algava veeru lõikekohas. Antud juhul on relatiivne niiskus 54%.

SISUKORD.

I. Võnkumised ja lained.

1. Harmooniline võnkumine	3
2. Võnkumist määravad suurused	5
3. Võnkliikumise seos ringliikumisega	5
4. Harmoonilise võnkumise graafik	7
5. <i>Laboratoorne töö 1.</i> Pendli võnkumise seaduste uurimine	7
6. Pendli võnkumise seadused	8
7. Füüsikaline pendel	9
8. Pendli rakendamine kellade juures	10
9. Pendli rakendamine raskuskiirenduse mõõtmiseks	10
<i>Harjutus 1</i>	10
10. Elastsete kehade võnkumine	11
11. Võnkumise levimine elastses kehas	12
12. Ristvõnkumine	12
13. Pikivõnkumine	14
14. Laine pikkus	15
15. Lainete peegeldumine ja murdumine	15
16. Lainete interferents	16
17. Seisev laine	18
18. Resonants	20
19. Resonantsinähtus ja tehnika	21
<i>Kontrollküsimusi</i>	21
20. Hääli	22
21. Tooni. Tooni valjus ja kõrgus. Sireen	23
22. Häälelaine peegeldumine	25
23. Häälelainete interferents	25
24. Tuiklemised	26
25. Keha omatoon	26
26. Keha põhitoon	27
27. Ülemtoonid	28
28. Tämbri	28
29. Heli resonants	29
30. <i>Laboratoorne töö 2.</i> Hääle kiiruse mõõtmine mitmesugustes ainetes	30
31. <i>Laboratoorne töö 3.</i> Häälelaine pikkuse määramine resonantsi abil	31
32. Grammofon	31
33. Ultrahelid	32
34. Müra kahjulik toime	33
35. Häälenähtuste kasutamine sõjatehnikas	33
<i>Harjutus 2</i>	35
<i>Kontrollküsimusi</i>	36

II. Soojus ja molekulaarfüüsika.

1. Soojus kui energia.

36. Soojusõpetuse arenemine	37
37. Soojushulga ühik	39
38. Aine erisoojus	39

39. Soojushulga valem soojenemisel ja jahtumisel	40
40. Soojusliku tasakaalu (soojusbilansi) võrrand	40
<i>Harjutus 3</i>	43
41. Soojus ja töö	44
42. Soojuse mehhaaniline ekvivalent	46
43. Soojuse mehhaanilise ekvivalendi määramine Joule'i poolt	47
44. Energia muundumise ja jäävuse seaduse laiendamine soojus- nähtustele	48
45. <i>Laboratoorne töö 4.</i> Keha erisoojuse määramine	50
46. <i>Laboratoorne töö 5.</i> Tugevasti soojendatud keha temperatuuri määramine kalorimeetrilisel viisil	51
47. Soojuse allikad	52
48. Kütuse ja toidu soojusväärtus	55
<i>Harjutus 4</i>	56
Kontrollküsimusi	58

2. Kehade paisumine soojenemisel.

49. Keha joon- ja ruumpaisumine	58
50. <i>Laboratoorne töö 6.</i> Tahke keha joonpaisumise koefitsiendi mõõtmine	59
51. Tahkete kehade joonpaisumise koefitsiendi valem	60
52. Mistahes temperatuuri juures võetud keha pikkuse valem	61
53. Keha ruumpaisumise koefitsiendi valem	62
54. Mistahes temperatuuril võetud keha ruumala valem	63
55. Keha tiheduse muutumine temperatuuri muutumisega	63
56. Soojuspaisumise ärakasutamine tehnikas	64
<i>Harjutus 5</i>	65
Kontrollküsimusi	67

III. Molekulaarsed nähtused gaasides, vedelikkudes ja tahketes kehades.

1. Molekulaar-kineetilise teooria alused.

57. Molekul	68
58. Keha molekulid on eraldatud üksteisest vahemikkudega	69
59. Kohesioon	70
60. Difusioon	72
61. Browni molekulaarliikumine	74
62. Molekulaar-kineetiline teooria	75
63. Soojusliku oleku seletus molekulaar-kineetilise teooria alusel	75
Kontrollküsimusi	77

2. Gaaside omadused.

64. Gaaside teooria arenemine	78
65. <i>Laboratoorne töö 7.</i> Jääva temperatuuriga ning ühe ja sama massiga gaasihulga ruumala ja rõhu vahelise seose (Boyle- Mariotte'i seaduse) tuletamine	78
66. Boyle-Mariotte'i seadus	80
67. Ruumala ja rõhu sõltuvuse graafik	82
68. Gaasi tiheduse sõltuvus rõhust	83
68-a. Ülesannete lahendamine Boyle-Mariotte'i seaduse põhjal	83
69. Gay-Lussac'i seadus	84

