J. LANG ja A. MITT

FÜÜSIKA

KESKKOOLI IX KLASSILE

RK
„PEDAGOOGILINE KIRJANDUS"
TALLINN 1946

J. LANG ja A. MITT

FÜÜSIKA

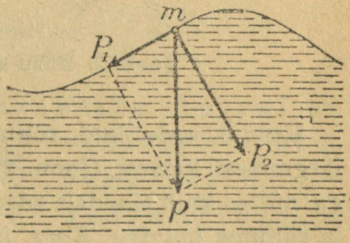
KESKKOOLI IX KLASSILE

RK
„PEDAGOOGILINE KIRJANDUS“
TALLINN 1946

I. Hüdro- ja aeromehaanika.

Rõhumise nähtused vedelikkudes.

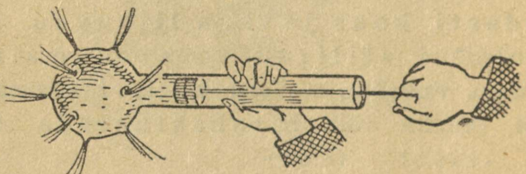
1. Vedelikkude üldomadusi. Vedelikus on aineosakesed hästi tihedasti koos ja väga liikuvad. Seetõttu püüavad vedelikud säilitada oma ruumala, kuid mitte kuju. Vedeliku osakeste kergest liikuvusest järeldub ka, et vedelik võib tasakaalustada ainult ta pinnaga risti (normaalselt), mitte aga puuteliselt (tangentsiaalselt) rakendatud tunge. Seetõttu ongi vedeliku vaba pind tasakaalu korral alati rõhtne, s. o. risti raskustungiga. Tõepoolest, kui vedeliku vaba pind asetuks horisondi suhtes kaldu (joon. 1.), siis saaksime vedeliku pinnaosakeste jaoks tasakaalustamata raskuskomponendi p_1, mis nad mööda pinda madalama koha suunas liikuma paneks. Teine komponent kui normaalselt mõjuv tasakaalustuks vedeliku vasturõhumisega.



Joon. 1. Vedeliku vaba pind peab olema risti raskustungiga.

Edaspidisel vedelikkude omaduste käsitlemisel on aluseks võetud eeldus, et meil on tegemist nn. ideaalsete vedelikkudega, s. o. sellistega, millede osakesed liiguvad üksteise suhtes täiesti ilma hõõrdumiseta ning mis säilitavad täiesti oma ruumala. Tegelikult kõik meile tuntud vedelikud neid tingimusi täiel määral ei rahulda.

2. Rõhumise edasiandumine vedelikus. Pascali seadus. Rõhumise all mõistetakse tungi rakendumist kehasse pinna kaudu ja nimelt risti pinnaga. Näiteks tool rõhub põrandat toolijala ja põranda kokkupuute pinnal, maja sein rõhub oma raskusega maja alusmüüri. Üldse võivad tahked kehad rõhumist edasi anda peaaegu ainult ühes teatavas suunas.



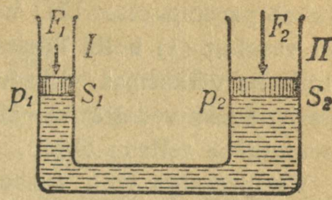
Joon. 2. Rõhu edasiandumine vedelikus.

Kuidas vedelikud rõhumist edasi annavad, seda näeme järgmisest katsest (joon. 2.). Õõnes kera on ühendatud toruga, milles käib tihedalt edasi-tagasi kolb. Täidame riista veega ja rõhume kolviga. Kera augukestest purskuvad nüüd veejoad igas suunas laiali. Kõik joad on ühetugevused; see näitab, et kolvi rõhumine vees andub edasi igas suunas ühteviisi. Sama nähtus kordub ka kõigi teiste vedelikkudega. Tähendab, **kõik vedelikud annavad rõhumist edasi igas suunas ja ühteviisi.** Selle vedelikkude põhiomaduse avastas prantsuse teadusmees Pascal (1623—1662), mispärast seda ka **Pascali seaduseks** nimetatakse.

1. Kuidas annavad rõhumist edasi herned, haavlid, viljaterad salves, linaseemned jne.? Katsuda võrdluseks nende nähtustega selgitada rõhu edasiandumist vedelikes!

2. Tugeva hoobiga vedelikuga täidetud pudeli korgi pihta võib pudeli puruks lüüa. Mispärast?

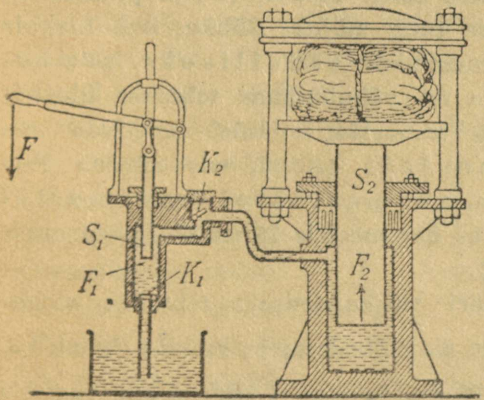
3. Vesipress. Vedeliku tasakaalu üle otsustamiseks ja rõhumise suuruse võrdlemiseks tuleb arvutada ühele pinnaühikule mõjuva tungi suurus. Kui näiteks (joon. 3.) I silindris kogu kolvi ja vedeliku kokkupuute pinnale S_1 mõjub tung F_1, siis ühele pinnaühikule mõjuva tungi suurus $p_1 = \frac{F_1}{S_1}$. Samuti leiame II silindri kolvi jaoks: $p_2 = \frac{F_2}{S_2}$. Et Pascali seaduse järgi rõhumine vedelikus andub edasi igas suunas ü h t e v i i s i, siis tasakaalu korral peavad selles vedelikus ühele pinnaühikule mõjuvate tungide suurused olema igas kohas võrdsed, s. o.



Joon. 3. Vesipressi skeem.

$$p_1 = p_2 \text{ ehk } \frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}, \text{ millest } \frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1}{S_2}.$$

Viimasest võrdusest näeme, et t a s a k a a l u k o r r a l on v e d e l i k u p i n n a g a r i s t i m õ j u v a d t u n g i d (F_1 ja F_2) v õ r d e l i s e d p i n d a d e s u u r u s t e g a (S_1 ja S_2), milledesse need tungid mõjuvad. Sellel vedeliku omadusel põhinebki vesi- ehk h ü d r a u l i l i s e p r e s s i ehitus. Ta-



Joon. 4. Vesipress.

hame näiteks II silindri kolviga tekitada hästi suurt rõhumist, siis peame valima silindrite ristilõike pindade suhte $\frac{S_2}{S_1}$ hästi suure. Kui $\frac{S_2}{S_1} = 100$, siis $F_2 = 100\ F_1$, s. o. vedelik lükkab parempoolset (II) kolbi 100 korda tugevamini alt üles kui vasakut (I) kolbi lükatakse ülalt alla. Rõhumise suurendamiseks väiksemas silindris kasutatakse kangi. Rõhumist edasiandvaks vedelikuks võib olla mistahes vedelik; harilikult kasutatakse selleks õlisid.

Vesipressiga võib saavutada õige suuri rõhumisi (kuni 15 000 tonni). Seepärast kasutatakse vesipressi ehitusmaterjalide tugevuse proovimisel, kohedate ainete (puuvill) kokkupressimisel, trükimatriitside valmistamisel jne.

1. Näidata, et vesipressi kohta kehtib kangi puhul tuletatud lause: nii mitu korda, kui me võidame tungi suuruse poolest, niisama palju kordi kaotame tee pikkuse poolest.

2. Vaadelda tähelepanelikult joonisel 4 kujutatud vesipressi ehitust ja leida joonisest F_2 suurus, kui $F = 50$ kG!

4. Rõhumise mõõtmine. Rõhumise suuruse määramiseks on vaja teada: rõhumist ühele pinnaühikule ehk r õ h k u. Selleks tuleb anda rõhuva tungi suurus (F) ja pinnaühiku suurus (S), millesse see tung mõjub. Rõhku, kus 1 cm^2-le mõjub tung 1 kG, nimetatakse t e h n i l i s e k s a t m o s f ä ä r i k s (at), sest ta on rõhuühikuna tehnikas üldiselt tarvitusel. Tehnilisest atmosfäärist tuleb eraldada nn. f ü ü s i k a l i n e a t m o s f ä ä r (Atm), mis võrdub õhurõhumisega 1 cm^2-le nn. n o r m a a l s e t e l t i n g i m u s t e l (elavhõbedasamba kõrgus baromeetris 76 cm 0° juures merepinnal ja 45° p.-laiusel).

Füüsikalise atmosfääri väljendamiseks tehnilise atmosfääri $\left(1 \frac{\text{kG}}{\text{cm}^2}\right)$ abil leiame elavhõbedasamba raskuse juhul, kui selle samba kõrgus on 76 cm ja alus 1 cm^2, seega ruumala 76 cm^3. Nagu teame, 1 cm^3 elavhõbedat kaalub 13,6 G, 76 cm³ aga 76 · 13,6 = 1033 G ehk 1,033 kG, järelikult 1 Atm $= 1{,}033 \frac{kG}{cm^2} = 1{,}033$ at. Kui tegelikus elus kõneldakse atmosfäärist kui rõhuühikust, siis on harilikult tegemist rõhuga $1 \frac{kG}{cm^2}$ ehk tehnilise atmosfääriga.

CGS-süsteemis on rõhuühikuks

$1 \frac{düün}{cm^2}$ ehk **mikrobaar.** $10^6 \frac{düün}{cm^2} = 1$ **baar** (b);

0,001 baari = 1 **millibaar** (mb). Viimast ühikut kasutatakse eriti meteoroloogias. 1 mb $= 10^3 \cdot \frac{düün}{cm^2} = 0{,}75$ mm Hg.

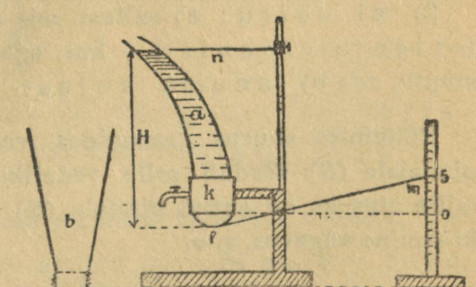
Rõhumise suuruse hindamisel me harilikult ei arvesta pinna suurust, millesse tung mõjub, ning seetõttu sageli saame eksliku kujutluse tegelikus elus rakendatavatest rõhumistest. Näiteks olgu õmbleja nõela otsa läbimõõt 0,2 mm, seega läbilõik $\pi \cdot 0{,}1^2$ ehk $0{,}03\ mm^2 = 3 \cdot 10^{-4}\ cm^2$. Kui õmbleja sõrmkübara abil rõhub nõela 1 kG tugevuselt, siis nõela ots omakorda töötab rõhuga

$$\frac{1\ kG\text{-tung}}{3 \cdot 10^{-4}\ cm^2} \approx 3000 \frac{kG}{cm^2} = 3000 \text{ at.}$$

Samuti võiksime näidata, et habemeajamisel on noa rõhk habemekarvale umbes 10^4 atm.

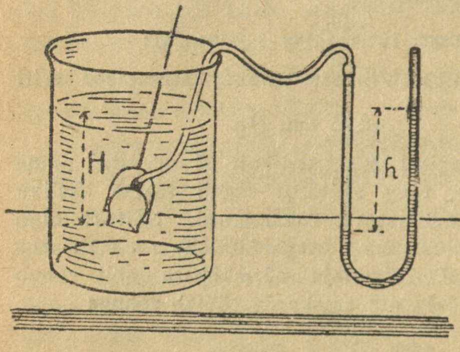
5. Vedeliku rõhumine anuma põhjale ja vedeliku sees.

Vedelik annab edasi mitte üksnes temale väljastpoolt tekitatud rõhumist, vaid ka vedeliku enda osakeste raskuse rõhumist. Nii rõhuvad ülemised vedeliku osakesed neist allpool olevaid, need omakorda järgmisi, jne. Seetõttu mitte üksnes anuma põhi ja küljed, vaid ka iga pinnaelement vedeliku sees on alalise rõhumise all, mis tekib vedeliku raskusest.



Joon. 5. Rõhumine põhipinnale ei olene anuma kujust.

Katsed näitavad, et **vedeliku rõhumine põhjale ei sõltu anuma kujust,** vaid ainult põhipinna ja anuma sügavuse suurusest ning vedeliku erikaalust. Rõhumine põhjale võrdub alati selle vedeliku püstsamba raskusega, mille aluseks on anuma põhi ja kõrguseks põhja keskmine sügavus.



Joon. 6. Rõhumine vedeliku sees.

Kui anuma põhipinna suurus on S cm^2, sügavus (kaugus vabast pinnast ehk nivoost) H cm ja vedeliku erikaal $e \frac{G}{cm^3}$, siis on rõhumise suurus grammides kogu põhipinnale

$$F = eSH.$$

Rõhumine antud pinnale vedeliku sees:

1) s õ l t u b pinna s ü g a v u s e s t ja on sellega võrdeline; siit järeldub, et samas rõhtsas tasapinnas on rõhumine ühesugune;

2) e i s õ l t u : a) sellest, mis asendis on antud pind (o r i e n t a t s i o o n i s t), kui aga keskmine sügavus ei muutu, ega b) a n u m a k u j u s t.

Rõhumise suurus grammides vedeliku sees (F) antud pindalale (S) võrdub selle vedeliku püstsamba raskusega, mille aluseks on antud pindala (S) ja kõrguseks (H) aluse keskmine sügavus, s. o.

$$F = eSH.$$

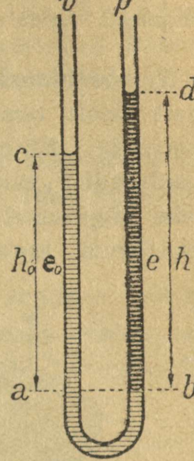
See valem väljendab ka rõhumist anuma küljele.

1. Allveelaev on sukeldunud 40 m sügavusele. Leida merevee rõhumine 1 m^2-le laeva välispinnast!

2. Leida vee rõhk Läänemere kõige sügavamas kohas (459 m)!

6. Ühendatud anumad sama ja kahe erisuguse vedelikuga. Katse näitab, et ühendatud anumais, mis täidetud sama vedelikuga, on vedeliku vaba pind (nivoo) alati rõhtne.

Valame nüüd ühendatud anumaisse (joon. 7) kaht erisugust vedelikku, näiteks vett (haru *v*) ja petrooleumi (haru *p*). Et paremini näha, värvime petrooleumi *Radix alcannae* abil punaseks. Nüüd näeme, et petrooleumisamba nivoo (*d*) seisab vee omast (*c*) kõrgemal. Tasakaalu korral peab samas rõhtsas läbilõikes *ab* mõlema vedelikusamba rõhumine igale pinnaühikule, näit. 1 cm^2, olema ühesugune, s. o. $e_0 h_0 = eh$, kus e_0 ja e on vastavad erikaalud. Allpool nivood *ab* on torus sama vedelik (vesi) ja seepärast tasakaalus. Siit saame lihtsa valemi vee- ja petrooleumisamba kõrguse võrdlemiseks, nimelt:



Joon. 7. Ühendatud anumad.

$$\frac{h_0}{h} = \frac{e}{e_0},$$

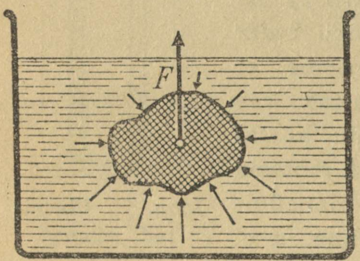
s. o. vedelikusammaste kõrgused on pöördvõrdelised nende erikaaludega.

Selle valemi abil saame määrata vedeliku erikaalu, sest $e = \frac{h_0}{h} e_0$. Olgu katsest saadud $h_0 = 24$ cm, $h = 30$ cm; vee erikaal $e_0 = 1 \frac{\mathrm{G}}{\mathrm{cm}^3}$, siis järelikult $e = \frac{24}{30} \cdot 1 = 0{,}8 \left(\frac{\mathrm{G}}{\mathrm{cm}^3}\right)$.

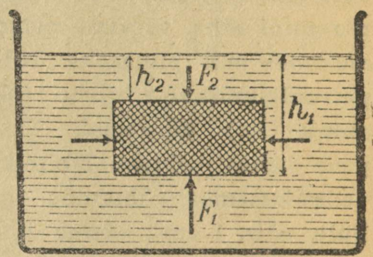
Seletada ühendatud anumate omaduse põhjal järgmiste riistade ja seadmete tarvitamist: aurukatelde veeklaas, loodimisriist ehk nivelliir, veevärk, purskkaev, kohvikann jne.

Ühendatud anumates on vee nivoo elavhõbeda nivoost 63 cm kõrgemal. Leida elavhõbeda- ja veesamba kõrgused!

7. Archimedese seadus. Vedelikku asetatud keha on igalt poolt temaga kokkupuutuva vedeliku rõhumise all (joon. 8). Kõiki neid rõhumiskomponente liites saame resultandi *F*, mis on alati suunatud ülespoole, sest rõhumine keha sügavamal asetsevatele pinnaosadele on suurem kui madalamal asetsevatele pinnaosadele. Nimetame saadud



Joon. 8.
Vedeliku üleslüke on ümberoleva vedeliku rõhumise resultant.



Joon. 9.
Üleslüke võrdub väljasurutud vedeliku raskusega.

resultandi üleslükketungiks ehk lihtsalt üleslükkeks. Tähistades vedeliku rõhumise risttahukakujulise keha alumisele pinnale F_1-ga, ülemisele pinnale F_2-ga, võime joon. 9 põhjal öelda, et üleslüke $F = F_1 - F_2$, sest küljgrõhumised vastastikku tasakaalustuvad. Et aga $F_1 = eSh_1$ ja $F_2 = eSh_2$, siis $F = eSh_1 - eSh_2 = eS\ (h_1 - h_2)$. Sellest näeme, et vedeliku üleslüke temasse asetatud kehasse võrdub keha poolt väljatõrjutud vedeliku raskusega.

Üleslüke mõjub keha raskusele otse vastassuunas. Seepärast keha mõnes vedelikus kaaludes tuleb üleslüke keha raskusest lahutada. Seetõttu vedelikku asetatud keha kaotab oma kaalust nii palju, kui palju kaalub selle keha poolt väljatõrjutud vedelik. Saadud korrapärasused, mis tuletuvad Pascali seadusest ja vedeliku raskusest, on tuntud Archimedese seaduse nime all.

Olgu keha raskus õhus P ja selle keha üleslüke antud vedelikus F. Missuguses tasakaalus on see keha vedelikus, kui $P = F$; $P > F$; $P < F$?

8. Erikaalu määramine Archimedese seaduse põhjal. Archimedese seaduse põhjal on lihtne määrata kehade erikaalu, sest kehade kaalukaotus vees grammides võrdub arvuliselt selle keha ruumalaga cm^3-tes.

a) Kui keha kaalub õhus P G, vees P_1 G, siis on keha ruumala $P - P_1$ cm^3 ja erikaal

$$e = \frac{P}{P - P_1} \quad \frac{\text{G}}{\text{cm}^3}.$$

Näide. Rauatüki $P = 390$ G, $P_1 = 340$ G, sellest saame

$$e = \frac{390}{390 - 340} = \frac{390}{50} = 7{,}8 \left(\frac{\text{G}}{\text{cm}^3}\right).$$

b) Kui keha vees põhja ei vaju, näiteks kork, siis tuleb ta erikaalu leidmisel ühendada mõne raskema kehaga (seatina). Olgu korgi kaal õhus P G, seatina kaal vees Q_1 G ja seatina kaal ühes korgiga vees P_1 G, siis on korgi ruumala $P - (P_1 - Q_1)$ ehk $P - P_1 + Q_1$ cm^3 (tõestada seda!) ja erikaal:

$$e = \frac{P}{P - P_1 + Q_1} \quad \frac{\text{G}}{\text{cm}^3}.$$

Näide. Korgitüki $P = 8{,}9$ G, $P_1 = 64{,}5$ G, $Q_1 = 105{,}8$ G; leida e!

c) Vedeliku, näiteks petrooleumi, erikaalu leidmiseks võtame niisuguse keha, mis vees ja antud vedelikus vajub põhja ega lahustu, ja vaatame, kui palju kaotab ta oma kaalust antud vedelikus ja vees kaaludes. Saadud arvude suhe ongi otsitav erikaal. Kaalugu näiteks rauatükk õhus P G, petrooleumis P_1 G ja vees P_2 G, siis on petrooleumi kaal rauatüki ruumala suuruses $P - P_1$ G ja ruumala $P - P_2$ cm³ ning erikaal:

$$e = \frac{P - P_1}{P - P_2} \quad \frac{\mathrm{G}}{\mathrm{cm}^3}.$$

Näide. Rauatüki $P = 89{,}6$G, $P_1 = 80{,}9$G, $P_2 = 78{,}9$G; leida petrooleumi e!