70. Laboratoorne töö 8. Õhu ruumpaisumise koeiitsiendi määramine (konstantse rõhu all)	85
71. Gaaside rõhumise termiline koeiitsient	86
72. Ideaalne gaas	88
73. Gaastermomeeter	88
74. Absoluutne temperatuur	88
74-a. Gaasi ruumala ja rõhu valemite avaldamine absoluutse temperatuuri kaudu	89
<i>Harjutus 6</i>	90
75. Gaasi oleku valem	90
<i>Harjutus 7</i>	92
76. Gaasi molekulaar-kineetiline teooria	93
77. Gaasi gramm-molekul ja molekulide arv selles	95
78. Gaaside omaduste tehniline rakendamine	96
Kontrollküsimusi	97

3. Vedelikkude omadused.

79. Vedeliku pinna kuju välisjõu toimel	98
80. Vedeliku pinnakiht	98
81. Vedelikkude kokkusurutavus	100
82. Pinnakihi potentsiaalne energia. Pindpinevus	101
83. Katsed, milles avalduvad pinnakihi omadused	102
84. Märgamine	104
85. Menisk	105
86. Pinnarõhu sõltuvus meniski kujust	106
87. Kapillaarsus	107
88. Laboratoorne töö 9. Pindpinevuse suuruse määramine	109
89. Vedeliku molekulaar-kineetiline teooria	109
<i>Harjutus 8.</i>	110
Kontrollküsimusi	110

4. Tahke keha omadused.

90. Kristalliline olek	111
91. Amorfsus	112
92. Kristalli ruumvõre	113
93. Deformatsioon	115
94. Deformatsiooni suuruse sõltuvus deformeerivast jõust	117
95. Sitkus, rabeledus, plastilisus	119
96. Lubatud pinged	120
97. Hooke'i seadus	120
98. Laboratoorne töö 10. Deformatsiooni suuruse ja deformeeriva jõu suuruse vahelise sõltuvuse uurimine	121
99. Energia muundumine deformatsioonide juures	122
100. Tahke keha molekulaar-kineetiline teooria	123
<i>Harjutus 9.</i>	123
Kontrollküsimusi	124

IV. Aine agregaatoleku muutumine.

1. Sulamine ja tahkestumine.

101. Sulamise ja tahkestumise temperatuur	125
101-a. Vedeliku ülejahutamine	126

102.	Sulamissoojus	127
103.	Soojusliku tasakaalu võrrand sulamisel või tahkestumisel	127
104.	Keha ruumala muutumine sulamisel ja tahkestumisel	128
105.	Rõhu mõju sulamispunktile	129
106.	<i>Laboratoorne töö 11.</i> Jää sulamissoojuse määramine	129
	<i>Harjutus 10</i>	130
	Kontrollküsimusi	131

2. Auru tekkimine.

107.	Auru tekkimine	131
108.	Aurumine	131
109.	Aurumise seletamine molekulaar-kineetilise teooria abil	132
110.	Aurumissoojus	133
111.	Auru ruumala ja rõhu vaheline sõltuvus konstantsel temperatuuril	134
112.	Küllastava auru rõhu sõltuvus temperatuurist	136
113.	Daltoni seadus	138
114.	Keemine	138
115.	Soojusliku tasakaalu võrrand auru tekkimisel ja kondenseerumisel	140
116.	<i>Laboratoorne töö 12.</i> Keemissoojuse määramine kalorimeetri abil	141
117.	Mitteküllastavate aurude küllastavateks muutmise viisid	142
118.	Kriitiline temperatuur	143
119.	Gaaside veeldamine	143
120.	Madalate temperatuuride saamise viisid	144
121.	Vedelate gaaside kasutamine	146
	<i>Harjutus 11.</i>	147
	Kontrollküsimusi	147

3. Ohu niiskus.

122.	Ohu niiskus	147
123.	Kastepunkt	149
124.	Hügroomeeter	149
125.	Psühromeeter	151
126.	Juushügroomeeter	151
	<i>Harjutus 12.</i>	151
	Kontrollküsimusi	152

V. Gaasi ja auru töö.

127.	Gaasi töö konstantse rõhu puhul	153
128.	Gaasi paisumise töö graafik	154
128-a.	Gaasi töö muutuva rõhu puhul	154
129.	Aurujõumasinad	155
130.	Küttekolle	155
131.	Katel	158
132.	I. Polzunovi ja J. Watt'i aurumasin	159
133.	Aurusiiber	161
134.	Watt'i aurumasina täiustamised	163
135.	Aurumasina indikaatoridiagramm	165
136.	Aurumasina kasutegur	167
137.	Auruturbiinid	168
138.	Sisepõlemismootorid	169

139. Sisepõlemismootorite rakendamine	171
139-a. Olu reaktiivmootor	173
139-b. Rakett	176
140. Külmutusmasin	178
<i>Harjutus 13</i>	179
Kontrollküsimusi	180
<i>Lisad</i>	181

Toimetaja E. Kaljuvee.