1. Kui palju kaalub lootsik, mis 110 liitrit vett välja surub?
2. Vette asetatud keha kaotab oma kaalust 5 G. Kui palju kaotab oma kaalust sama keha, asetatud piiritusse, elavhõbedasse?
3. Seatinatükk kaalub vees 104 G. Kui palju kaalub ta õhus?

9. Ujumine. Teisi Archimedese seaduse rakendusi. Archimedese seadusel põhineb ujumise nähtuse seletamine. Keha püsib vedeliku pinnal või vedeliku sees tasakaalus, kui keha kaal võrdub vedeliku üleslükkega, s. o. ujuva keha poolt väljatõrjutud vedeliku kaaluga. On keha kaal suurem üleslükkest, langeb keha vedelikus põhja. Nii kaalub alati laev kogu laadungiga sama palju kui laeva poolt väljatõrjutud vesi. Lisame laevale laadungit juurde, vajub laev sügavamale, et suureneks vee üleslüke; vähendame laadungit — tõuseb laev kõrgemale, et üleslüke väheneks. Laeva suurust hinnatakse tonnaaži kaudu. Tonnaaž on laeva kaal koos laadungiga tonnides normaalse koormatuse juures. Kui näiteks mõne laeva tonnaaž on 5000, siis kaalub see laev koos laadungiga 5000 tonni, järelikult sama palju kaalub ka laeva poolt väljatõrjutud vesi. Et 1 m³ vett kaalub 1 tonn, siis on antud juhul laeva poolt välja tõrjutud vee ruumala 5000 m³.

Allveelaeva üleslüke on alati sama, järelikult tuleb siin laeva laskumist ja pinnale tõusu reguleerida laeva kaalu muutmisega. See toimub eriliste kambrite veega täitmise või veest tühjendamise abil.

Archimedese seadusel põhjeneb ka areomeetrite kasutamine. Areomeeter on eriline riist vedeliku erikaalu määramiseks (joon. 10). Mida väiksem on vedeliku erikaal, seda sügavamale vajub temas areomeeter. Asetades areomeetrid tuntud erikaaludega vedelikesse ja tehes skaalal vastavad märkused, võime kasutada sel teel saadud skaalat vedeliku erikaalu määramiseks.

Areomeetrit, mis on kohandatud piima rasvaprotsendi määramiseks, nimetatakse laktomeetriks, piirituse sisalduse protsendi määramiseks — spirtomeetriks.

1. Mees suudab õhus üles kergitada 100-kilogrammise kivi. Kui suur on kivi ruumala (m^3), mille sama mees jõuab üles kergitada vees (erikaal 2,5)?

2. Kui palju kaalub kivi, mis elavhõbedas ujudes 12 cm^3 sisse vajub? Kui suur on selle kivi ruumala (erikaal 2,5)?

3. Vees ujuvast jääpangast ulatub 10 m^3 veepinnast kõrgemale. Kui suur on selle jääpanga ruumala ja kaal?

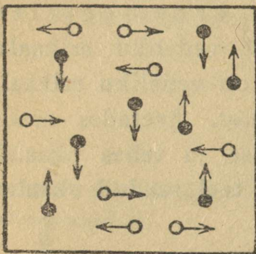
4. Vaskkera kaalub õhus 264 G, vees aga 221 G. Kas see keha on täis või õõnes? Kui suur oleks viimasel juhul õõnsuse ruumala?

5. Keha kaalub 200 G ja vajub petrooleumis ujudes sisse $^1/_4$ oma ruumalast. Leida selle keha ruumala ja erikaal!

Joon. 10. Areomeeter.

Rõhumise nähtused gaasides.

10. Gaaside üldomadusi. Gaasidel (õhk, süsihappe- ning valgustusgaas jne.) ei ole kindlat kuju ega ruumala. Nad koosnevad molekulidest, mis on alalises liikumises. See järeldub gaaside segunemisnähtustest (samasse kinnisesse anumasse kaht erisugust gaasi juhtides saame nende ühtlase segu, lõhnade levimine jne.).



Joon. 11. Gaasi molekulid on alalises liikumises.

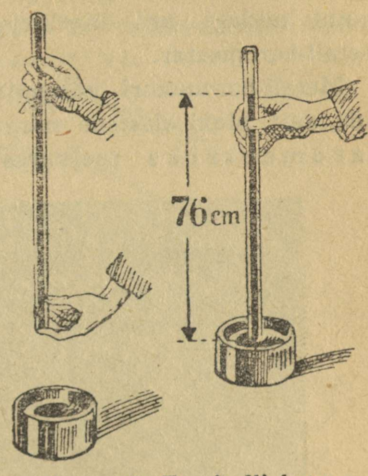
Samuti on gaasid kergesti kokkusurutavad. Sellest järeldame, et molekulide-vaheline ruum on võrreldes molekulide endi ruumalaga nähtavasti väga suur. Seetõttu on molekulid üksteisest suhteliselt kaugel ning nende vahel pole märgatavaid tunge. Nõnda siis võime kujutella gaasi koosnevana suurest hulgast molekulidest, mis liiguvad ruumis vabalt suure kiirusega. Sellest siis ka gaaside omadus lõpmata paisuda ja täita ühtlaselt ruumi kinnises anumas.

Samuti kui vedelik võib gaas tasakaalustada ainult ta pinnaga risti (normaalselt), mitte aga puuteliselt (tangentsiaalselt) rakendatud tunge; ka rõhumist annavad gaasid edasi igas suunas ja ühteviisi (Pascali seadus), mida on kerge näidata 2. joonisel kujutatud riistaga, tarvitades vee asemel suitsu.

Aineosakesed, millest gaasid koosnevad, tungivad samuti maa poole kui tahkete ja vedelate kehade aineosakesed. Tähendab, gaasidelgi on raskus, neid võib kaaluda, ehkki tahkete ja vedelate kehadega võrreldes on gaasid väga kerged. Näiteks **1 liiter õhku kaalub** normaaltingimustes (temp. 0^0 ja rõhk 760 mm) **1,293 grammi.**

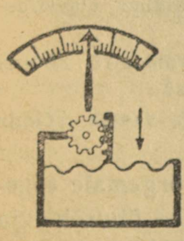
11. Õhurõhu mõõtmine. Õhurõhu suurust on lihtne arvutada tuntud Torricelli katsest. Olgu elavhõbedasamba kõrgus 76 cm, järelikult õhurõhk tasakaalustab sel juhul 76 cm kõrguse elavhõbedasamba raskuse. Et rõhku arvestatakse 1 cm^2-lisele pinnale, siis tuleb meil arvutada 76 cm^3 elavhõbeda raskus, mis on $13{,}6 \cdot 76$ ehk 1033 grammi. Järelikult õhurõhk sel puhul on $1033 \frac{G}{cm^2}$ ehk $1{,}033 \frac{kG}{cm^2}$.

Õhurõhk, mis tasakaalustab 76 cm kõrguse elavhõbedasamba, ongi normaalrõhk ehk füüsikaline atmosfäär (Atm), vastandina tehnilisele atmosfäärile (at).



Joon. 12. Torricelli katse.

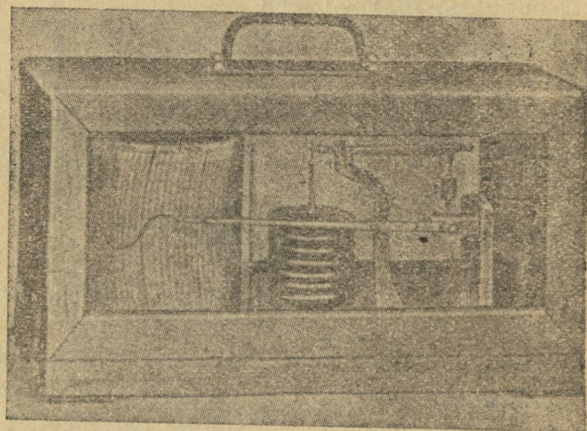
12. Baromeetrid. Barograaf. Baromeetriga mõõdame õhurõhku. Lihtsamaks baromeetriks on Torricelli katse tegemisel tarvitatud riist (joon. 12). Niisugust baromeetrit nimetatakse anumbaromeetriks.


Joon. 13. Aneroid-baromeeter.

Väga levinud on aneroid- ehk metall-baromeetrid (joon. 13). Nende oluliseks osaks on õhutühi metallkarbike, mille kaas on tehtud hästi vetruvast plekist. Õhurõhumise suurenedes paindub kaas veidi sissepoole, rõhumise vähenedes aga ümberpöördult. Karbi kaane võrdlemisi väikesed edasi-tagasi nihkumised suurendatakse kangide ja hammasrataste süsteemi abil meile kergesti tähelepandavaiks osuti liikumisteks astmikul. Aneroidi astmik varustatakse jaotistega, mis vastavad elavhõbe-baromeetri omadele.

Riista, mis järjest üles kirjutab õhurõhku iga momendi kohta, nimetatakse b a r o g r a a f i k s (joon. 14). See pole muud midagi kui üleskirjutamis-vahenditega varustatud metall-baromeeter.

Metall-baromeetri näitamist tuleb vahete-vahel reguleerida, sest pleki elastsus muutub aja jooksul. N o r m a a l b a r o m e e t r i k s seejuures on elavhõbe-baromeeter.



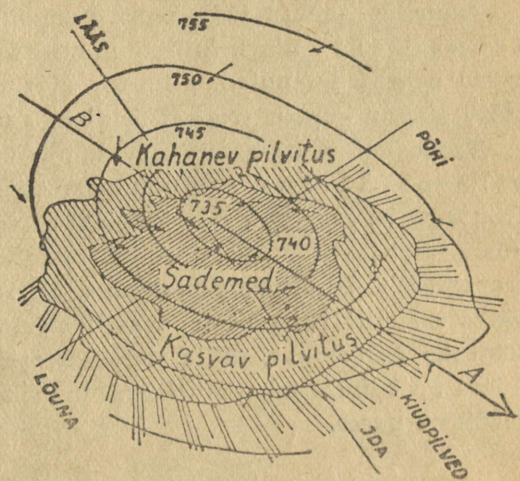
Joon. 14. Barograaf.

1. Mitu korda on petrooleum-baromeeter tundlikum elavhõbebaromeetrist?

2. Mitme mm võrra muutub petrooleum-baromeetri kõrgus baromeetrit 1 m kõrgemale või madalamale asetades?

3. Milline elavhõbedasamba kõrgus baromeetris vastab rõhule 1 tehniline atmosfäär?

13. Baromeetri kasutamine. Maapinnast kõrgemale tõustes õhurõhk väheneb. Nende kahe suuruse — õhurõhk ja kõrgus merepinnast — vahel on kindel side, ehkki me ei saa seda väljendada päris täpselt, sest siin on mõjumas väga mitmesugused tegurid (niiskus, temperatuur jne.); ka on üldse atmosfääri olek väga muutlik. Kuid siiski on võimalik merepinnast kõrgemale tõustes õhurõhu suuruse põhjal kaunis õieti otsustada tõusu kõrguse üle. Niiviisi määravad kõrgust õhusõitjad ja rändajad mägedes. Praktiliselt võib öelda, et maapinna läheduses iga **11 m** võrra kõrgemale tõustes baromeeter langeb **1 mm** võrra. Kõrguse mõõtmiseks kohandatud baromeetrit nimetatakse a l t i m e e t r i k s.



Joon. 15. Madalrõhkkonna ehitus.

Palju laialdasem on baromeetri kasutamine ilmade ennustamisel. Vaatlused näitavad, et kuiva ilmaga on õhurõhk harilikult kõrge, vihmase ilmaga — madal. Siin on põhjuseks nn. t s ü k l o n i d (madalrõhu-ala) ja a n t i t s ü k l o n i d (kõrgrõhu-ala), mis kaunis püsivate õhkkonna-moodustistena mööda maad edasi liiguvad ja teatava ilma endaga kaasa toovad. Õhurõhu muutumise põhjal, ühtlasi arvesse võttes kõiki teisi andmeid, nagu pilvitust, tuule suunda ja kiirust, temperatuuri muutumist jne., on võimalik otsustada tsüklonite ja antitsüklonite liikumise üle ning sellejärgi ennustada tulevat ilma harilikult 1—2 päeva ette.

14. Õhkkonna ehitus. Õhkkond ehk atmosfäär ümbritseb Maad paksu kihina. Tema alumiseks piiriks on maapind. Õhkkonna ülemise piiri täpne määramine osutub raskeks, sest kõrgemale tõustes õhu tihedus järjest väheneb, kuni lõpuks õhk kaob hoopis ära.

Õhkkonna paksusest annavad tunnistust temas toimuvad mitmesugused nähtused. Nii tekib hämariku valgustus päikesekiirte peegeldumisest õhuosakestest 60—70 km kõrguses. Virmalised tekivad 80—800 km kõrgusel ja lendtähed hakkavad helendama 100—300 km kõrguses.

Alumine, umbes 11 km paksune õhkkonna kiht kannab troposfääri nime. Siin toimuvad meie ilmastiku mõjustavad nähtused (tuuled, pilvitus, sademed). Suure liikuvuse tõttu on õhu koostis troposfääris kogu ulatuses ühesugune.

Troposfäärist kõrgemal olevat õhkkonna kihti nimetatakse stratosfääriks. Siin puuduvad tõusvad õhuvoolud nagu troposfääris, seepärast on stratosfääri temperatuur võrdlemisi püsiv (umbes —55°). Ka on õhk stratosfääris vähem liikuv kui troposfääris. Pilvituse puudumine, eriti aga stratosfääri õhu väike takistus liikumisele, teevad stratosfääri sobivaks liiklusteeks õhkkonnas, mille tegeliku rakendamise võimaluste kohta on käimas laiaulatuslikud uuurimused ka nõukogude teadlaste peres.

Voolamisnähtused ja lendamine.

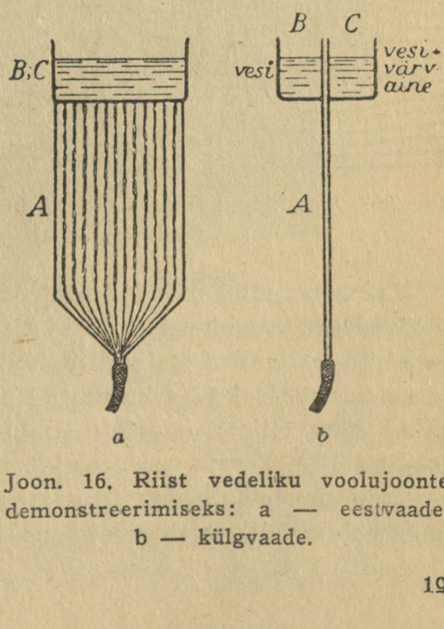
15. Voolamine. Me ei tunne looduses absoluutset paigalolekut. Kõik liigub: Päike, tähed, planeedid, Maa. Ka meid ümbritsevas looduses Maa pinnal on tegemist alalise liikumisega: vesi voolab jõgedes, õhk liigub tuulena, meredes on hoovused. Seega on vee ja õhu voolamine harilikuks nähtuseks, millega me igal sammul kokku puutume. Seepärast on tarvilik vee ning õhu voolamisega seotud nähtusi lähemalt tunda, et neid ära kasutada tehnilistes rakendustes.

Tuleb silmas pidada, et voolamisnähtuste uurimisel on tulemus sama: kas ese seisab voolavas vedelikus paigal või liigub voolukiirusega paigalseisvas vedelikus, — mõlemal juhul on eseme ja vedeliku suhteline liikumine sama. Näiteks kas jalgrattur sõidab täiesti vaikse ilmaga kiirusega $5 \frac{m}{sek}$, või jalgrattur seisab paigal ja tuul puhub kiirusega $5 \frac{m}{sek}$, mõlemal juhul on jalgratturi ja õhu suhteline kiirus sama ($5 \frac{m}{sek}$), seega on sama ka siin tekkinud tuule mõju. Selle põhjal võime kasutada voolu puudumisel eseme liikumist paigalseisvas vedelikus. Võrdluseks meelde tuletada, kuidas lapsed vaikse ilmaga tuuleveskeid käima panevad!

Vee ja õhu nähtuste uurimisel on vaja tekitada nende tugevat voolu kunstlikult, laboratoorselt. Selleks pannakse vesi (õhk) propelleriga erilistes kanalites tugevasti liikuma. Et propelleri pöörlemise tõttu vee (õhu) osakesed koos edasiliikumisega ka ringi liikuma hakkavad, siis juhitakse see vool paigalseisvate tasapinnaliste, risti asetatud plaatide vahelt läbi, mille tõttu õhuosakeste voolamisteed jälle sirgeks muutuvad.

16. Voolujooned. Vedelikuosakesed, liikudes voolus, tõmbavad endiga kaasa ka väiksemaid kergeid esemeid. Nii võime tähele panna, kuidas tuul lumehelbeid, langenud puulehti või tolmu endaga kaasa viib, millede abil me võime jälgida õhuosakeste liikumisteed tuules. Samuti mõni ujuv puutükk märgib veeosakeste liikumisteed veevoolus.

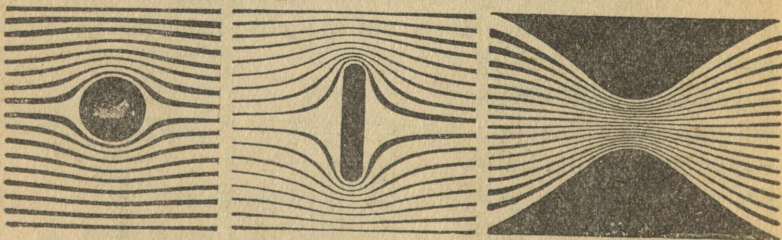
Laboratoorsetes katsetes kasutatakse veevoolu nähtavaks tegemiseks peent puu- või alumiiniumipuru ja värvaineid, õhuvoolu puhul tolmu, suitsu või lipukesi.



Joon. 16. Riist vedeliku voolujoonte demonstreerimiseks: a — eestvaade, b — külgvaade.

Seda teed, mida mööda vedelikuosake voolus liigub, nimetatakse voolujooneks. Voolujooned annavad meile pildi vedelikuosakeste liikumisest voolus, samuti nagu magneti tungjooned annavad pildi magnetitungide mõjust magnetiväljas.

Vedeliku voolujoonte vaatlemiseks voolamisel kasutatakse joonisel 16 kujutatud riista. Umbes 1 mm kaugusele teineteisest asetatud klaasplaadid moodustavad õhukese klaasanuma *A*. Sellega on väikeste augukeste kaudu ühenduses anumad *B* ja *C*. Anumate *B* ja *C* augukesed pole asetatud kohakuti, vaid vaheldumisi. Sedaviisi saame anumatest *B* ja *C* voolavate jugade read üksteisest eraldada. Kui näiteks anumas *B* on keedetud vesi, anumasse *C* aga on veele lisandatud tinti või mõnd teist värvainet, näiteks *kalium permanganicum*'i lahust, siis näeme anumas *A* voolamas kõrvuti anumast *B* tulevate läbipaistvate veejugadega anumast *C* tulevaid värvilisi jugasid. Sel viisil võime hõlpsasti jälgida voolujoonte käiku ühe või teise vedeliku või mõnesuguste eriliste tingimuste puhul.



Joon. 17. Voolujooned: *a* — silindri ümber; *b* — risti asetatud tõkke ümber; *c* — kitsas kohas.

Vaatleme nüüd mõnd voolujoonte pilti katsetest vedeliku voolamisega väikeste kiiruste puhul. Kui asetada vedeliku voolamise teele silindriline keha, siis saame voolujoontena joonisel 17 *a* kujutatud pildi. Voolu teele risti asetatud tõke (liist) muudab voolujoonte käiku, nagu näha joonisel 17 *b*. Teeme voolutee kitsaks (joon. 17 *c*), siis nihkuvad voolujooned tihedalt üksteise lähedale ning ühes sellega suureneb vedelikuosakeste kiirus kitsas kohas, sest sellest peab igas sekundis niisama palju vedelikku läbi voolama kui laiastki kohast.

Eelmistest katsetest näeme, et vedelik voolab pidevate katkematute jugadena, voolujoontena, mis mõne esineva tõkke puhul sellest mööda lähevad, teda ümber haarates. Mida kitsam on voolu tee, seda tihedamini asetuvad voolujooned ja seda suurem on voolu kiirus. Selle põhjal võime voolujoonte pildi järgi otsustada voolu iseloomu üle ühes või teises kohas.

17. **Laminaarne ja keeriseline voolamine.** Eelmises paragrahvis toodud voolujoonte pildid esinevad juhul, kui voolu kiirus on väike, sest siis ei avalda vedelikuosakeste sisehõõrdumine ja kokkusurutavus tunduvat mõju voolamisele. Nimetame seda laadi voolamist ladusaks ehk laminaarseks (kihiliseks).

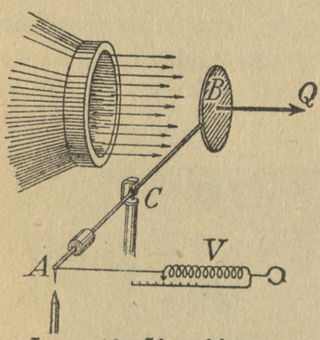
Joon. 18. Keerised liikuva keha järel.

Voolamiskiiruse suurenedes muutub aga voolamise iseloom. Vedelik ei voola enam ladusalt, pidevate jugadena, vaid tekivad nn. keerised, nagu näha joonisel 18. Seepärast nimetatakse sellist liikumist keeriseliseks ehk turbulentseks.

Keeriste tekkimist põhjustab hõõrdumine tõkke ja vedelikuosakeste vahel ning viimaste sisehõõrdumine. Hõõrdumine vähendab liikuvate osakeste kiirust. Vedelikuosakesed, mille hõõrdumine on suurem, jäävad maha väiksema hõõrdumisega osakestest ning seetõttu tekib keeriseline ringliikumine.

Keeriste tekkimisel on suur tähtsus liikumisel. Keeriste tekkimiseks kulub energiat, mis saadakse liikuvalt kehalt. Seetõttu keerised pidurdavad selle keha liikumist, mis neid tekitas, s. o. keerised hajutavad liikuva keha energiat.

18. **Keskkonna takistus.** Kui mõni keha liigub vedelikus — õhus või vees, siis vedelik takistab seda liikumist. Seejuures on ükskõik, kas keha liigub paigalseisvas vedelikus või keha seisab paigal liikuvas vedelikus, vedelikuvoolus. Oluline on siin keha ja vedeliku suhteline liikumine, nagu me seda nägime § 15 toodud näitest jalgratturi kohta. Liigub aga keha vooluga kaasa, nagu tuulest aetud vaba õhupall või veevooluga kaasa liikuv puutükk, siis puudub keskkonna takistus liikumisele. Ka üks vedelikukiht takistab teise, temaga kokkupuutuva vedelikukihi liikumist. Seda takistust nimetatakse sisehõõrdumiseks ehk viskoossuseks.



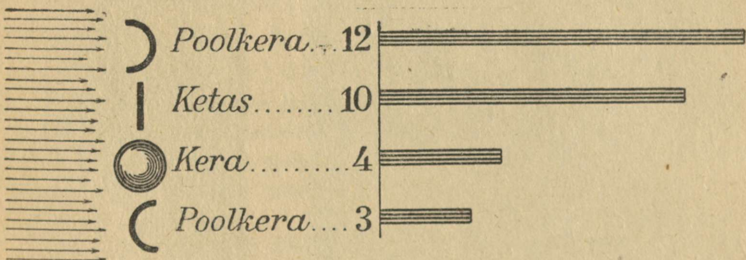
Joon. 19. Õhutakistuse mõõtmine.

Keskkonna takistuse suurust liikuvale kehale mõõdame tungiühikutes (düünides, G-des). Selleks võime kasutada iga vastavalt kohandatud tungimõõtjat, näiteks kirja- või vedrukaalu (joon. 19).

Ketas, mille takistust õhuvoolus mõõdame, on kinnitatud võrdõlgse kangi külge. Sel juhul vedrukaal V näitab otseselt õhutakistuse suurust Q. Lihtsuse mõttes vaatleme allpool ainult neid juhte, kus keskkonna takistuse suund langeb ühte voolu suunaga.

Muutes õhuvoolu kiirust näeme, et ketta takistus Q suureneb kiiruse suurenemisega. Väikeste kiiruste puhul (õhus näiteks kuni 1 $\frac{m}{sek}$) on takistus võrdeline kiiruse esimese astmega. Suuremate kiiruste puhul, kus liikumisel tekivad juba keerised, on takistus võrdeline kiiruse ruuduga.

Mitmesuguses suuruses kettaid voolu asetades leiame: mida suurem on keha nn. frontlõige, s. o. keha kõige suurem voolusihiga risti tehtud lõige, seda suurem on ka takistus. Ta on võrdeline frontlõikega.

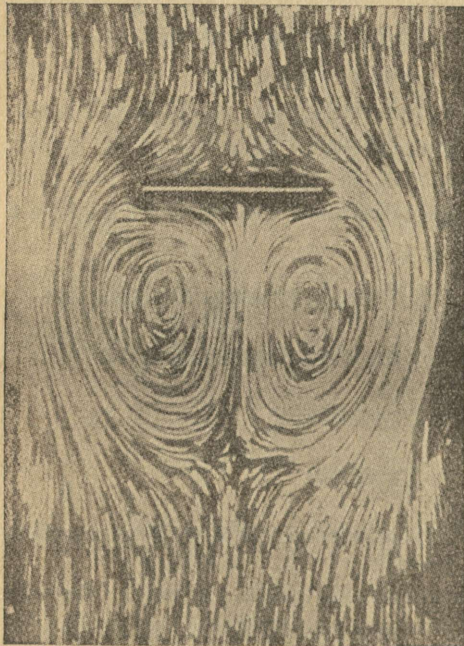


Joon. 20. Sama frontlõikega kehade võrdlev takistus olenevalt keha kujust.

Kuidas oleneb keskkonna takistus keha kujust? Selleks asetame mitmekujulisi, kuid sama frontlõikega kehasid voolu ja mõõdame vastavaid takistuse suurusi. Toome siin (joon. 20) mõne keha võrdleva takistuse olenevalt kujust.

Nagu joonisest 20 nähtub, on keha kuju väga oluliseks teguriks, millest oleneb keskkonna takistuse suurus. Kõige väiksema takistuse tekitab nn. tilgakujuline keha.

Millest on tingitud keskkonna takistuse sõltuvus kujust? Selle selgitamiseks liigutame (veame) vees võrdse kiirusega näiteks ketast ja tilgakujulist keha (joon. 21 ja 22). Mõlemal juhul tekivad vees keerised (nähtavaks teha alumiiniumipuru abil!), kuid ketta puhul on keerised märgatavalt suuremad, järelikult peab ka vee takistus kettale olema märgatavalt suurem kui tilgakujulisele kehale, sest keerised pidurdavad keha liikumist vedelikus. Muidugi lisandub keeriste mõjule veel vastu esifronti kuhjunud vedeliku rõhumine, mis samuti



Joon. 21. Keerised ketta liikumisel vees.

Joon. 22. Keerised tilgakujulise keha liikumisel vees.

on ketta puhul suurem kui tilgakujulisel kehal, kus vedelikuosakesed esifrondist hõlpsasti mööda libisevad. Kuna esifrondi takistus on tingitud vedelikuosakeste kuhjumisest, millest tekib e s i f r o n d i l ü l e r õ h k, mõjuvad keerised liikuva keha taga i m e v a l t, tagasitõmbavalt, sest liikumise tõttu tekib k e h a t a g a a l a r õ h k.

Ka tilgakujulise keha taga tekib keeriseid, kuid need on seevõrra väikesed, et ei avalda tunduvat mõju liikumisele. Seetõttu haaravad voolujooned vedelikus liikuva tilgakujulise keha tihedalt ümber, asetudes rööpselt tema pinnaga. Seepärast nimetataksegi tilgakujulist keha ka voolujooneliseks.

Lõpuks sõltub keskkonna takistus veel keskkonna tihedusest ja on sellega võrdeline. Läheb ju keskkonna takistuse ületamiseks kulutatud energia keeriste tekitamiseks, s. o. vedelikumassi liikumapanemiseks. Liikuva vedelikumassi hulk aga on võrdeline tihedusega.

Kokkuvõttes võime öelda: keskkonna takistus on võrdeline kiiruse ruuduga, frontlõikega ja keskkonna tihedusega ning sõltub keha kujust. Kõige vähem takistab keskkond tilgakujulise keha liikumist.

1. Mitu korda on keskkonna takistus elavhõbedas suurem kui petrooleumis, vees suurem kui õhus?

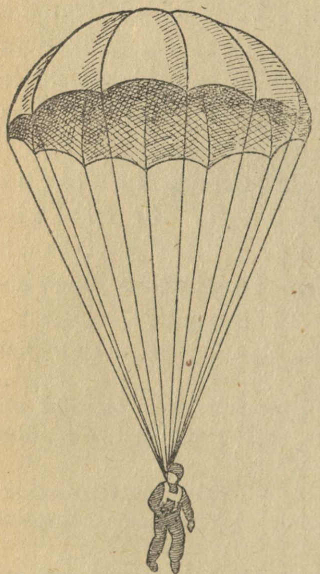
2. Lennuk tõusis maapinnast 4,4 km kõrgusele, kus õhurõhk oli 43,5 cm Hg. Kuidas muutus õhutakistus, kui maapinnal oli rõhk normaalne?

3. Milles seisneb sõudmine? Kas oleks võimalik lootsiku edasiliikumine sõudmisel, kui õhu takistus mõlale oleks niisama suur kui veeski?

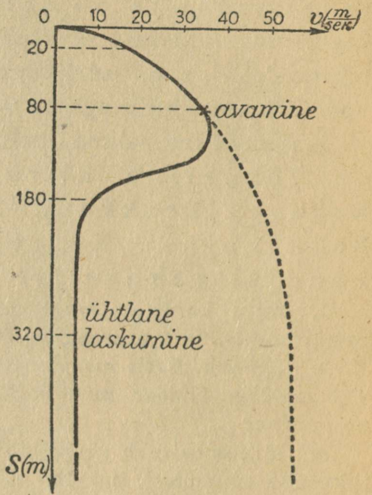
4. Lootsikud ehitatakse harilikult terava nina ja laiema päraga, vahel aga tehakse mõlemad otsad teravad (merelootsikud). Kumma lootsikuliigi takistus vees liikumisel on väiksem?

19. **Langevari.** Keskkonna takistuse näitena vaatleme langevarju püsti allalangemist õhus. Langevari võtab pärast avamist (lahtilöömist) enam-vähem õõnsa poolkera kuju. Nagu nägime, on õhu takistus sel juhul kõige suurem. Algul saab langevari vaba langemise kiirenduse, kiirus järjest kasvab, kuid ühes sellega kasvab ka õhu takistus (võrdeliselt kiiruse ruuduga). Lõpuks, kui õhu takistus on muutunud võrdseks langevarju raskusega, on langevarjusse mõjuvate tungide resultant null ja langevari liigub edasi inertsi mõjul ühtlaselt, ilma kiirenduseta, jääva kiirusega umbes 5—6 $\frac{m}{sek}$. Sellise stabiliseerunud jääva kiiruse saavutab langevarjur pärast

seda, kui ta on langenud allapoole ~ 250 m. Ilma langevarjuta langemisel oleks jääv kiirus sel juhul umbes 10 korda suurem, s. o. 60 $\frac{m}{sek}$. Esimesel juhul vastab langevarjuri lõppkiirus ilma langevarjuta 1,8 m kõrguselt allahüppamise lõppkiirusele, teisel juhul aga 180 m kõrguselt. Nagu teame, võib teatud ettevaatusega 1,8 m kõrguselt päris hädaohutult alla hüpata.



Joon. 23. Langevari.

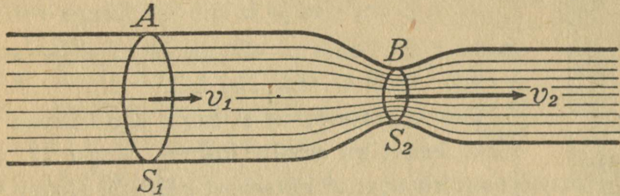


Joon. 24. Langevarjuri langemiskiiruse muutumise graafik.

Harilikult ei avata langevarju otsekohe pärast väljahüppamist, vaid mõni sekund hiljem, kui on saavutatud juba suurem langemiskiirus (kuni 50 $\frac{m}{sek}$). Siis langevarju avades hakkab kiirus kiiresti vähenema, sest õhutakistus on suurem langevarju raskusest, ja jõuab varsti jääva lõppkiiruseni (5—6 $\frac{m}{sek}$), millega langevarjur maapinnale laskub. Näitlikult kujutab langevarjuri kiiruse muutumise käiku sel juhul joon. 24, kus rõhtteljel on märgitud langemise kiirused, püstteljel langemise tee.

Millised paremused on teisel langevarju avamise viisil võrreldes esimesega?

20. Statsionaarne vool. Olgu voolutoru (joon. 25) ristilõiked kohas A ja B vastavalt S_1 ja S_2 ning voolu kiirus v_1 ja v_2. Kui vool on s t a b i l i s e e r u n u d, s. o. voolu igas punktis püsib liikuvate vedelikuosakeste kiirus oma suunalt ja suuruselt kogu aeg jäävana, siis nimetame sellist voolu s t a t s i o n a a r s e k s. On arusaadav, et s t a t s i o-



Joon. 25. Statsionaarne vool.

n a a r s e v o o l u p u h u l p e a b v o o l u i g a s t r i s t i l õ i k e s t s a m a a j a, n ä i t e k s 1 s e k u n d i j o o k s u l s a m a p a l j u v e d e l i k k u l ä b i v o o l a m a, sest muidu peaks tekkima mõnes kohas vedeliku kuhjumine või jälle puudujääk, mida aga statsionaarse voolu puhul olla ei saa. Järelikult:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2,$$

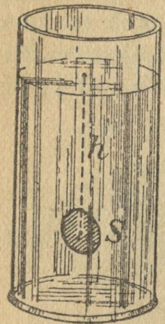
sest ristilõike korrutis kiirusega mõõdab sellest ristilõikest ühe sekundi jooksul läbi voolanud vedeliku hulka, mis aga statsionaarse voolu puhul on võrdsed. Eelmisest valemist järgneb:

$$v_1 : v_2 = S_2 : S_1,$$

s. o. v o o l u k i i r u s e d o n p ö ö r d v õ r d e l i s e d v a s t a v a t e r i s t i l õ i g e t e p i n d a l a d e g a. See tulemus on kokkukõlas voolujoonte puhul (§ 16) saadud tulemusega: mida kitsam on voolutee, seda tihedamini asetuvad voolujooned ja seda suurem on voolu kiirus.

Vool torus on statsionaarne. Toru lõikes, mille pindala 50 cm^2, on voolu kiirus 30 $\frac{\text{cm}}{\text{sek}}$. Leida voolu kiirus lõikes, mille pindala on 10 cm^2.

21. Voolu staatiline rõhk. Mehaanikast teame, et paigalseisvas vedelikus mõõtub raske vedeliku rõhumine anuma seinale või vedeliku sees erikaalu (e), pindala (S) ja sügavuse (h) korrutisega, s. o.

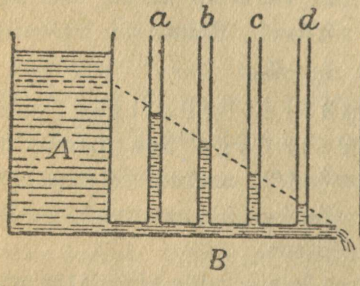


Joon. 26. Rõhumine vedelikus.

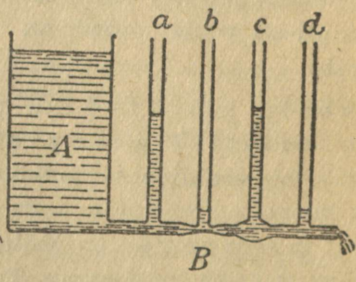
$$F = eSh.$$

F mõõtub grammides, kui e on mõõdetud $\frac{G}{cm^3}$-tes, S cm^2-tes ja h cm-tes. Seega vee rõhumine 1 dm^2-sele pindalale 10 m sügavuses on $1 \cdot 100 \cdot 1000$ G ehk 100 kG.

See korrapärasus ei kehti aga liikuva vedeliku, vedeliku voolu kohta. Nagu 27. ja 28. joon. kujutatud katsetest nähtub, oleneb voolu rõhumine toru seinale toru pikkusest (hõõrdumisest vastu toru seina) ja voolu kiirusest torus (toru ristilõikest). Mida väiksem on toru ristilõige, seda suurem on voolu kiirus ja seda väiksem on rõhumine küljele (seinale), mida mõõdab vedelikusamba kõrgus (joon. 27 ja 28 toru b). Laiemas torus (toru c) voolu kiirus väheneb, voolujooned harvenevad, ühes sellega aga tõuseb vedeliku rõhumine küljele. Sama tulemuse annab ka katse õhuvooluga, nagu näha joonisel 29. Rõhumise muutust näitavad siin kohtades A ja B voolutoruga



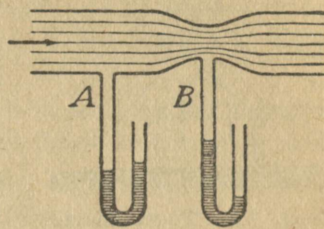
Joon. 27. Voolava vedeliku rõhumine seinale ühtlase jämedusega torus.



Joon. 28. Voolava vedeliku rõhumine seinale ebaühtlase jämedusega torus.

ühendatud vesimanomeetrid. Esimesel juhul tekib väike ülerõhk, teisel juhul alarõhk võrreldes atmosfääri rõhuga.

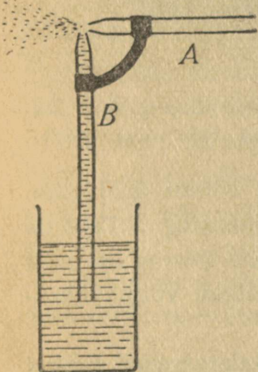
Voolava vedeliku rõhumist, mis toimub risti voolusuunaga, nimetatakse s t a a t i l i s e k s r õ h u k s. Et siin rõhumine toimub risti voolu suunaga, ei avalda sellesse otsest mõju liikuva vedeliku osakesed. Kokkuvõttes võime öelda: staatilise rõhu suurus s õ l t u b v o o l u k i i r u s e s t (voolujoonte tihedusest) ja v ä h e n e b v o o l u k i i r u s e s u u r e n e m i s e g a. Seetõttu avaldab vool suurema kiiruse korral nagu endasse imevat mõju.



Joon. 29. Õhuvoolu külgrõhumine väheneb kiirusega.

Voolu staatilise rõhu abil võime seletada terve rea voolamisega seotud nähtusi.

Pulverisaatoris (pihustajas) puhume läbi toru *A* tugeva õhuvoolu (joon. 30). See vool möödub toruga A risti asetatud toru *B* otsast. Torust *A* tuleva õhuvoolu küljel on rõhumine väiksem atmosfääri rõhumisest. Seetõttu tõuseb torus *B* vedelik ja õhuvool pihustab selle.

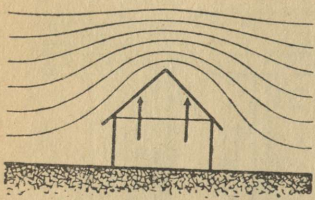


Joon. 30. Pulverisaator.

Samal nähtusel põhineb ka õhu imemine gaasivoolu Bunseni põleti torru tehtud august ning veduri küttekoldes tugeva tõmbe tekitamine auru juhtimisega korstnasse.

Torm ei lükka katuseid maja kõrvale maha, vaid tõstab nad üles (joon. 31). Üle katuse liikudes õhu voolujooned katuse kohal tihenevad ja staatiline rõhk muutub väiksemaks kui katuse all oleva õhu atmosfäärirõhk. Seetõttu õhu rõhumise resultant on suunatud alt üles ja katus tõuseb õhku.

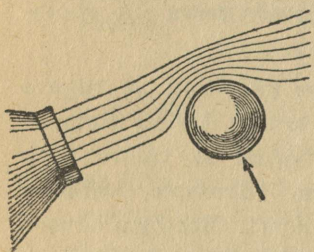
Kahe pabeririba vahelt õhku läbi puhudes tõmbuvad paberiribad teineteise ligi. Pall püsib tasakaalus tugevas õhuvoolus (joon. 32), sest voolujoonte tihenemise kohal on staatiline rõhk väiksem ja õhk nagu imeb palli endasse.



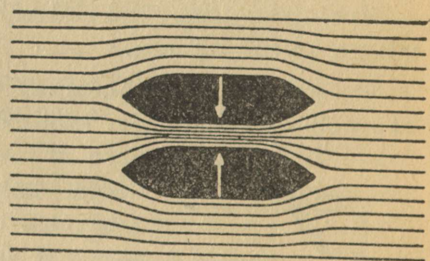
Joon. 31. Torm tõstab katused üles.

Samas sihis teineteise lähedal sõitvad laevad tõmbuvad teineteise poole (joon. 33).

Võtta lehter ja asetada sellesse teine samasugune paberist kokkukeeratud lehter! Katsuda nüüd lehtrist sinnaasetatud paberlehtrit välja puhuda! Kuidas seletada seejuures ilmnenud huvitavat nähtust?



Joon. 32. Pall püsib tugevas õhuvoolus tasakaalus.



Joon. 33. Samas sihis sõitvad laevad tõmbuvad teineteise poole.