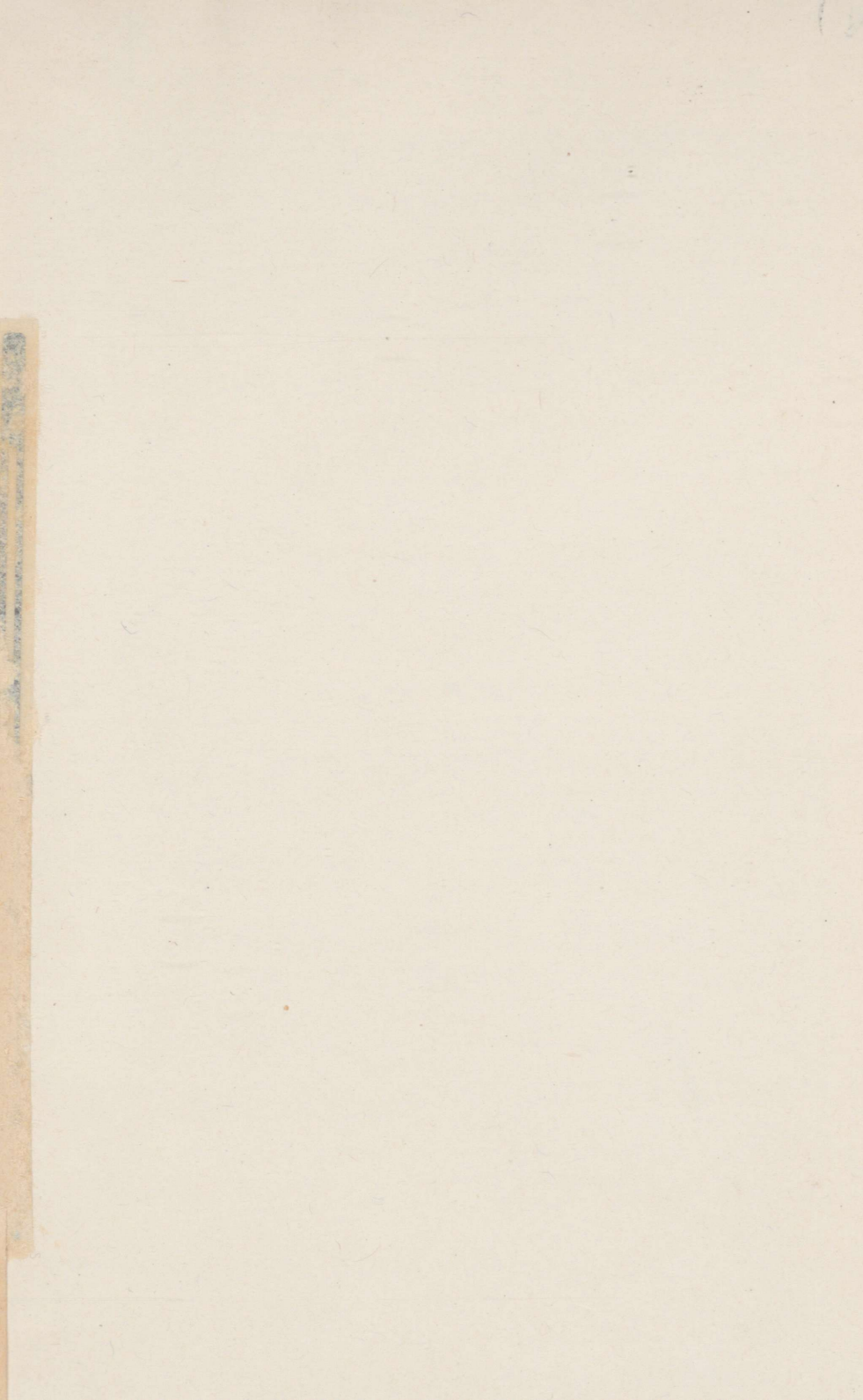
Tehniline toimetaja H. Kohu.

Korrektorid V. Tui ja V. Põlde.

Ladumisele antud 26. II 1952.
Trükkimisele antud 27. III 1952.
Trükiarv 4000. Paber 60×92,1/16.
Trükipoognaid 11,75. Arvutus-
poognaid 11,99. MB-00890. Trüki-
koda «Tartu Kommunist», Tartu.
Ülikooli 17/19. Tellimise nr. 717.

На эстонском языке.

Hind rbl. 2.35



18

Rbl. 2.35

A
A-19407

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00384247 5