22. Voolu dünaamiline rõhk. Staatilist rõhku mõõdame, asetades manomeetri toru otsa rööbiti voolujoontega. Tahame teada saada voolu kogurõhumise suurust, siis peame asetama manomeetri avause risti voolujoontega. Selleks võime kasutada nn. Prandtl'i toru (joon. 34).

Silindrilises kehas on teineteise sees kaks toru: keskel toru K, mis lõpeb otsas P, ja selle ümber toru S, mis lõpeb otsas P_1. Kui asetame riista otsa A just otse vastu voolu, siis näiteks voolava õhu osakesed liiguvad riista ja ühes sellega sisemise toru *K* otsa vastu, kaotavad oma kiiruse ja ühes sellega ka hoo. Seetõttu tekib toru otsa juures (*A*) õhu kuhjumine ehk pais. Selle rõhumine andub edasi toru *K* kaudu manomeetrile otsas *P*; seda nimetatakse voolu **koguröhuks**. Toru S avausest lähevad voolujooned rööpselt mööda, seetõttu saame selle kaudu mõõta staatilist rõhku (otsas P_1).

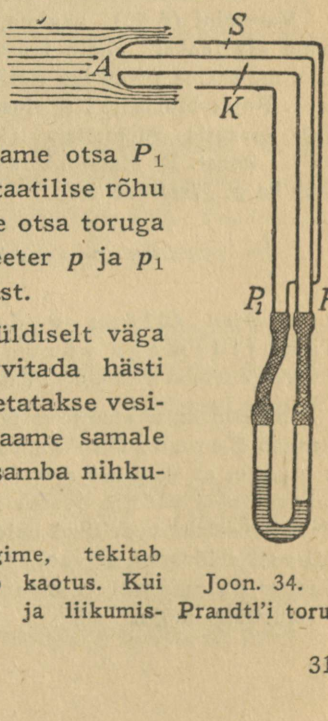
Katsed näitavad, et kogurõhk p on suurem kui staatiline rõhk p_1. Kogurõhu ja staatilise rõhu vahet nimetatakse voolu **dünaamiliseks rõhuks** (p_2), seega

$$p_2 = p - p_1, \text{ millest}$$
$$p = p_1 + p_2, \text{ s. o.}$$

voolu kogurõhk võrdub tema staatilise ja dünaamilise rõhu summaga.

Ühendades vesimanomeetri ühe otsa toruga *P*, jättes teise otsa vabaks, saame kogurõhu suuruse võrreldes atmosfäärirõhuga, mida loeme baromeetril. Kui aga ühendame otsa P_1 vesimanomeetriga, saame määrata staatilise rõhu suurust. Ühendades manomeetri ühe otsa toruga *P*, teise toruga P_1, näitab manomeeter p ja p_1 vahet, s. o. dünaamilise rõhu suurust.

Et voolu dünaamiline rõhk on üldiselt väga väike, tuleb selle mõõtmiseks tarvitada hästi tundlikke manomeetreid. Selleks asetatakse vesimanomeetri toru kaldu, sest siis saame samale rõhumuutusele vastava pikema veesamba nihkumise manomeetritorus.



Joon. 34. Prandtl'i toru.

23. Bernoulli lause. Nagu nägime, tekitab dünaamilist rõhku vedelikuosakeste hoo kaotus. Kui vedeliku tihedus (1 cm^3-i mass) on ϱ ja liikumiskiirus $v \frac{\text{cm}}{\text{sek}}$, siis 1 cm^3-i liikuva vedelikumassi hoog ehk kineetiline energia võrdub $\varrho \frac{v^2}{2}$ ergiga. Katsed ja teooria näitavad, et dünaamiline rõhk (p_2) väljendub sama valemiga, s. o.

$$p_2 = \frac{\varrho v^2}{2},$$

millest järgneb, et dünaamiline rõhk on võrdeline tihedusega ja kiiruse ruuduga.

Asetades eelmises paragrahvis saadud valemisse $p = p_1 + p_2$ dünaamilise rõhu (p_2) asemele temale vastava suuruse $\left(\frac{\varrho v^2}{2}\right)$, saame:

$$p = p_1 + \frac{\varrho v^2}{2}$$

Varemini (§ 20) nägime, et statsionaarse voolu puhul voolab sama aja jooksul voolu igast ristilõikest sama palju vedelikku läbi, s. o. me saame voolu iga ristilõike kohta ruumala V jaoks sama väärtuse. Boyle-Mariotte'i seaduse järgi on antud gaasihulga rõhumise (p) korrutis ruumalaga (V) jäävas temperatuuris jääv, s. o. pV = konst. Et statsionaarse voolu puhul V on jääv, siis peab olema jääv ka p. Järelikult ka

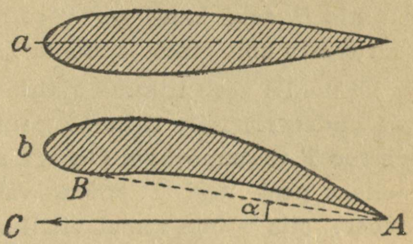
$$p = p_1 + \frac{\varrho v^2}{2} = \text{konst.},$$

s. o. õhu (üldse vedeliku) voolus on kogurõhk, samuti temaga võrdne staatilise ja dünaamilise rõhu summa konstantne.

Saadud lause staatilise ja dünaamilise rõhu konstantsusest voolus kannab Bernoulli lause nime. Selle tuletamisel me toetusime eeldusele, et vool on statsionaarne ja laminaarne (ilma sisehõõrdumiseta) ning vedelik (gaas) mitte kokkusurutav. Tõepoolest rahuldavad reaalsed vedelikud neid nõudeid ainult ligikaudselt. Peale selle oli veel eelduseks, et vool toimub rõhtsalt, s. o. voolava aine kaugus merepinnast ei muutu, mis võimaldab jätta arvestamata raskustungi mõju.

Bernoulli lausest järgneb, et d ü n a a m i l i s e r õ h u s u u r e n e d e s (k i i r u s e k a s v a d e s) v ä h e n e b s t a a t i l i n e r õ h k j a ü m b e r p ö ö r d u l t. Kui voolu kiirus $v = 0$, siis kaob dünaamiline rõhk ja kogurõhk võrdub sel juhul staatilise rõhuga.

24. Lennuki kandepinnasse mõjuvad tungid. Lennuki ehk aeroplaani all mõeldakse õhusõidukit, mis püsib õhus ainult e d a s i l i i k u m i s e l tekkinud tungide tõttu, kuna aerostaat (õhupall, tsepeliin) püsib õhus Archimedese seaduse põhjal toimuva üleslükke mõjul. Lennuki paneb liikuma mootor, kuna õhus hoiavad teda kandepindade kiirel liikumisel tekkinud tungid. Vaatleme neid lähemalt.



Joon. 35. Lennuki kandepinna läbilõige.

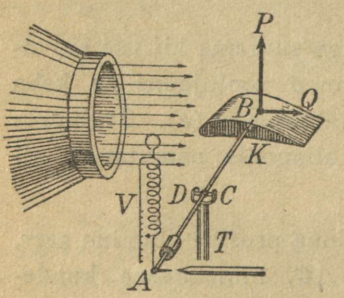
Väiksema takistuse ja ühes sellega suurema kiiruse saavutamiseks omavad lennuki kandepinnad voolujoonelise keha kuju, nagu näha joonisel 35 antud läbilõikest (*a*). Seejuures on kandepinna tagumine osa veidi allapoole painutatud, nii et tekib väike nõgusus (*b*).

Nurka, mille moodustab kandepinna profiili alumine serv, lihtsamalt kõõl *AB*, lennusuunaga *AC*, nimetatakse kandepinna kohtumisnurgaks (α). Kohtumisnurga suurusest oleneb kandepindade üleslüke kui ka takistus lennul.

Lennukisse mõjub kogu lennuki raskus ülalt alla ja õhu üleslüke Archimedese seaduse põhjal alt üles. Need kaks tungi mõjuvad lennukisse alati, olgu ta paigal või liikvel. Õhu nn. staatiline üleslüke on aga nagu iga teisegi keha puhul lennuki raskusega võrreldes seevõrra väike, et praktiliselt ta ei tule arvesse. Millest tekib siis tung, mis tasakaalustab lennuki raskuse? Selgituseks teeme järgmise katse.

Tasakaalustame kandepinna mudeli *K* rõhttelje *CD* ümber vabalt pöörduval võrdõlgsel kangil *AB*. Kangi otsaga *A* ühendame vedrukaalu *V*. Kui asetame kandepinnamudeli tugevasse õhuvoolu, siis tekib kohe üleslüke *P*, mis tõstab mudeli üles. Tahame, et mudel püsiks paigal, peame vedrukaalu abil otsas *A* tekitama tungi, mis võrdub üleslükkega punktis *B*, sest kang on võrdõlgne. Sedaviisi on võimalik vedrukaalu abil otseselt mõõta kandepinna üleslükke suurust.

Et mudel saab liikuda ainult üles ja alla, siis õhutakistus, mis püüab mudelit liikuma panna voolu suunas, tasakaalustub toe *T* vastumõjuga. On aga mudel liikuv ka voolu suunas (selleks peab tugi *T* võima vabalt pöörduda vertikaaltelje ümber), siis võime samal viisil vedrukaalu abil ära mõõta ka õhuvoolu mõjul tekkinud õhutakistuse suuruse (*Q*), mis püüab mudelit liikuma panna voolu suunas.

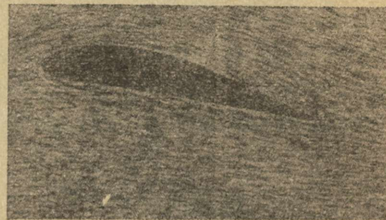


Joon. 36. Õhuvool tekitab kandepinna üleslükke.

Õhuvoolu mõjul tekkinud üleslüket nimetatakse dünaamiliseks üleslükkeks. Seda ei tule ära segada Archimedese seaduse põhjal mõjuva staatilise üleslükkega, millest oli kõnet aerostaadi tasakaalustamisel õhus. Dünaamiline üleslüke (*P*) ja õhutakistus (*Q*) on kaks komponenti, milledest oleneb lennuki tasakaal õhus.

Muudame eelmises katses kandepinna kohtumisnurki õhuvoolus ja mõõdame neile vastavad üleslükketungid kui ka takistused. Katsetulemused näitavad, et üleslüke kui ka õhutakistus üldiselt kohtumisnurga suurenedes suurenevad. Muidugi olenevad nii üleslüke kui ka õhutakistus peale kohtumisnurga veel kandepinna kujust, suurusest, õhutihedusest ja lennukiirusest.

Õhus liikuva kandepinna ümber voolava õhu voolujoonte kuju katseliselt uurides selgub, et kandepinna peal asetuvad voolujooned tihedamalt, seega on õhuvoolu kiirus seal suurem, kandepinna all aga hõredamalt, järelikult on voolukiirus seal väiksem. Seetõttu kandepinna peal valitseb alarõhk, all aga ülerõhk võrreldes atmosfäärirõhuga.



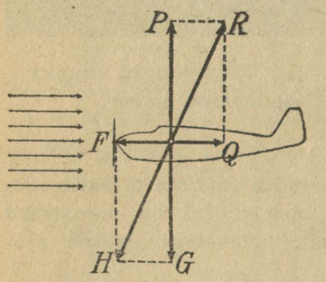
Joon. 37. Voolujooned liikuva kandepinna ümber.

Üle- ja alarõhku kandepinna liikumisel võib määrata ka vesimanomeetriga § 22 näidatud viisil, kui kandepinna mudel on varustatud vastavate küljekanalitega, mis on ühendatud avaustega mudeli alumisel ja ülemisel pinnal.

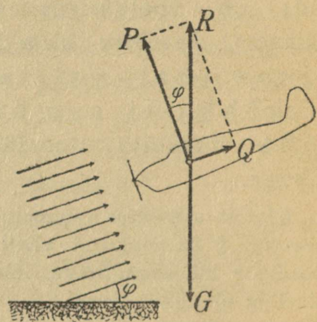
Alarõhk kandepinna peal ja ülerõhk kandepinna all mõjuvad samas suunas, nimelt kandepinda üleslükkavalt, ja nende summa moodustabki dünaamilise üleslükke ehk tõstetungi, mis tasakaalustab lennuki raskuse.

25. Tasakaal lennul. Vaatleme juhtu, kus lennuk liigub rõhtsalt jääva kiirusega. Et kiirendus on null, siis peavad lennukisse rakendatud tungid olema tasakaalus ja ta liigub ühtlaselt inertsi mõjul. Olgu kogu lennuki raskus G, mootori tõmme F ja nende resultant H (joon. 38). Edasi olgu lennuki liikumisest tekkinud õhu dünaamiline üleslüke (tõstetung) P ja õhu takistus Q ning nende resultant R. Et kõigi lennukisse mõjuvate tungide resultant peab võrduma nulliga, siis seetõttu H ja R peavad olema suuruselt võrdsed ning vastassuunalised. Sellest järgneb (tõestada seda geomeetriliselt!), et $F = Q$ ja $P = G$, s. o. ühtlasel rõhtsal lennul võrdub mootori tõmme õhutakistusega ja dünaamiline üleslüke lennuki raskusega.

Liuglennu puhul, näiteks lennuki maandumisel, mootor ei tööta ja mootori tõmme $F = 0$. Sel juhul lennuki ühtlasel allaliugumisel dünaamilise üleslükke P ning õhutakistuse Q resultant R peab olema suunatud vertikaalselt üles ning võrduma lennuki raskusega (joon. 39).



Joon. 38. Tasakaal ühtlasel rõhtlennul.



Joon. 39. Tasakaal liuglennul.

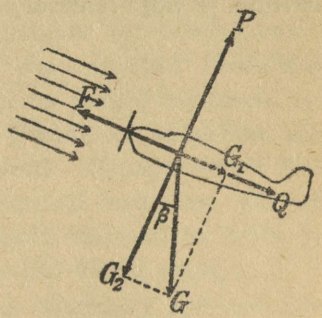
Nagu joonisest nähtub, võrdub sel juhul liugumisnurk φ P ja R vahel oleva nurgaga ning $\tan \varphi = \frac{Q}{P} = \varepsilon$. Saadud arvu ε nimetatakse liugumiskoefitsiendiks (arvuks). Mida väiksem on liugumiskoefitsient, seda väiksem on liugumisnurk φ ja seda kaugemale saab lennuk edasi lennata, kui mootor lakkab töötamast, mis on väga tähtis hädamaandumise korral. Seega on liugumiskoefitsient ε oluliseks tunnuseks lennuki võimete hindamisel.

Lennuki tõusu puhul lisandub eelmistele tungidele õhutakistuse suunas mõjuv raskuse komponent $G_1 = G \sin \beta$, mille tasakaalustamiseks peab vastavalt suurenema mootori tõmme F (joon. 40).

26. Lennuki liikumapanek. Lennuki jõuallikaks on m o o t o r. Mootori juures on tähtis, et ta võimsus võrreldes raskusega oleks võimalikult suur. Seda hinnatakse mootori raskuse kilogrammide arvuga, mis tuleb võimsuse 1 HJ kohta. Moodsail lennukeil on see läbisegi 0,5 kG 1 HJ kohta, üksikjuhtudel tunduvalt väiksemgi (kuni 60 G). Seega 20 kG-ne mootor võib anda võimsuse 40 HJ ja enamgi. Selliste mootorite ehitamisel kasutatakse erilisi metallsulameid, mis suure kerguse juures on siiski väga tugevad, nagu duralumiinium.

Mootor paneb liikuma p r o p e l l e r i, mille ristilõikeil on sama kuju kui lennuki kandepinnalgi. Seega propelleri pöörlemisel tekib propelleri ees alarõhk ja taga ülerõhk, millede resultant moodustabki propelleri tõmbe.

Lennuki juhtimine toimub t ü ü r i d e süsteemi abil, mis võimaldavad pöörata lennukit kolme vastastikku risti oleva telje ümber.



Joon. 40. Tasakaal lennuki tõusu puhul.

27. Lennuasjandus Nõukogude Liidus. Nagu teistelgi majandus- ja tööstusaladel on NSVL teinud hiigla-edusamme lennuasjanduse arenemises, tõustes õhulaevastiku poolest esimesele kohale maailmas. Nõukogude lennuasjanduse hiilgavaiks lehekülgedeks on näiteks lendur Gromov'i 12 411 km pikkune lend maabumiseta ja kütteaine täiendamiseta (1934), Nõukogude Liidu sangarite Tškalovi, Baidukovi ja Beljakovi lend „Stalini maršruudi“ järgi (1935): Moskva — Barentsi meri — Franz Josephi maa — Tšeljuskini neem — Petropavlovsk Kamtšatkal — Nikolajevsk Amuuri ääres, kokku maabumiseta 9374 km. Aastal 1937 teostasid Nõukogude Liidu sangarid Gromov, Jumašev ja Danilin lennu Moskvast üle Põhjanaba Kaliforniasse jne. Nõukogude Liidul on kõige pikemad õhuliinid maailmas (üle 120 000 km), nende võrk katab mitte ainult Liidu Euroopa-osa, vaid ulatub ka Kaukaasiasse, Siberisse, Kesk-Aasiasse, Kaug-Idasse. NSV Liidu lennuväe võimsust said Suures Isamaasõjas tunda kõik fašistlikud maad.

Nõukogude lennuasjanduse isaks loetakse kuulsat vene teadlast N. J. Žukovskit (1847—1921), kelle algatusel loodi Aerodünaamiline Instituut Kutšinis, Aerodünaamiline Keskinstituut ja Sõja-lennuasjanduse Akadeemia Moskvas.

II. Molekulaarfüüsika.

Aine ehitus.

Aine kõige väiksemateks osadeks on molekulid ja aatomid. Nad ei asetse aines tihedasti üksteise ligi, otseses kokkupuutumises, vaid **nende vahel on ruumi**. Seda tõendavad mitmesugused nähtused. Nii on gaasid hõlpsasti kokkusurutavad, samuti võime kokku suruda ka vedelikke ning tahkeid kehi, kuigi väiksemal määral. Temperatuuri tõustes keha ruumala suureneb, temperatuuri langedes väheneb. Mõnede vedelike segunemisel ruumala väheneb (1 liiter piiritust 1 liitri veega segatult annab 1,94 liitrit segu).

Molekulide arv kehas on väga suur. Näiteks 1 cm^3 õhku (normaaltingimustes) sisaldab $27 \cdot 10^{18}$ molekuli. Sellest võime hõlpsasti arvutada keskmiselt iga molekuli kohta tuleva ruumala. Olgu see x cm^3. Siis $27 \cdot 10^{18} \cdot x = 1$, millest $x = \frac{1}{27} \cdot 10^{-18} = 3{,}7 \cdot 10^{-20}$ cm^3. Seda ruumala (x) väikese kuubina kujutades võime hõlpsasti arvutada tema serva pikkuse a.
Tõepoolest, $a^3 = 3{,}7 \cdot 10^{-20}$, millest $a = \sqrt[3]{3{,}7 \cdot 10^{-20}} = 3{,}33 \cdot 10^{-7}$ cm.

Vedelikes ja tahketes kehades on molekulid üksteisele tunduvalt lähemal kui gaasides. Nii sisaldab 1 cm^3 vett $3{,}37 \cdot 10^{22}$ molekuli. Eelmisel viisil arvutades leiame, et iga veemolekuli kohta tuleva ruumikuubiku serva pikkus on $1{,}44 \cdot 10^{-8}$ cm. Üldse peame meeles, et molekuli kui ka aatomi **läbimõõdu suurusjärk** on 10^{-8} cm. Nende massi suurusjärk on hoopis väiksem. Nii on 1 vesinikuaatomi mass $1{,}67 \cdot 10^{-24}$ grammi.

Kuigi aatom on kõige väiksem **tervik-ehituskivi**, millest koosneb aine, ei tähenda see sugugi, nagu oleks aatom hoopis jagamatu, mida enam mingisugusteks osadeks lahutada ei saa. Aatom on omaette keeruline süsteem, mis koosneb nn. tuumast ja selle ümber tiirlevatest elektronidest.

29. Kehade agregaatolekud. Kõik füüsilised kehad ehk lihtsalt kehad koosnevad ühest või teisest ainest (vesi, õhk, puu, raud). Aine kõige väiksemad ehituskivid (molekulid, aatomid) on üksteisega seotud tungidega, sest muidu langeks keha nii-öelda koost ära. Molekulide vahel mõjuvad tungid võivad olla väga erinevad. Seetõttu avaldavad kehad ka väga erinevalt vastupanu oma kuju või ruumala muutustele väliste tungide mõjul, sest selliste muutuste puhul peavad muutuma aine kõige väiksemate osakeste vastastikused asendid.

Aluseks võttes kehade suhtumist nende kuju või ruumala muutmisse väliste tungide mõjul (nende vastupanuvõimet sellistele muutustele), eristatakse kehadel kolm esinemisvormi ehk nn. agregaatolekut: tahke, vedel ja gaasiline olek.

Tahked kehad avaldavad üldiselt tugevat vastupanu nii kuju kui ka ruumala muutustele. Mõned neist, nagu kivi, teras, klaas, säilitavad sedavõrd hästi oma kuju ja ruumala, et teatud tingimustes võime koguni mitte arvestada esinevaid väikseimaid muutusi tungide mõjul ja lugeda neid kindlateks kehadeks mehaanika mõttes.

Vedelikud (vesi, piiritus, petrooleum) avaldavad võrdlemisi tugevat vastupanu ruumala muutustele, kuigi suhteliselt vähem kui tahked kehad. Kuju muutustele ei avalda vedelikud mingisugust vastupanu. Nad võtavad alati selle anuma kuju, kuhu nad on paigutatud.

Gaasid (õhk, veeaur) avaldavad võrreldes vedelikkudega suhteliselt nõrka vastupanu ruumala vähendamisele, kuid ruumala suurendamisele ja kuju muutmisele ei avalda nad üldse vastupanu. Gaaside üldiseks omaduseks on l õ p m a t a p a i s u d a ja täita ühtlaselt kogu ruumi, kus nad asetsevad.

Nagu hiljemini näeme, ei ole keha esinemisvormid ehk agregaatolekud (tahke, vedel, gaasiline) seotud üksikute ainetega, vaid olenevalt temperatuurist ja rõhumisest võib i g a a i n e esineda kas tahkes, vedelas või gaasilises olekus (jää, vesi, aur).

30. Molekulaartungid. Kui keha molekulid asetsevad üksteisest küllalt kaugel, näiteks gaasides, siis molekulide vahel puudub märgatav side tungide näol. On aga molekulid kehas üksteisele hästi lähedal, nagu tahketes ja vedelates kehades, siis mõjuvad naabermolekulide vahel nn. **molekulaartungid,** mis püüavad molekule üksteise suhtes teatud kauguses, niiöelda t a s a k a a l u a s e n d i s hoida. Molekulaartungid takistavad ühelt poolt keha molekulide üksteisest eemale viimist, teiselt poolt samuti molekulide üksteisele lähemale toomist. Tähendab, me võime molekulaartungid jagada kahte rühma: t õ m b e- j a t õ u k e t u n g i d e k s. Molekulaartungidest olenebki tahkete ja vedelate kehade omadus säilitada oma ruumala, samuti tahkete kehade omadus säilitada oma kuju. Nii siis on molekulaartungid need, mis raua, klaasi, soola, vee, õli jne. molekule üksteisega seovad ning püüavad säilitada nendevahelisi kaugusi. Gaasi osakeste vahel on väikeste rõhumiste puhul molekulaartungide mõju vaevalt märgatav.

Katkimurtud ja uuesti tugevasti kokkusurutud keha osad ei jää enam kokku. Ainult üksikuil juhtudel (lihvitud klaaspinnad, seatina jt.) on märgata lahutatud osade nõrka kokkujäämist. Sellest näeme, et molekulaartungid mõjuvad aine molekulide vahel ainult siis, kui molekulid on üksteisele hästi lähedal. Molekulide-vahelise kauguse suurenedes vähenevad kiiresti ka molekulaartungid. Piirkonda, milles antud molekul tema ümber olevaile naabermolekulidele veel märgatavat mõju avaldab, nimetatakse *molekulaartungide mõjupiirkonnaks.* Seda võime kujutada sfäärina, mille tsentris asetseb antud molekul ja mille läbimõõdu suurusjärguks on 10^{-6} cm, mis on umbes 100 korda suurem molekuli enda suurusjärgust. Oma loomult on molekulaartungid elektrilise päritoluga.

31. Elastsus. Molekulaartungid püüavad keha osakesi (molekule) üksteise suhtes teatud tasakaaluasendis hoida, s. o. *säilitada keha ruumala või kuju.* Kui aga välised tungid keha sellest tasakaaluasendist välja viivad, näiteks kustutuskummi kõveraks painutamisel või kokkusurumisel, siis sellega muudame keha osakeste vastastikust asendit. Seetõttu tekivad molekulaartungid, mis püüavad kehale ta endist kuju või ruumala tagasi anda, kui välised tungid lakkavad mõjumast. Keha *ruumala või kuju muutmist* väliste tungide mõjul nimetatakse keha *deformatsiooniks.* Meile tuntumad deformatsioonid on kokkusurumine, venitamine, painutamine ja väänamine (keeramine).

Kui keha pärast väliste tungide mõju lakkamist molekulaartungide mõjul oma esialgse ruumala või kuju jälle taastab, siis nimetatakse sellist deformatsiooni *elastseks deformatsiooniks.* Näiteks kui terasvedru või kummipaela pikemaks venitada ja siis lahti lasta, saab ta endise pikkuse jälle tagasi. Kehasid, mis võimaldavad võrdlemisi suurt elastset deformatsiooni, nimetatakse *elastseteks,* näiteks teras, kummi, õhk, puu. Kehasid, mis ei oma elastset deformatsiooni või millede elastne deformatsioon on äärmiselt väike, nimetatakse *plastilisteks,* nagu seatina, savi, vaha.

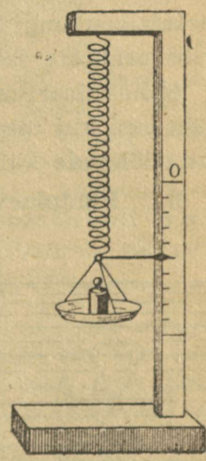
Tuleb silmas pidada, et kehade elastsus *oleneb* suurel määral *rõhumisest ja temperatuurist.* Väga suurte rõhumiste puhul (mitu tuhat at) muutub teras plastiliseks, seatina (plii) aga saab madala temperatuuri juures (vedelas õhus) elastse keha omadused.

Kõige suuremat deformatsiooni, kus molekulaartungid kehale ta esialgse kuju või ruumala veel tagasi annavad, nimetatakse e l a s t s u s e p i i r i k s. Näiteks võib terastraati pikemaks venitada kuni $\frac{1}{400}$-ni tema esialgsest pikkusest. Kui aga deformatsioon ulatub üle elastsuse piiri, siis keha oma esialgset kuju enam tagasi ei saa. Kui deformeerivat tungi veelgi suurendada, siis keha lõpuks katkeb või puruneb. Näiteks 1 mm^2 läbilõikega terastraat katkeb 70-kG koormise puhul.

1. Kui pikk otsast kinnitatud ja vabalt allarippuv seatinatraat katkeb oma raskuse mõjul, kui seatina katkemise pinge on 2 $\frac{kG}{mm^2}$? Vastata samale küsimusele terase kohta, kui terase katkemise pinge on 7000 $\frac{kG}{cm^2}$! Kas oleneb otsitav traadi pikkus nendes ülesannetes traadi läbilõikest?

32. Hooke'i seadus. Seose leidmiseks deformeeriva tungi ja deformatsiooni suuruse vahel teeme järgmise katse.

Võtame osutiga varustatud terasvedru, mille otsas ripub kausike (joon. 41). Märgime osuti asendi skaalal. Nüüd asetame kausile mõne koormise, näiteks 100 G. Vedru venib pikemaks. Märgime skaalalahtril uue asendi. Olgu see endisest näiteks 2,3 cm võrra madalamal. Koormame vedru 200-grammise raskusega, siis on pikenemine 4,6 cm jne. Vedru koormise suurenemisel iga 100 g võrra pikeneb vedru 2,3 cm võrra, muidugi antud vedru elastsuse piires. Sellest järeldame, et vedru pikenemine on võrdeline koormise suurusega.



Joon. 41. Hooke'i seaduse demonstreerimine.

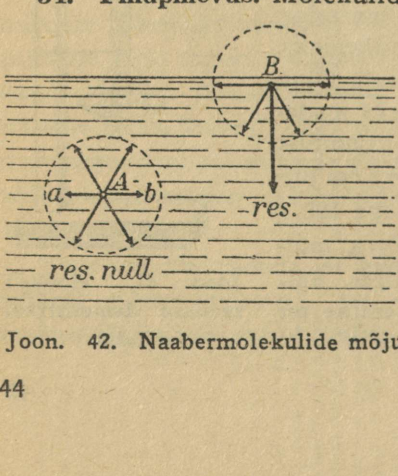
Samalaadne seos on kehtiv kõigi elastsete deformatsioonide kohta, mis ei ületa elastsuse piiri, ja sõnastatakse üldkujul järgmiselt: *elastse deformatsiooni suurus on võrdeline deformeeriva tungiga.* See korrapärasus kannab Hooke'i seaduse nime, sest tema avastajaks oli inglise füüsik *Robert Hooke* (1635—1703).

Molekulaarnähtused vedelikes.

33. Märgamine ja mittemärgamine. Kui puhas klaas vette kasta, saab ta märjaks, samuti raud, puu jt. Me ütleme sel puhul, et *vesi märgab klaasi.* Rasv, steariin, parafiin ei saa vees märjaks, vesi *ei märga* neid, samuti ei märga *elavhõbe klaasi.* Nende nähtuste seletamiseks oletatakse, et märgamise korral on molekulaartungid kahe keha osakeste vahel nende *kokkupuutumise pinnal* suuremad kui sama keha osakeste vahel. Seetõttu jäävadki näiteks veeosakesed klaasi külge. Mittemärgamise korral aga ümberpöördult on sama keha (vee) osakeste vahel mõjuvad molekulaartungid suuremad kui temaga kokkupuutuva teise keha osakeste vahel (vesi ja steariin).

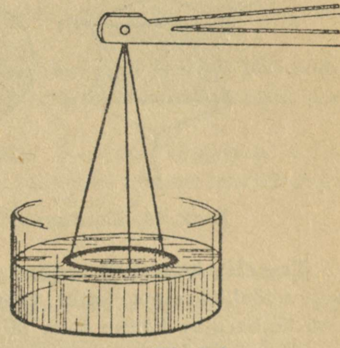
Molekulaartungide mõjuga on seletatavad ka niisugused nähtused kui tolmukübemekeste jäämine peegli külge, suitsu ning lõhnade külgejäämine riietele jne.

34. Pindpinevus. Molekulide vahel mõjuvate tungide toimega on seletatavad vedeliku vaba pinna erisugused omadused. Nagu näha joon. 42, on igale molekulile mõjuvate naabermolekulide toime tasakaalustatud ainult siis, kui molekul asetseb pinnast küllalt kaugel (molekul *A*).



Joon. 42. Naabermolekulide mõju.

Tõepoolest, sel juhul on võimalik leida igale molekulile (*a*) temaga sümmeetriliselt asetatud teist molekuli (*b*), mis esimese toimet tasakaalustab (resultant on null). Pinna läheduses asuvate molekulide (*B*) suhtes on aga ülekaalus nende naabermolekulide toime, mis asetsevad vabale pinnale vastasküljes. Seetõttu molekulaartungide toimel vedeliku vaba pindkile püüab koomale tõmbuda, et võimalikult vähendada vedeliku vaba pinda. Seda vedeliku vaba pindkile omadust koomale tõmbuda, teataval määral sarnaselt pinevile tõmmatud kummikelmega, nimetatakse **pindpinevuseks.**



Joon. 43. Pindpinevuse mõõtmine.

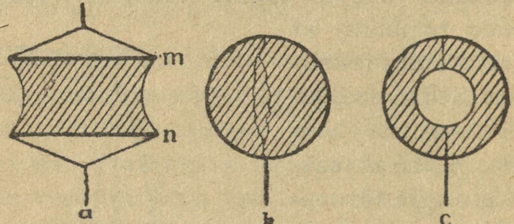
Pindpinevuse suurust σ mõõdetakse tungiga, mis tuleks rakendada cm pikkuselt lahtilõigatud pindkile äärte endiselt kooshoidmiseks. Seda tungi on võimalik otseselt mõõta kaalude abil. Selleks võtame peenikesest traadist rõnga, mille pikkus l cm, ja riputame ta kaalu otsa (joon. 43). Rõnga alla seame anuma vedelikuga, näiteks puhta veega, nõnda et rõngas puutuks veepinda. Nüüd asetame kaalu teisele kausile vihte seni, kuni rõngas enda veepinnast lahti rebib. Siis on vihtide kaal ($p = mg$) võrdne pindkile osakeste vahel mõjuvate molekulaartungide resultandiga ($2l\sigma$; $l\sigma$ tuleb võtta 2 korda sellepärast, et meil on siin tegemist kahe pindkilega, üks seespool, teine väljaspool rõngast).

$$\text{Nii siis } 2l\sigma = mg, \text{ millest } \sigma = \frac{mg}{l} \frac{\text{düün}}{\text{cm}}$$

Sedaviisi võime määrata pindpinevuse suuruse ka teiste vedelikkude kohta. Et pindpinevuse suurus oleneb vedeliku temperatuurist (temperatuuri tõusuga pindpinevus väheneb), siis tuleb koos pindpinevuse suurusega anda ka temperatuur, milles see mõõtmine on toimunud. Nii on vee pindpinevus 20^0 temperatuuris 72,5 $\frac{\text{düün}}{\text{cm}}$, elavhõbedal ($18^0$ juures) 500 $\frac{\text{düün}}{\text{cm}}$, petrooleumil ($20^0$ juures) 24 $\frac{\text{düün}}{\text{cm}}$ ja piiritusel (20^0 juures) 22 $\frac{\text{düün}}{\text{cm}}$.

Pindpinevuse põhjal on võimalik seletada suurt hulka nähtusi.

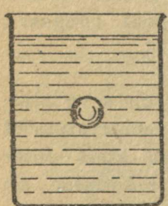
Võtame joon. 44 kujutatud traatide *m* ja *n* vahele seebivee kelme. Püüdes võimalikult kokku tõmbuda, lähevad küljeniidid sissepoole kõveraks ja tõstavad alumise traadi *n* üles. Traate teineteisest eemale tõmmates ja alumist traati vabaks lastes kordub sama nähtus.



Joon. 44. Kontuurid pindpinevuse näitamiseks.

Traadist kontuuril (joon. 44 *b*) on tehtud niidist aas. Kui aasa seest vedelikukelme katki teha (kuuma traadiga läbi pistes), siis veab ümberolev kelme aasa täiesti ümmarguseks, sest ringil on tasapinnalistest kujunditest sama ümbermõõdu (perimeetri) juures kõige suurem pindala.

Seebimullid tõmbuvad seistes kokku. — Väikeses hulgas võetud vedeliku (tilgad) kuju on enam-vähem ümmargune, sest siin ei ole raskuse mõju nii tunduv ja vedelik võtab endale kuju, mis on tingitud ta molekulaartungidest. Pindpinevuse tõttu püüab keha niisugusel juhul endale võtta kõige väiksema pinna. Nagu geomeetriast teame, on keral antud ruumala juures kõige väiksem pindala, seepärast on siis ka vedelik tilkades enam-vähem kerakujuline.


Joon. 45. Õlitilk piirituse ja vee segus.

35. Plateau katse. Kui meil õnnestub kõrvaldada raskuse mõju ja teha vedeliku pinnakuju olenevaks ainult tema molekulaartungidest, siis peab iga vaba vedelik pindpinevuse mõjul võtma kera kuju. Et see tõesti nõnda on, näitab meile Plateau katse (joon. 45). Oliiviõli on piiritusest raskem ja veest kergem, seepärast on võimalik valmistada veest ja piiritusest segu, mille erikaal võrdub õli erikaaluga. Niisuguses segus, nagu teame, on õli igas kohas tasakaalus, sest õli raskustung on Archimedese seaduse põhjal tasakaalustatud segu üleslükkega. Pipetiga sellesse segusse õli juhtides näeme, et õli võtab pindkile kokkutõmbuvuse tõttu kera kuju.

1. Seletada pindpinevuse põhjal nõela, samuti žiletitera ujumist ja putukate kõndimist veepinnal!

2. Kõvale pinnale (laud) langenud veepiisad ei ole nii ümmargused kui pehmele (tolm, tuhk) pinnale langenud piisad. Mispärast?

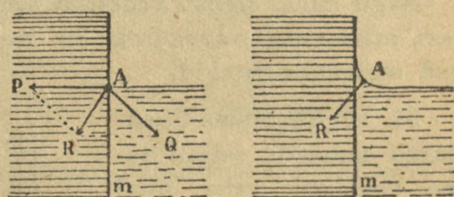
3. Elavhõbeda tilgad on veetilkadest tublisti ümmargusemad. Mispärast?

4. Mispärast peenike veejuga ei püsi pidevana, vaid jaguneb üksikuiks tilkadeks?

5. Seatina-haavlite valmistamisel lastakse sula seatina läbi sellekohase sõela kõrgelt vette langeda. Mispärast saavad haavlid seejuures ümmargused?

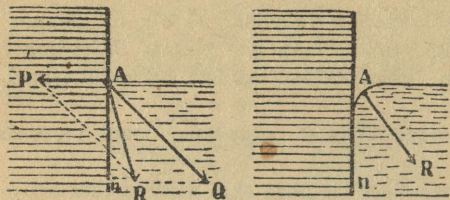
6. Panna veepinnale ujuma 2 tikku 2—3 cm kaugusele teineteisest! Puudutada nende vahel olevat veepinda kuuma traadiotsaga! Tähele panna, mis juhtub ja mispärast!

36. Vedeliku vaba pind anuma seina läheduses. Varemini nägime, et vedeliku vaba pind (nivoo) on alati rõhtne. Kuid see on õige ainult siis, kui jätta arvestamata molekulaartungide mõju pinna kujundamisel. Tõepoolest aga annab anuma seina läheduses molekulaartungide mõju end seevõrra tunda, et vedeliku pind ühes või teises suunas kõveraks muutub.



Joon. 46. Vedeliku pinna tõus anuma seina ääres.

Võtame näiteks vee ja klaasi kokkupuute kohal (joon. 46) väikese veeosakese (A). Olgu vee ja klaasi osakeste vahel mõjuvate tungide resultant P ja vee osakeste vahel vst. Q. Kui antud veeosake on küllalt väike, võime ta raskuse jätta arvestamata. Et vesi märgab klaasi, siis on molekulaartungid klaasi ja vee osakeste vahel suuremad kui molekulaartungid vee osakeste endi vahel. P ja Q resultant R on sel juhul suunatud anuma seina (klaasi) sisse. Vedeliku põhiomadustest teame, et tasakaalu korral peab vedeliku nivoo olema risti vedeliku osakestele mõjuva resultant-tungiga. Selleks siis peab veepind klaasseina ääres muutuma ülespoole nõgusaks, nagu katse seda tõepoolest ka näitab.

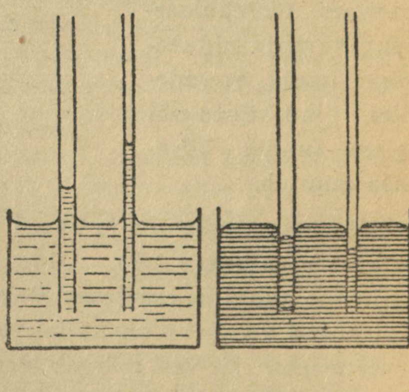


Joon. 47. Vedeliku pinna langemine anuma seina ääres.

Kui vedelik seina ei märga (elavhõbe, klaas), siis on molekulaartungid vedeliku osakeste vahel suuremad kui molekulaartungid klaasi ja vedeliku osakeste vahel. Sel juhul on molekulaartungide ühine resultant *R* suunatud vedeliku sisse (joon. 47). Resultandi *R* tasakaalustamiseks muutub niisugusel korral vedeliku vaba pind seina ääres ülespoole kumeraks.

Nagu näha, oleneb vedeliku pinna kuju seina ääres sellest, missuguses vahekorras on nende osakeste vahel mõjuvad molekulaartungid.

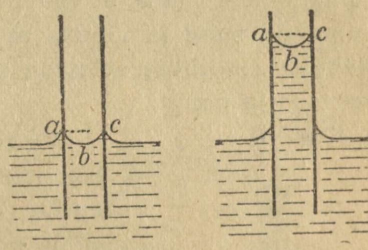
37. Kapillaarsus. Ühendatud anumais seisab sama vedeliku vaba pind ühes rõhtsas tasapinnas. See on õige ainult juhul, kui molekulaartungide mõju raskusega võrreldes on tühine (küllalt suure läbilõikega anumad). Peenikestes jõhv- ehk kapillaartorudes ei või molekulaartungide mõju tähele panemata jätta. Nii näitab kat-


Joon. 48. Vedeliku nivoo kapillaartorudes.

se, et peenikeses torus seisab märgav vedelik (vesi, klaas) kõrgemal, mittemärgav aga madalamal nivoost lahtises anumas (joon. 48). Niisugust nähtust nimetatakse **kapillaarsuseks** ehk **jõhvsuseks** (ladina keeles *capillus*—juus).

Kapillaarsuse nähtusi leiame looduses kui ka igapäevases elus väga sagedasti; nende hulka kuuluvad näiteks: petrooleumi tõusmine lambitahis, mahla tõusmine taimedes, kuivatuspaberi tarvitamine, majaseinte niiskus jne.

Vedeliku tõusu kapillaartorudes võime seletada pindpinevuse abil. Kui vedelik märgab toru seina, siis on vedeliku pind torus (menisk) nõgus (joon. 49, esimene). Pindkile *abc* püüab end võimalikult sirgeks tõmmata ja tõstab molekulaartungide mõjul osa vedelikku enda järele. Vedeliku pinna sirgenedes tõusevad molekulaartungide mõjul pindkile ääred kõrgemale, uuesti tõmbab pindkile endale vedelikku järele jne., niikaua kui vedelikusamba raskus tasakaalustab pindpinevuse mõju. Seletada analoogiliselt mittemärgava vedeliku langemist kapillaartorus!



Joon. 49. Pindkile hoiab ülal vedelikusamba.

Katse kui ka matemaatiline arutlus näitab, et **vedeliku tõusu** (vastavalt langemise) **suurus kapillaartorudes on pöördvõrdeline toru raadiusega ja vedeliku erikaaluga ning võrdeline pindpinevusega.**

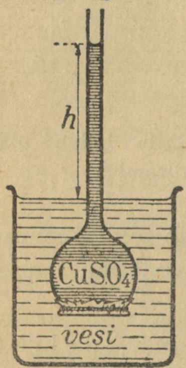
1. Missugune põld kardab rohkem põuda: kas hästiharitud või harimata?

2. Ruumi niiskuse suurendamiseks riputatakse sagedasti käterätid otsapidi vette. Seletada, kuidas see mõjub!

3. Rasvaplekkide kõrvaldamiseks riideist tarvitatakse sagedasti järgmist võtet: kaetakse see koht kuivatuspaberiga ja triigitakse kuuma rauaga. Seletada, kuidas see mõjub!

4. Kas elavhõbe tõuseks mööda lambitahti üles?

38. Difusioon ja osmoos. Vedelikkude difusiooni all mõeldakse kahe vedeliku segunemist nende otsesel kokkupuutumisel. Valame näiteks klaastorru värvitud vett ja vee peale ettevaatlikult värvitud piiritust. (Laia anumat tarvitades on kasulik vesi läbi piirituse lehtriga põhja valada.) Piiritus on veest kergem ja jääb vee peale. Kuid aja jooksul võime tähele panna, et vedelikud nii-öelda iseendast tungivad teineteise sisse ja lõpuks moodustavad täiesti ühtlase segu. Nähtust on lihtne seletada molekulide liikumisega molekulaarteooria põhjal.



Joon. 50.
Osmoos.

Ka tahkete kehade juures on difusiooninähtusi tähele pandud. Kui kullakihile asetada seatinakiht, siis võib mõne aja pärast leida kulda kogu seatinakihi ulatusel.

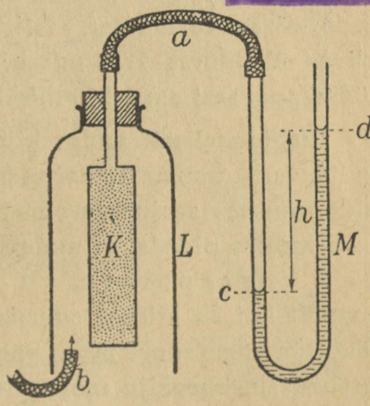
Vedelikkude segunemine toimub mitte ainult nende otsesel kokkupuutumisel, vaid ka siis, kui vedelikud on lahutatud teineteisest poorse vaheseinaga, nagu põiekelme, pärgamentpaber jne. On võimalik valmistada ka sääraseid vaheseinu, mis lasevad läbi ainult lahustaja molekuli, mitte aga lahustatud aine molekuli. Säärast vaheseina (membraani) nimetatakse poolläbilaskvaks (semipermeaabliks) vaheseinaks. Kui anumasse veega (joon. 5o) on asetatud säärane poolläbilaskva põhjaga varustatud nõu, milles on $CuSO_4$-lahus, siis tungib sellesse välisest anumast lahustaja (vesi), lahjendades lahust, kuni vedeliku sammas selles tõuseb teatavale kõrgusele. Lahustaja tungimist lahusesse läbi poolläbilaskva membraani nimetatakse osmoosiks. Sellest tingitud rõhku, mida võime arvutada vedelikusamba kõrguse (h) alusel, nimetatakse osmootseks rõhuks.

1. Tuua näiteid osmoosi kohta looduses!

2. Kuidas tarvitatakse kuivatatud marju, näiteks sõstraid, tee asemel?

Molekulaarnähtused gaasides.

39. Gaaside difusioon. Lõhnade levimisest järeldame, et gaasid segunevad kergesti. Gaaside segunemine ehk difusioon toimub mitte üksnes nende otsesel kokkupuutumisel, vaid ka läbi poorse vaheseina, mis selgub joonisel 51 kujutatud katsest.



Joon. 51. Gaaside difusioon.

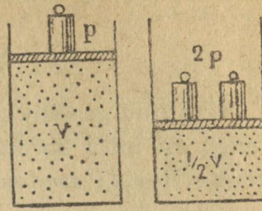
Poorne (urbne) anum K on ühendatud kummitoru a abil vesimanomeetriga M. Anum K on asetatud anumasse L. Õhk tungib vabalt läbi seina pooride anumasse K ja tasakaalustab rõhumise manomeetri vabale otsale. Kui aga juhtida anuma L alla toru b kaudu mõnd kergemat gaasi, näiteks valgustusgaasi, siis tõuseb manomeetri harus d vesi otsekohe kõrgemale. Sellest järeldame, et valgustusgaasi molekulid tungivad kiiresti anumasse K, suurendades selles rõhumist. Võtame anuma K anumast L välja, siis tekib vastupidine nähtus: vesi manomeetris tõuseb torus c kõrgemale kui torus d, millest järeldame, et gaasi rõhumine anumas K on väiksem rõhumisest vabas õhus. Rõhumise vähenemine võis tekkida selle tõttu, et valgustusgaasi molekulid liiguvad kiiremini kui õhu molekulid ja seepärast tuleb anumast K valgustusgaasi molekule rohkem välja kui õhu omi sisse.

Katse ja matemaatiline arutlus näitavad, et gaasimolekulide liikumise kiirus sõltub üldse gaasi ainest ja temperatuurist ning suureneb viimase tõusmisega.

40. Gaaside kineetiline teooria. Tahkete, vedelate ja gaasiliste kehadega seotud nähtuste tundmaõppimisel oleme sageli kasutanud kujutlust, et kõik kehad koosnevad väikestest osakestest — aatomitest ja molekulidest, mis on alalises liikumises. Tahkete ja vedelate kehade puhul on see liikumine piiratud ulatusega, sest siin on molekulid väga tihedasti koos ja nende vahel mõjuvad molekulaartungid, mis seovad molekule üksteisega. Gaasides aga nende väikese tiheduse tõttu on molekulide liikumise vabadus ja ühtlasi liikumise kiirus õige suur, nagu seda näiteks võime järeldada lõhnade kiirest levimisest. Nii on vesiniku molekuli keskmine kiirus 0° juures 1700 m/sek, hapniku molekulil 425 m/sek, süsihappegaasi omal 360 m/sek jne.

Sirgjooneliselt suure kiirusega liikudes põrkavad molekulid vastu anuma seina, seda rõhudes, või vastu teisi molekule, muutes seejuures oma liikumise suunda. Tuleb kindlasti meeles pidada, et molekulide liikumine on kaootiline, korrapäratu ja korraldamatu nii oma suunalt kui ka kiiruse suuruselt. Seepärast, arvestades molekulide väga suurt arvu, võime öelda, et igas suunas liigub keskmiselt ühepalju molekule ja ühesuguse keskmise kiirusega. Neist põhikujutlusist lähtudes on võimalik matemaatiliselt tuletada kõiki gaaside omadusi, nagu rõhumist, kiirust jt. Seda tehakse füüsika osas, mis kannab gaaside kineetilise teooria nime.

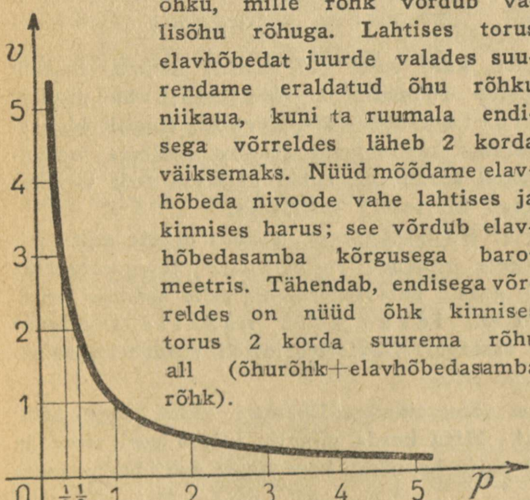
41. Boyle-Mariotte'i seadus. Kujutluse põhjal, et gaas koosneb kiiresti liikuvaist molekulidest, on gaasi rõhumine molekulide alalise „pommitamise“ (põrgete) tulemus. Sellest järeldub, et ruumala vähenedes näiteks 2 korda molekulide poolt anuma seina „pommitamine“ (põrgete arv) läheb 2 korda sagedamaks, s. o. rõhk suureneb 2 korda (joon. 52).



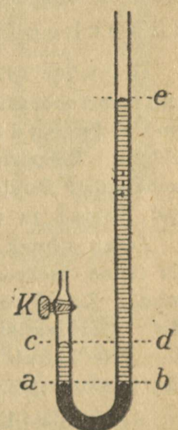
Joon. 52. Gaasi ruumala vähenemine rõhumise suurenedes.

Täpsema sõltuvuse antud gaasihulga ruumala ja talle vastava rõhu vahel avastas kõige esiti iirlane R o b e r t B o y l e (1627—1691).

Kõverasse torru, kui kraan *K* on lahti, valame elavhõbedat kuni nivooni *ab* (joon. 53). Keerame kraani kinni, seega eraldame torus *aK* teatava hulga õhku, mille rõhk võrdub välisõhu rõhuga. Lahtises torus elavhõbedat juurde valades suurendame eraldatud õhu rõhku niikaua, kuni ta ruumala endisega võrreldes läheb 2 korda väiksemaks. Nüüd mõõdame elavhõbeda nivoode vahe lahtises ja kinnises harus; see võrdub elavhõbedasamba kõrgusega baromeetris. Tähendab, endisega võrreldes on nüüd õhk kinnises torus 2 korda suurema rõhu all (õhurõhk+elavhõbedasamba rõhk).



Joon. 54. Gaasi ruumala sõltuvus rõhumisest.



Joon. 53. Boyle'i katse.

Et gaasi ruumala oleneb ka temperatuurist, tuleb kogu katse jooksul temperatuur jätta muutumatuks.

Rõhu (p) suurust muutes ja vastavaid ruumala (v) suurusi mõõtes leidis R. Boyle nende kahe suuruse vahel järgmise seose:

J ä ä v a s t e m p e r a t u u r i s o n a n t u d g a a s i h u l g a r õ h k (p) p ö ö r d v õ r d e l i n e r u u m a l a g a (v), s. o.

$$p : p_1 = v_1 : v \text{ ehk } pv = p_1 v_1 = \text{const.}$$

Et antud gaasihulga ruumala vähendamisel ta tihedus suureneb nii mitu korda, kui mitu korda väheneb ruumala, siis võime Boyle'i seaduse väljendada ka järgmiselt:

J ä ä v a s t e m p e r a t u u r i s o n a n t u d g a a s i h u l g a t i h e d u s v õ r d e l i n e r õ h u g a.

Boyle-Mariotte'i seadust võime kujutada graafikuga (joon. 54), kus rõhtteljel on märgitud p, püstteljel aga vastavad v väärtused. Saadud kõver kannab v õ r d h a a r s e h ü p e r b o o l i nime.

Boyle'ist täiesti lahus, kuid veidi (17 aastat) hiljem, avastas sama korrapärasuse gaaside ruumala ja rõhu vahel ka prantslane E d m o n d e M a r i o t t e (1620—1684), kes oli ametilt kloostriülem. Seepärast nimetame käsiteldavat seadust mõlema teadusmehe auks Boyle-Mariotte'i seaduseks, ehkki inglased seda nimetavad Boyle'i ja prantslased Mariotte'i seaduseks.

Tuleb silmas pidada, et Boyle-Mariotte'i seadus ei ole mitte päris täpne, iseäranis kõrgete rõhkude ja madalate temperatuuride puhul. Ka ei käitu kõik gaasid ühteviisi täpselt selle seaduse kohaselt. Võrdlemisi lähedal nn. i d e a a l s e l e g a a s i l e, s. o. gaasile, mis käitub täiesti vastavalt Boyle-Mariotte'i seadusele, seisavad heelium ja vesinik.

1. Leida ligikaudne õhu tihedus Everesti tipul, kus rõhk on ainult umbes 25 cm! Mitu korda minutis tuleks seal sisse ja välja hingata, et niisama palju hapnikku kopsudesse juhtida kui maapinnal?

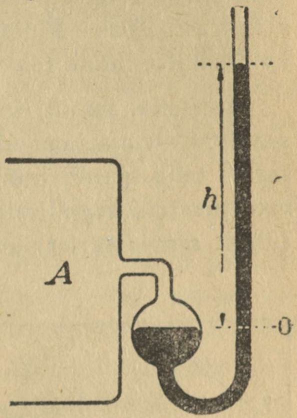
2. Missuguse rõhu puhul oleks õhu tihedus vee (raua, seatina) omaga ühesugune?

3. Määrata graafiku abil (joon. 54) 2,6 g õhu ruumala 4 Atm rõhu korral!

4. Manomeeter näitab, et õhupumba kupli alla järelejäänud õhu rõhk on 2 cm. Leida selle õhu tihedus ja kaal, kui kupli ruumala on 3 l!

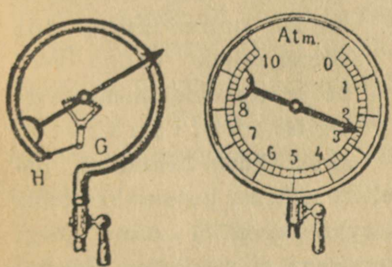
5. Tsepeliin, mille kere mahutavus on 100 000 m³, lendab 500 m kõrgusel, kus rõhk on 717 mm ja temp. 0°. Kui gaasisalved on täidetud vesinikuga, kui palju jääb õhu üleslükkest üle tsepeliini oma kui ka reisijate raskuse tasakaalustamiseks?

42. Manomeetrid. Manomeetreid tarvitatakse gaaside ja auru rõhu määramiseks. Lihtsaim neist on lahtiste otstega kõver toru veega ehk nn. vesimanomeeter, nagu me seda tunneme katsetest rõhu suuruse määramisel vedeliku sees. Kui tahame selle abil määrata näiteks valgustusgaasi rõhku linna võrgus, siis ühendame toru ühe haru gaasitoruga ja vaatame, kui palju tõuseb vesi teises (lahtises) harus kõrgemale. Olgu vee nivoode vahe *h* cm, siis võrdub valgustusgaasi rõhk õhurõhuga pluss *h* cm kõrguse veesamba rõhk.



Joon. 55. Lahtine elavhõbe-manomeeter.

Suuremate rõhkude mõõtmisel on kasulik tarvitada lahtises manomeetris vee, petrooleumi jne. asemel raskemat vedelikku, nimelt elavhõbedat. Ka tehakse siis harilikult toru ühe haru asemel jämedam reservuaar, et 0-punkt jääks ligikaudu muutumatuks. Elavhõbe-manomeeter on nii-öelda normaal-manomeeter, millega võrreldakse teisi manomeetreid.

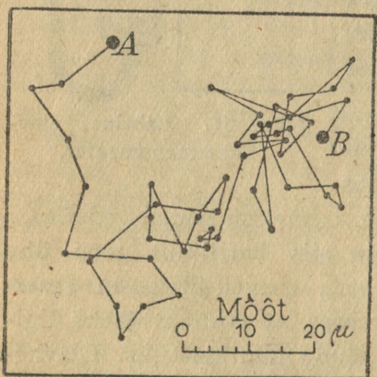


Joon. 56. Metall-manomeeter.

Tööstuses tarvitatakse harilikult metall-manomeetreid (joon. 56). Nende ehitamine põhineb õhukeste seintega kõverakskäänatud metalltorukeste omadusel oma kuju korrapäraselt muuta (deformeeruda), kui muutub rõhk nende sees. Rõhu suurenedes läheb toru veidi sirgemaks, sest toru välispind on sisepinnast suurem ja seetõttu välispinnale mõjuv rõhu kogutung suurem kui sisepinnale; rõhu vähenedes tekib vastupidine nähtus. Kangikeste abil tehakse toru otsa nihkumised nähtavaks osuti liikumiseks astmikul. Muidugi toimetatakse metall-manomeetri kaliibrimist mõne teise, nn. normaal-manomeetri abil.

Masinate, samuti inimestegi töö toimub Maa õhkkonnas, seetõttu on masinad alati 1-atmosfäärilise rõhu all. Et tööd saame teha ainult r õ h k u d e v a h e arvel, siis näitavad manomeetrid tegelikult nn. ü l e r õ h k u, s. o. õhurõhust (ühest atmosfäärist) suuremat rõhku.

43. Browni liikumine. Lisandame vette mõnd lahustumatut peenikest pulbrit, näiteks hiina tušši, sest see koosneb õige peenikesest söetolmust. Nüüd asetame tilga seda vedelikku mikroskoobi alus- ja katteklaasi vahele ning vaatleme teda mõnesajakordse suurendusega. Siis võime tähele panna vees hõljuvate söekübemekeste alalist k o r r a p ä r a t u t sinna-tänna liikumist, nagu see on kujutatud joon. 57. Sellist nähtust kutsutakse tema avastaja (inglise botaanik Brown, a. 1827) nime järgi B r o w n i l i i k u m i s e k s. Kaua aega ei suudetud Browni liikumisele õiget seletust anda. Alles molekulide liikumise



Joon. 57. Browni liikumine.

põhjal saab see huvitav nähtus meile täiesti mõistetavaks. Iga keha, antud juhul vee molekulid, on alalises kiires liikumises. Vees hõljuvad söekübemekesed saavad ümberolevatelt veemolekulidelt iga hetk hulga tõukeid ja nad hakkavad liikuma nende tõugete r e s u l t a n d i s u u n a s. Et aga igal järgmisel hetkel uute tõugete mõjul muutub tõugete r e s u l t a n d i s u u n d, siis seetõttu peab muutuma ka hõljuva kübemekese liikumise suund. Seega on korrapäratus Browni liikumises tingitud vedeliku molekulide liikumise korrapäratusest. Ühes sellega on B r o w n i l i i k u m i n e m o l e k u l i d e k o r r a p ä r a t u l i i k u m i s e o t s e s e k s t õ e s t u s e k s.

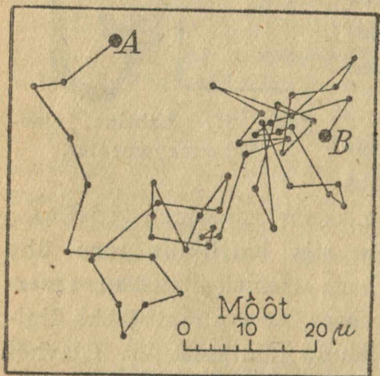
44. Aine kineetiline teooria. Eespool nägime, et gaaside difusioon ja rõhumine seletuvad hõlpsasti, kui kujutleme gaase koosnevana väikestest korrapäratult kiiresti liikuvatest osakestest, molekulidest. Browni liikumise nähtus tõestab meile sama kujutluse rakendamist vedelike kohta. Ainult vedelike osakesed on väga tihedasti koos, seega kokkupõrked sagedamad ja molekulide vaba liikumise tee palju lühem kui gaaside puhul.

Mitmesugused katsed tõendavad molekulide liikumist ka tahketes kehades. Võtame näiteks hästilihvitud tasaste pindadega tsingi- ja vasetüki ning surume nad teineteise vastu. Mõne aja pärast võime tähele panna, et vase molekulid on tunginud tsingisse ja ümberpöördult. Selline tahkete kehade difusioon tõestab ilmselt molekulide liikumist ka tahketes kehades, olgugi tunduvalt vähemal määral kui vedelikes ja gaasides.

Nii võime üldiselt väita, et mitte üksi gaasid, vaid ka vedelikud ja tahked kehad koosnevad väikestest osakestest, molekulidest, mis on alalises korrapäratus liikumises. Sel-põhineb õhukeste seintega kõverakskäänatud metalltorukeste omadusel oma kuju korrapäraselt muuta (deformeeruda), kui muutub rõhk nende sees. Rõhu suurenedes läheb toru veidi sirgemaks, sest toru välispind on sisepinnast suurem ja seetõttu välispinnale mõjuv rõhu kogutung suurem kui sisepinnale; rõhu vähenedes tekib vastupidine nähtus. Kangikeste abil tehakse toru otsa nihkumised nähtavaks osuti liikumiseks astmikul. Muidugi toimetatakse metall-manomeetri kaliibrimist mõne teise, nn. normaal-manomeetri abil.

Masinate, samuti inimestegi töö toimub Maa õhkkonnas, seetõttu on masinad alati 1-atmosfäärilise rõhu all. Et tööd saame teha ainult r õ h k u d e v a h e arvel, siis näitavad manomeetrid tegelikult nn. ü l e r õ h k u, s. o. õhurõhust (ühest atmosfäärist) suuremat rõhku.

43. Browni liikumine.



Joon. 57. Browni liikumine.

Lisandame vette mõnd lahustumatut peenikest pulbrit, näiteks hiina tušši, sest see koosneb õige peenikesest söetolmust. Nüüd asetame tilga seda vedelikku mikroskoobi alus- ja katteklaasi vahele ning vaatleme teda mõnesajakordse suurendusega. Siis võime tähele panna vees hõljuvate söekübemekeste alalist k o r r a p ä r a t u t sinna-tänna liikumist, nagu see on kujutatud joon. 57. Sellist nähtust kutsutakse tema avastaja (inglise botaanik Brown, a. 1827) nime järgi B r o w n i l i i k u m i s e k s. Kaua aega ei suudetud Browni liikumisele õiget seletust anda. Alles molekulide liikumise põhjal saab see huvitav nähtus meile täiesti mõistetavaks. Iga keha, antud juhul vee molekulid, on alalises kiires liikumises. Vees hõljuvad söekübemekesed saavad ümberolevatelt veemolekulidelt iga hetk hulga tõukeid ja nad hakkavad liikuma nende tõugete r e s u l t a n d i s u u n a s. Et aga igal järgmisel hetkel uute tõugete mõjul muutub tõugete r e s u l t a n d i s u u n d, siis seetõttu peab muutuma ka hõljuva kübemekese liikumise suund. Seega on korrapäratus Browni liikumises tingitud vedeliku molekulide liikumise korrapäratusest. Ühes sellega on B r o w n i l i i k u m i n e m o l e k u l i d e k o r r a p ä r a t u l i i k u m i s e o t s e s e k s t õ e s t u s e k s.

44. Aine kineetiline teooria. Eespool nägime, et gaaside difusioon ja rõhumine seletuvad hõlpsasti, kui kujutleme gaase koosnevana väikestest korrapäratult kiiresti liikuvatest osakestest, molekulidest. Browni liikumise nähtus tõestab meile sama kujutluse rakendamist vedelike kohta. Ainult vedelike osakesed on väga tihedasti koos, seega kokkupõrked sagedamad ja molekulide vaba liikumise tee palju lühem kui gaaside puhul.

Mitmesugused katsed tõendavad molekulide liikumist ka tahketes kehades. Võtame näiteks hästilihvitud tasaste pindadega tsingi- ja vasetüki ning surume nad teineteise vastu. Mõne aja pärast võime tähele panna, et vase molekulid on tunginud tsingisse ja ümberpöördult. Selline tahkete kehade difusioon tõestab ilmselt molekulide liikumist ka tahketes kehades, olgugi tunduvalt vähemal määral kui vedelikes ja gaasides.

Nii võime üldiselt väita, et mitte üksi gaasid, vaid ka vedelikud ja tahked kehad koosnevad väikestest osakestest, molekulidest, mis on alalises korrapäratus liikumises. Selline põhikujutlus võimaldab meile seletada terve rea aine omadusi, nagu rõhk, difusioon, temperatuur jt. Õpetus aine omadustest, lähtudes aine osakeste liikumisest, kannab aine kineetilise teooria nime. Ainult gaaside kohta rakendatuna — kõneleme gaaside kineetilisest teooriast.

Soojusnähtusi aine osakeste liikumisena, kuigi mitte kaasaegsel kujul, seletas esmakordselt geniaalne vene loodusteadlane Mihhail Vassiljevitš Lomonossov (1711—1765).

III. Soojus.

Tahkete kehade paisumine soojenemisel.

45. Soojus kineetilise teooria põhjal. Kineetilise teooria põhjal oleneb keha soojuse aste ehk temperatuur keha molekulide liikumisenergia hulgast. Molekulide liikumise kiiruse, ühes sellega liikumisenergia hulga suurenemisega keha temperatuur tõuseb.

Molekulide liikumisenergia võib esineda kolmel kujul: kogu molekuli edasiliikumise energiana ehk hoona $\left(\frac{mv^2}{2}\right)$, pöörlemis- ja võnkumisenergiana.

Gaasides on mittesuurte rõhkude puhul molekulide-vahelised kaugused suhteliselt suured. Seetõttu gaasimolekulide energia esineb peamiselt nende edasiliikumise hoo näol. Kogu soojuse juurdevool gaasis muutub molekulide kiiruse, seega hoo ehk kineetilise energia suurenemiseks.

Vedelikus on vabalt liikuvad molekulid tihedasti koos ning seetõttu molekulaartungide mõju märgatav. Siin lisandub molekulide edasiliikumise energiale veel tunduval määral nende pöörlemise energiat.

Tahketes (kristalsetes) kehades on molekulide pealiikumisvormiks võnkliikumine teatud tasakaaluasendi ümber. Temperatuuri tõusuga hakkavad molekulid kiiremini või laiemalt võnkuma, s. o. suurenevad nende võnkumise sagedus ja amplituud ning ühes sellega ka liikumisenergia hulk.

Iga liikuv keha võib tööd teha, temas on energiat. Soojus on keha molekulide liikumisenergia, tähendab, ka soojus võib tööd teha, nagu me seda teamegi aurumasinast. Samuti ümberpöördult, liikumisenergiat on võimalik muuta soojuseks, näiteks hõõrdumisel.

1. Missugustel nähtustel põhineb temperatuuri mõõtmine?
2. Missugused termomeetri skaalad on meil tarvitusel ja kuidas nad on saadud?
3. Kuidas arvutame temperatuuri ühest skaalast teise?

46. Paisumisest üldse. Igapäevase elu tähelepanekuist teame, et kõigil kehadel, olgu nad tahked, vedelad või gaasid, on ühine omadus — soojenemisel paisuda, jahtumisel aga kokku tõmbuda.

Tuua näiteid kehade paisumise kohta!

Kehade paisumise lähemal tundmaõppimisel tehakse vahet piki- ehk joon-, pind- ja ruumpaisumise vahel.

Tahketel kehadel võime tähele panna kõiki kolme paisumisliiki, kuna vedelikkude ja gaaside puhul võib kõnelda ainult ruumpaisumisest.

Kineetilise teooria põhjal hakkavad keha molekulid temperatuuri tõusmisel liikuma suurema kiiruse ja amplituudiga, tarvitades selleks ka loomulikult rohkem ruumi, mille tagajärjeks ongi keha üldine paisumine.

47. Tahkete kehade joonpaisumise koefitsient. Katsed näitavad, et kõik kehad ei paisu temperatuuri tõusmisel ühteviisi. Kõige suuremal määral paisuvad gaasid, siis vedelikud ja kõige vähem tahked kehad. Kuid ka tahked kehad on väga erisuguse paisumisega. On leiutatud koguni sulameid (terasnikkel ehk invar), kus paisumist peaaegu üldse pole märgata.

Nagu hiljem selgub (§ 49), on võimalik kehade pind- ja ruumpaisumist arvutada joonpaisumise põhjal, seepärast on küllalt, kui tahketel kehadel katseliselt määrata ainult joonpaisumise suurus.

Katse näitab, et keha sama kraadide arvu võrra soojendamisel pikeneb ligikaudu niisama palju, olenemata sellest, missugusest temperatuurist soojendamine algas.

Nii näiteks pikeneb 10 meetri pikkune raudvarb temperatuuri tõusmisel iga 10^0 võrra (10^0—20^0, 50^0—60^0 jne.) 1,2 millimeetrit. Seega keha pikenemine on võrdeline temperatuuri juurdekasvuga.

Keha pikenemise suurus oleneb keha esialgsest pikkusest, temperatuuri juurdekasvust ja ainest. Antud aine joonpaisumise iseloomustamiseks on tarvitusele võetud nn. joonpaisumise koefitsient. Aine joonpaisumise koefitsiendiks (β) nimetatakse arvu, mis näitab, kui suure osa oma pikkusest (0^0 juures) pikeneb sellest ainest keha soojendamisel 1^0 võrra.

Kui näiteks vase joonpaisumise koefitsient on 0,000017, siis pikeneb vaskvarb, mille pikkus 0^0 juures on 1 m, temperatuuri tõusmisel ühe kraadi võrra 0,000017 m, 1 cm pikkune varb vastavalt 0,000017 cm, jne.

Üldjuhul võime joonpaisumise koefitsiendi väljendada järgmiselt:

$$\beta = \frac{l_t - l_0}{t\, l_0},$$

kus l_0 on keha pikkus 0^0 juures ja l_t sama keha pikkus t^0 juures.

Lahendame selle valemi kui võrrandi l_t suhtes:

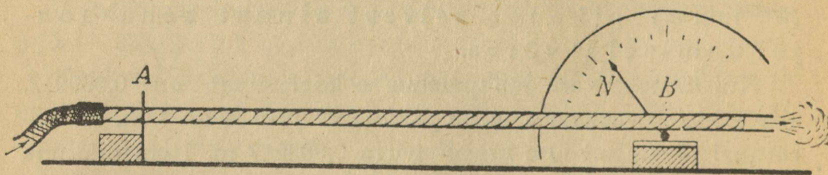
$$\beta t l_0 = l_t - l_0, \text{ millest } l_t = l_0 + \beta t l_0 = l_0\,(1 + \beta t).$$

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

Täpsed mõõtmised näitavad, et kehade pikenemine soojendamisel 1° võrra ei ole mitte igas temperatuuris ühesugune. Et aga kitsamas temperatuuride vahemikus (0°—100°) on vahed väga väikesed, siis võime lihtsuse otstarbel joonpaisumise koefitsiendi määramisel tegelikult mitte arvestada esialgset temperatuuri, millest paisumine algas. See õigustab meid lihtsuse otstarbel defineerima joonpaisumise koefitsienti kui arvu, mis näitab, kui suure osa oma pikkusest paisub mingist ainest keha soojendamisel 1° võrra.

Tabeleis antakse harilikult keskmised joonpaisumise koefitsiendid, mis on õiged kitsamas temperatuuride vahemikus (0°—100°).

48. Joonpaisumise koefitsiendi määramine. Teeme joonpaisumise koefitsiendi määramiseks järgmise katse (joon. 58). Olgu valgevasest toru kinnitatud otsast *A* alusele, ots *B* aga lasub vabalt peenikesel metallvardal (sukavarras, nõel), mille külge on kinnitatud osuti *N* (õlekõrreke). Et soojuse kaotus oleks väiksem, on toru vildiga ümber mähitud. Soojendamise mõjul pikenedes paneb toru



Joon. 58. Joonpaisumise koefitsiendi määramine.

varda veerema (soovitav teha varda alus klaasist) ja osuti pöördub paremale poole. Osuti pöördumisnurga (φ) ja varda raadiuse (r) põhjal on võimalik arvutada toru pikenemist. Kui osuti pöördub nurga φ^0 võrra, siis nihkub toru ja varda puutumispunkt edasi kaare $\frac{2\pi r\varphi}{360}$ võrra, niisama palju nihkub edasi ka varda tsenter, järelikult võrdub toru *AB* kogu pikenemise kahekordse toru ja varda puutepunkti edasinihkumise suurusega, s. o. $2 \cdot \frac{2\pi r\varphi}{360}$ ehk $\frac{\pi r\varphi}{90}$.

Olgu toru esialgne temperatuur $t_1 = 15{,}7°$ (selle mõõtmiseks tuleb termomeeter tükiks ajaks torru panna) ja pikkus $AB = l_1 = 105$ cm. Kui keeva vee auru torust läbi lasta, tõuseb toru temperatuur ja osuti hakkab kiiresti pöörduma paremale poole. Olgu toru lõpptemperatuur $t_2 = 99{,}2^0$, varda diameeter $2r = 1{,}5$ mm ja osuti pöördumisnurk $\varphi = 64^0$. Neist andmeist arvutame valgevase joonpaisumise koefitsiendi β järgmiselt: definitsiooni põhjal on

$$\beta = \frac{\text{pikkuse juurdekasv}}{\text{temperatuuri juurdekasv} \cdot \text{algpikkus}}$$

ehk, tähistades lõpp-pikkuse l_2-ga, lühidalt

$$\beta = \frac{l_2 - l_1}{(t_2 - t_1)\, l_1} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (1).$$

Pikkuse juurdekasv $l_2 - l_1 = \frac{\pi r \varphi}{90}\,\text{mm} = \frac{\pi r \varphi}{90 \cdot 10}\,\text{cm} = \frac{\pi \cdot 1{,}5 \cdot 64}{90 \cdot 10 \cdot 2}\,\text{cm}$

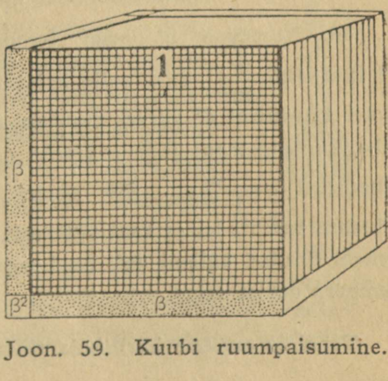
ja $\beta = \frac{\pi \cdot 1{,}5 \cdot 64}{90 \cdot 10 \cdot 2 \cdot (99{,}2 - 15{,}7)\, 105} = 0{,}000019.$

Veereva varda võtte asemel võib määrata toru *AB* pikenemist soojendamisel ka otsese mõõtmise abil mikromeetriga. Selleks tuleb toru *AB* külge liikuvas otsas kinnitada ristliistuke, teine samasugune ristliistuke alusele. Toru pikenemisel muutub vahe ristliistude vahel, mida mõõdetakse otseselt mikromeetriga.

1. Kui palju (μ) suureneb kuldsõrmuse avaus soojendamisel 30^0 võrra, kui sõrmuse läbimõõt on 2 cm?

2. Kui suur on plaatina joonpaisumise koefitsient, kui 10 m pikkune plaatinast varb soojenedes 0^0-st 100^0-ni pikeneb 9 mm võrra?

49. Ruumpaisumise koefitsient. Soojendamisel paisub keha igas suunas, järelikult suurenevad vastavalt kõik keha mõõdud, sellega siis ka ruumala. K e h a r u u m p a i s u m i s e k o e f i t s i e n d i k s (α) n i m e t a t a k s e a r v u, m i s n ä i t a b, k u i s u u r e o s a o m a r u u m a l a s t (0^0 j u u r e s) s a a b k e h a j u u r d e s o o j e n d a m i s e l 1^0 v õ r r a.



Joon. 59. Kuubi ruumpaisumine.

Analoogiliselt joonpaisumisega võime ruumpaisumise koefitsiendi α väljendada üldjuhul järgmiselt:

$$\alpha = \frac{v_t - v_0}{t\, v_0},$$

kus v_0 on keha ruumala 0^0 juures ja v_t sama keha ruumala t^0 juures. Sellest valemist saame:

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

Olgu kuubi serva pikkus (joon. 59) 1 m; soojendamisel 1^0 võrra muutub serv $(1 + \beta)$ m pikaks ja kuubi ruumala suureneb seejuures $(1 + \beta)^3 - 1$, s. o. $1 + 3\beta + 3\beta^2 + \beta^3 - 1$ ehk $(3\beta + 3\beta^2 + \beta^3)$ m^3 võrra. Et $3\beta^2$ ja β^3 on oma suuruselt väga väikesed, võime kuupmeetri ruumala suurenemisel tegelikult arvestada ainult 3β, mis näitabki, kui suure osa oma ruumalast saab kuupmeeter juurde soojendamisel 1^0 võrra. Tähendab, ruumpaisumise koefitsient $a = 3\beta$.

Samalaadselt võime tõestada, et keha pindpaisumise koefitsient võrdub kahekordse joonpaisumise koefitsiendiga.

Et pind- ja ruumpaisumise koefitsiendid väljenduvad kergesti joonpaisumise koefitsiendi abil, siis antakse tabeleis tahkete kehade jaoks ainult joonpaisumise koefitsiendid.

50. Tiheduse olenevus temperatuurist. Olgu keha tihedus 0^0 juures $d_0 \frac{g}{cm^3}$, s. o. selle keha 1 cm^3 mass on d_0 g. Temperatuuri tõusmisel t^0 võrra muutub iga cm^3 $(1 + \alpha t)$ kuupsentimeetriks, kuna ta mass jääb endiseks (d_0). Seega on siis t^0 juures keha tihedus $d_t = \frac{d_0}{1 + \alpha t}$. Siit näeme, et temperatuuri tõusmisel keha tihedus, samuti ka erikaal väheneb, temperatuuri langemisel aga suureneb. Saadud valemi abil on kerge tihedust ümber arvutada ühest temperatuurist teise.

Tabeleis antakse harilikult tihedus 0^0 juures.

Joonpaisumise koefitsiendid.

Alumiinium . .	0,0000244	Marmor	0,0000117
Hõbe	195	Nikkel	151
Inglistina . . .	225	Plaatina	092
Jää	507	Raud	111
Klaas	091	Seatina	293
Kuld	143	Tsink	292
Kuusepuu: pikuti	037	Valgevask . . .	198
„ risti	584	Vask	171

1. Kui palju paisub (mm^3) soojenedes 300° võrra raudkuup, mille serva pikkus on 5 cm?

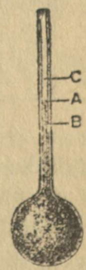
2. Keedupudeli ruumala 15° juures on 500 cm^3. Leida selle keedupudeli ruumala 0° juures!

3. Raudplekist anuma mahutavus 10° juures on just 5 liitrit. Kui suur on sama anuma mahutavus 30° juures?

4. Metallvarva pikkus 100° juures on 6 m ja 200° juures 6,01 m. Leida selle varva ruumala 0° juures, kui ta ruumala 130° juures on 500 cm^3!

Vedelikkude paisumine.

51. **Vedelikkude tõeline ja näiv paisumine.** Vedelikel puudub kindel kuju, seepärast võime vedelikkude puhul kõnelda ainult ruumpaisumisest. Olgu peenikese toruga varustatud anum täidetud vedelikuga kriipsuni *A* (joon. 60). Oletame, et soojendame esiti ainult anumat, ilma et soojus edasi anduks vedelikule. Soojendamise mõjul paisub anum, ta mahutavus suureneb ja vedelik langeb kriipsuni *B*. Toru ruumala *AB* mõõdab anuma mahutavuse juurdekasvu. Nüüd oletame, et ka vedelik soojeneb anuma temperatuurini. Seetõttu tõuseb vedelik torus kriipsuni *C* (vedelik paisub rohkem kui tahke keha). Toru ruumala *BC* mõõdab vedeliku ruumala juurdekasvu. Tõepoolest toimub anuma kui ka vedeliku paisumine enam-

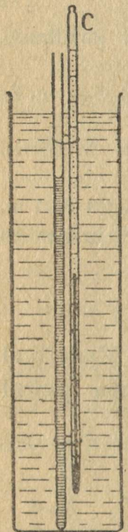


Joon. 60. Vedelikkude tõeline ja näiv paisumine.

vähem kõrvuti ja me võime tähele panna ainult mõlema paisumise mõjul tekkinud muutust — vedeliku näivat paisumist, mis mõõtub toru ruumalaga AC. Nagu 60. joon. näha, on $BC = AB + AC$, s. o.

vedeliku tõeline paisumine = näiv paisumine + anuma paisumine.

Samasugune side kehtib ka vedeliku tõelise ja näiva paisumise koefitsiendi vahel. Teades anuma kui tahke keha paisumiskoefitsienti, võime leida saadud sideme põhjal vedeliku näiva paisumise koefitsiendi abil tõelise paisumise koefitsiendi.



Joon. 61. Vedelikkude näiva paisumise määramine.

52. Vedeliku näiva paisumise koefitsiendi määramine. Võtame peenikese klaastoru (umbes 30 cm pikk ja 3 mm õõnsuse läbimõõt) ja seome ta kõvasti termomeetri külge (joon. 61). Täidame toru suuremalt jaolt vedelikuga (petrooleum) ja asetame riista sügavasse anumasse vette, mille sees on jäätükid. Vaatame, kui palju näitab termomeeter; ühtlasi märgime ära, millise termomeetriskaala kriipsu kohal seisab vedeliku nivoo torus.

Nüüd soojendame vett anumas, sinna näiteks keeva vee auru juhtides, hoiame natuke aega temperatuuri jäävana ja jällegi märgime termomeetri näitamise kui ka vedeliku nivoo seisu torus termomeetriskaala abil. Mõõdame vedelikusamba pikkuse 0^0 juures, olgu see h_0 cm, ja pikkuse vaatluse lõpul t^0 juures, olgu see h_t cm. Tähistades toru läbilõike s-ga, leiame vedeliku näiva ruumpaisumise koefitsiendi järgmiselt:

$$a = \frac{v_t - v_0}{tv_0} = \frac{sh_t - sh_0}{tsh_0} = \frac{h_t - h_0}{th_0}.$$

Siit näeme, et vedeliku ruumala näiv paisumine on võrdeline vedelikusamba pikenemisega torus ($h_t - h_0$).

Ruumpaisumise koefitsiendid.

Bensiin	0,00138	Petrooleum	0,00095
Eeter	166	Piiritus	104
Elavhõbe	018	Tärpentiin	097
Glütseriin	051	Vesi (18° juures) . .	018
Oliiviõli	072	Väävelhape . . .	055

1. Võrrelda elavhõbeda ja piirituse paisumist! Kumb neist paisub enam ja mis tähtsus on sel asjaolul termomeetri ehitamisel?

2. Mispoolest erineb vee paisumine teiste vedelikkude paisumisest?

3. Kui palju muutub vaaditäie piirituse (500 liitri) ruumala temperatuuri muutumisel 10°-st 20°-ni?

4. Vask-kohvimasin mahutab endasse 15° juures 3 liitrit vett. Mitu cm^3 suureneb kohvimasina mahutavus ja mitu cm^3 vee ruumala soojendamisel kuni 100°?

5. Raudplekist anum mahutab endasse 10° juures 5 kg petrooleumi ja on just ääreni täidetud. Mitu g petrooleumi voolab anumast välja soojendamisel 30°-ni?

6. Leida elavhõbeda tihedus 100° juures, kui 0° puhul ta tihedus on 13,596 $\frac{g}{cm^3}$!

Gaaside paisumine.

53. Gay-Lussac'i seadus. Gaasidel ei ole kindlat kuju, seepärast võib kõnelda ainult gaaside ruumpaisumisest. Mitmesuguste gaaside paisumist uurides leidis prantslane Gay-Lussac (loe: ge-lüssakk) esimesena (a. 1802), et jääva rõhu juures paisuvad kõik gaasid ühteviisi, ja nimelt nõnda, et temperatuuri tõusmisel 1^0 võrra suureneb gaasi ruumala 0,00366 ehk $\frac{1}{273}$ osa võrra oma ruumalast 0^0 juures. Seega on siis $\frac{1}{273}$ kõikide gaaside kohta ühine ruumpaisumise koefitsient.

Tähistame antud gaasihulga ruumala 0^0 juures v_0-ga, t^0 juures v^t-ga ja gaaside ruumpaisumise koefitsiendi α-ga, siis võime Gay-Lussac'i seaduse põhjal kirjutada:

$$v_t = v_0 + atv_0 \text{ ehk}$$

$$v_t = v_0 (1 + at) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1),$$

millest järeldub:

$$v_0 = \frac{v_t}{1 + at} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Tahkete ja vedelate kehade paisumiskoefitsientide määramisel jätsime ütlemata, missuguses algtemperatuuris tuleb võtta keha paisumist koefitsiendiga näidatud määral. Tahkete ja vedelate kehade paisumiskoefitsientide väiksuse tõttu ei ole sel tegelikku tähtsust, ehkki siin on õigem lugeda paisumist antud kindlast temperatuurist, näiteks 0^0. Gaaside paisumiskoefitsient on küllalt suur, seepärast tuleb täpsuse nõudel gaaside paisumiskoefitsiendiks nimetada arvu, mis näitab, kui suure osa oma ruumalast 0^0 juures paisub antud gaasi hulk soojendamisel 1° võrra, kui rõhumine on jääv.

54. **Gaaside paisumiskoefitsiendi määramine.** Võtame ühtlase klaastoru, läbimõõduga umbes 1 mm ja ligi 20 cm pikk. Imeme torru umbes 1 cm pikkuselt elavhõbedat, sulatame toru ühe otsa kinni nii, et toatemperatuuris elavhõbe püsiks umbes toru keskel (joon. 62). Seega eraldame torus teatava hulga õhku. Kinnitame toru ühes termomeetriga skaalale ja asetame saadud riista anumasse, milles on vesi jääga. Märgime temperatuuri ja õhusamba kõrguse torus. Vett anumas soojendades märgime järjest (umbes 10^0 tagant) temperatuurid ja vastavad õhusamba kõrgused. Enne kõrguse lugemist on vaja toru pihta veidi koputada, et elavhõbe ei jääks

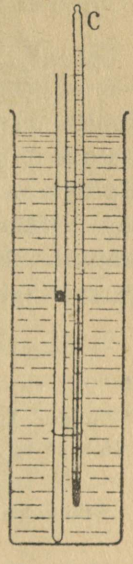
toru seinte külge peatuma. Kui toru on ühtlase jämedusega, siis võime õhusamba pikenemise lugeda võrdeliseks ruumala suurenemisega, mille põhjal on võimalik arvutada paisumiskoefitsienti. Olgu õhusamba kõrgus 0^0 puhul h_0 ja t^0 juures h_t ning vastavad ruumalad v_0 ja v_t, siis on $\frac{v_t}{v_0} = \frac{h_t}{h_0}$.

Valemist $v_t = v_0 (1 + at)$ saame $\frac{v_t}{v_0} = 1 + at$.

Järelikult $1 + at = \frac{h_t}{h_0}$, kust $\alpha = \frac{h_t - h_0}{th_0}$.

Arvutada saadud valemi põhjal vaatluse andmeist keskmised paisumiskoefitsiendid mitmesuguses temperatuurivahemikus!

Sama meetodit võib tarvitada iga gaasi puhul.



Joon. 62. Gaaside paisumiskoefitsiendi määramine.

55. Boyle-Mariotte'i ja Gay-Lussac'i valem. Rakenduste otstarbel on kasulik Boyle-Mariotte'i ja Gay-Lussac'i seadust väljendada ühise valemi abil. Olgu antud gaasihulga rõhk ja ruumala 0^0 korral vastavalt p_0 ja v_0 (algolek). Jätame temperatuuri samaks (0^0) ja muudame rõhku (p), siis muutub Boyle-Mariotte'i seaduse järgi ka ruumala (v'), ja nimelt nõnda (ülemineku-olek):

$$p_0 v_0 = pv' \quad . \ . \ . \ . \ . \ (1).$$

Nüüd jätame rõhu (p) endiseks ja muudame temperatuuri (t), siis muutub ka ruumala (v) Gay-Lussac'i seaduse järgi (lõpp-olek) järgmiselt:

$$v = v'(1 + \alpha t) \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ (2).$$

Jagame v' kõrvaldamiseks (1)-se võrduse (2)-ga, saame:

$$\frac{p_0 v_0}{v} = \frac{p}{1 + \alpha t} \text{ ehk } p_0 v_0 = \frac{pv}{1 + \alpha t} \quad . \ . \ . \ . \ (3).$$

Saadud valem (3) sisaldab endas nii Boyle-Mariotte'i kui ka Gay-Lussac'i seaduse. Esimene neist järeldub, asetades valemisse $t = 0 = \text{const.}$, siis saame: $p_0 v_0 = pv$; teine järeldub, oletades, et $p = p_0 = \text{const.}$, siis $v = v_0 (1 + \alpha t)$.

Valemi $p_0 v_0 = \frac{pv}{1 + \alpha t}$ abil on võimalik antud gaasihulga ruumala taandada nn. n o r m a a l t i n g i m u s t e s s e (temperatuur 0^0 ja rõhumine $p_0 = 76$ cm), sest tabeleis on harilikult kõik andmed (tihedus, erikaal) antud normaaltingimuste kohta. Valemist (3) järeldub, et kui antud gaasi hulga temperatuur, rõhk ja ruumala on vastavalt t, p ja v, siis normaaltingimustes selle gaasihulga ruumala

$$v_0 = \frac{pv}{p_0 (1 + \alpha t)}.$$

Näide. Leida klassis oleva õhu mass, kui klassi ruumala $v = (9 \cdot 6 \cdot 4)$ m³, õhu $p = 75$ cm ja $t = 15°$!

Tiheduse valemist $d_0 = \frac{m}{v_0} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$ saame:

$$m = d_0 v_0 = \frac{d_0 pv}{p_0 (1 + \alpha t)} = \frac{1{,}3 \cdot 75 \cdot 9 \cdot 6 \cdot 4}{76 \left(1 + \frac{1}{273} \cdot 15\right)} = 262{,}67 \text{ (kg)}.$$

56. Gaasi rõhu olenevus temperatuurist. Absoluutne temperatuur. Temperatuuri muutudes jääva rõhu puhul muutub gaasi ruumala Gay-Lussac'i seaduse järgi. Vaatame nüüd, kuidas muutub antud gaasihulga rõhk j ä ä v a s r u u m a l a s, kui temperatuur muutub. Selleks jätame valemis $p_0 v_0 = \frac{pv}{1 + \alpha t}$ ruumala konstantseks, s. o. $v = v_0$, siis saame:

$$p_0 = \frac{p}{1 + \alpha t} \quad \text{ehk} \quad p = p_0 (1 + \alpha t) \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (1).$$

Saadud valemist näeme, et gaasi rõhk jääva ruumala puhul oleneb temperatuurist just niisama kui ruumala jääva rõhu puhul, nimelt: temperatuuri tõusmisel 1^0 võrra suureneb gaasi rõhk α ehk $\frac{1}{273}$ osa võrra oma rõhust 0^0 juures. Seega siis on $\frac{1}{273}$ kõikide gaaside kohta ühine rõhu suurenemise koefitsient temperatuuri tõusmisel 1^0 võrra.

Boyle-Mariotte'i—Gay-Lussac'i valemist tuletatud gaaside rõhu muutumise seaduse avastas katseliselt prantslane Charles (šarl) a. 1787, seepärast nimetatakse seda sagedasti ka Charles'i seaduseks.

Valemist (1) järeldub, et temperatuuri langemisel rõhk p väheneb. Nüüd küsime: missuguses temperatuuris gaasi rõhk kaob hoopis ära, s. o. $p = 0$. Selle küsimuse vastamiseks lahendame võrrandi $p_0 (1 + \alpha t) = 0$ t suhtes. Et p_0 ei võrdu nulliga, siis peab $1 + \alpha t = 0$, siit $\alpha t = -1$ ja $t = -\frac{1}{\alpha} = -273$.

Kineetilise teooria põhjal on gaasi rõhk tingitud molekulide liikumisest. Kui gaasi rõhk ära kaob, siis peab kineetilise teooria põhjal ära jääma ka molekulide liikumine; üldse gaas kaotab oma olemise, meie ei suuda enam gaasi kui niisugust kujutella. Nagu nägime, on temperatuuriks, milles gaasi rõhk kaob, -273^0. Seda temperatuuri (-273^0, õigemini $-273{,}16^0$) nimetatakse absoluutseks nulliks. Kui võtta absoluutne null termomeetriskaala nullpunktiks, väljenduvad kõik temperatuurid ainult absoluutsete arvudega; seepärast nimetataksegi absoluutsest nullist alates loetud temperatuuri ka absoluutseks temperatuuriks. Harilikult tähistatakse absoluutne temperatuur T-, Celsiuse skaala järgi t-tähe abil.

1. Antud õhuhulga ruumala 0^0 juures on 3 liitrit. Kui suur on sama õhu ruumala 91^0 puhul?

2. Kui suur on antud õhuhulga ruumala -25^0 juures, kui $+20^0$ puhul on sama õhuhulga ruumala 240 cm^3?

3. Mitme kraadi võrra tuleb 0^0-list õhku jahutada, et ta ruumala väheneks 2 korda?

4. Antud gaasihulga ruumala 0^0 juures on v_0 liitrit. Missuguses temperatuuris on sama gaasihulga ruumala v_0 liitrit?

5. Kui palju kaalub normaalrõhumisel klassitoatäis õhku ($9 \cdot 6 \cdot 4$ m^3) 15^0 puhul?

6. Leida antud gaasihulga ruumala 0^0 juures, kui -30^0 puhul ta ruumala on 360 cm^3!

7. Õppetundide alguses oli klassi õhu temp. 12^0 ja rõhk 755 mm, lõpul aga vastavalt 17^0 ja 750 mm. Kui palju vähenes selle aja jooksul õhu raskus klassis, mille ruumala on $9 \cdot 6 \cdot 4$ m^3?

8. Leida õhu tihedus 15^0 juures ja 76,8 cm rõhu puhul!

9. Anumas, mille ruumala 1 liiter, on 2 g õhku. Kui suur on selle õhu rõhk 100^0 puhul?

10. Prof. Piccard stratosfääri uurimisel 1931. a. kasutas õhupalli, mille gaasiballooni mahutavus oli 14 000 m^3. Õhupall tõusis 15 781 m kõrgusele, kus baromeeter näitas 76 mm rõhku ja termomeeter -55^0. Kui suur oli gaasiballooni üleslüke?

Soojushulga mõõtmine.

57. Soojushulga mõõduühikud. Keha temperatuuri tõusmist seletame soojuse juurdetulekuga, temperatuuri langemist — soojuse kaotusega selles kehas. Meile juba tuntud kineetilise teooria põhjal on soojus keha molekulide liikumisenergia. Energiat võime ühest kehast teise edasi anda ja mõõta. Samuti võime ka soojusenergiat ta hulga suhtes mõõta teatavais ühikuis.

Soojushulga (energia) mõõtmisel on võetud ühikuks see soojushulk, mille 1 g vett juurde saab (või kaotab), kui ta temperatuur tõuseb (v õ i l a n g e b) 1^0 v õ r r a. Seda soojushulka nimetatakse **grammkaloriks** ehk lihtsalt **kaloriks (cal,** ladina keelest: *calor* — soojus). **Kilogramm-kalor** ehk **kilokalor (kcal)** on 1000 g r a m m k a l o r i t ja vastab soojushulgale, mis 1 kg v e t t j u u r d e s a a b (v õ i k a o t a b), k u i t a t e m p e r a t u u r t õ u s e b (v õ i l a n g e b) 1^0 v õ r r a.

Katse näitab, et antud veehulga temperatuuri tõstmiseks 1^0 C võrra kulub alati (p e a a e g u) ühepalju soojust, vaatamata algtemperatuurile, millest algas soojendamine (kas 0^0, 15^0 või 60^0 jne.), seepärast ei ole meil t e g e l i k u l t tähtis kalori definitsioonis nimetada algtemperatuuri.

Leiame, kui palju kulub soojust, et 250 g vee temperatuuri tõsta 15^0 võrra.

Tähistades otsitava soojuse hulga Q-ga saame:

$$Q = 250 \cdot 15 \text{ cal} = 3750 \text{ cal} = 3{,}75 \text{ kcal}.$$

Üldse, m g vee temperatuuri tõstmiseks t^0 võrra kulub soojust

$$Q = mt \text{ (cal)}.$$

1. Lahendada üldisel kujul vee segamise ülesanne: m_1 g vett t^0_1 puhul segati m_2 g veega t_2^0 puhul, leida lõpptemperatuur t! Näidata, et saadud valem on kehtiv ka iga teise vedeliku segamisel!
2. Kui palju kulub soojust, et 250 g vett soojendada 15^0-st 100^0-ni?
3. Kui palju soojust kulub selleks, et 2 liitrit vett toatemperatuurist (20^0) soojendada 100^0-ni?
4. Kui palju soojust annab ära teeklaasitäis (250 cm^3) vett, jahtudes 10^0-st 25^0-ni?
5. 3 liitrit vett andis jahtudes ära 120 kcal soojust. Kuidas muutus vee temperatuur?
6. 1 m^3 vee soojendamiseks kulutati 15 000 kcal soojust. Kui palju tõusis vee temperatuur?
7. Mitme kraadi võrra soojeneb 50 g vett, kui temasse juhtida 1 kcal soojust?
8. Mitu g vett võib soojendada 0,5 kcal arvel 10^0 võrra?

9. Mitu liitrit vett kaotab jahutamisel 10^0 võrra 30 kcal soojust?

10. Mitu liitrit vett 15^0 juures tuleb segada 2 liitri veega 60^0 juures, et segu temperatuur oleks 30^0?

11. Segati 3 liitrit vett 20^0 juures 5 liitri veega 12^0 juures. Leida segu temperatuur!

58. Keha soojusmahtuvus. Aine erisoojus. Võtame 500 g rauda (naelad) ja 500 g seatina (haavlid), soojendame neid näiteks 100^0-ni (keevas vees hoides) ja asetame siis ühe ühte, teise teise anumasse veega. Veehulk ja algtemperatuur olgu mõlemas anumas samad, soovitatav, et ka anumad ise oleksid ühesugused (mispärast?). Mõõtes vee temperatuuri tõusu anumais näeme, et see ei ole ühesugune, vaid raua jahtumise mõjul umbes 3 korda suurem kui seatina mõjul. Sellest järeldame, et samas hulgas võetud erisuguste ainete (raud, seatina) soojendamiseks sama kraadide arvu võrra tarvitab üks keha tublisti rohkem soojust kui teine.

Keha **soojusmahtuvuseks** nimetatakse seda soojushulka, mis keha juurde saab (või kaotab), kui ta temperatuur tõuseb (või langeb) 1^0 võrra.

Kui näiteks rauatüki temperatuuri tõstmiseks 1^0 võrra kulub 15 cal, siis on selle rauatüki soojusmahtuvus 15 cal, jne.

Kui keha koosneb ühtlasest ainest (tina, raud, vask, puu jne.), siis on kerge ta soojusmahtuvust leida selle aine 1 massiühiku (g, kg) soojusmahtuvuse ehk erisoojuse põhjal. Tähendab, **aine erisoojus** näitab soojushulka (g-kaloreis), mis 1 g seda ainet juurde saab (või kaotab), kui ta temperatuur tõuseb (või langeb) 1^0 võrra.

1 g vee soojendamiseks 1^0 võrra kulub 1 cal soojust, järelikult vee erisoojus on 1 cal; 1 g raua soojendamiseks 1^0 võrra kulub 0,1 cal soojust, seega on siis raua erisoojus 0,1 cal, jne.

Katse näitab, et kitsamas temperatuuride vahemikus, näiteks 0^0—100^0-ni, antud keha temperatuur tõuseb (või langeb) sama soojushulga arvel (peaaegu) sama kraadidearvu võrra, vaatamata algtemperatuurile, millest algas soojendamine (või jahutamine). Selle põhjal võime lugeda aine erisoojuse kitsamas temperatuuride vahemikus jäävaks. Tabeleis on antud keskmised erisoojused teatud temperatuurivahemikus.

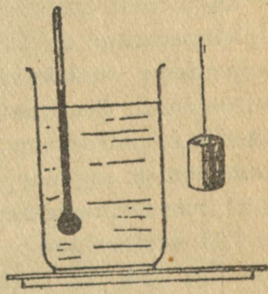
Näide. Teeklaas kaalub 200 g ning jahtus 60^0 võrra. Kui palju ta kaotas soojust?

Klaasi erisoojus on 0,17 cal, järelikult 1^0 võrra jahtudes kaotab teeklaas $0{,}17 \cdot 200$ cal, 60^0 võrra jahtudes $0{,}17 \cdot 200 \cdot 60$ ehk 2040 cal.

Üldse, kui meil on m g ainet, mille erisoojus c cal, siis kaotab ta temperatuuri langemisel t_0 võrra soojust.

$$Q = cmt \text{ (cal)}.$$

59. **Erisoojuse määramine segamisviisi abil.** *a)* Tahame näiteks leida seatina erisoojust, siis võtame tüki seatina, olgu 645 g, soojendame teda keeva vee aurus hoides 100^0-ni ja asetame anumasse, milles on näiteks 400 g vett $13{,}5^0$ juures (joon. 63). Nüüd läheb seatinast osa soojust vette ja vee temperatuur hakkab tõusma. Segame vett ja paneme tähele kõige kõrgema temperatuuri, mis termomeeter näitab. Olgu see $17{,}5^0$. Siis oli vesi niisama soe kui seatinagi. Tähendame seatina otsitava erisoojuse x-ga ja arvutame soojushulga, mis seatinatükk jahtudes kaotas ja veele andis. Üks gramm seatina, jahtudes ühe kraadi võrra, kaotab x cal soojust, 645 g kaotab aga 645 x cal.



Joon. 63. Erisoojuse määramine.

Seatinatükk jahtus ($100—17,5^0$), tähendab, seatinatüki soojusekaotus kokku on $645 \cdot (100—17,5)\ x$ cal. Samuti leiame, et vesi anumas soojenedes sai soojust juurde $400 \cdot (17,5—13,5)$ cal. Kui oletada, et muud soojusekaotused, näiteks kiirgamise ja juhtivuse teel, on niivõrra väikesed, et need võib jätta tähele panemata, siis peab soojushulk, mis seatinatükk kaotas, võrduma soojushulgaga, mis vesi juurde sai, s. o.

$$645 \cdot (100—17,5)\ x = 400 \cdot (17,5—13,5),$$

millest x=0,03 (kalorit).

Niiviisi leidsime, et seatina erisoojus on 0,03, s. t. et ühe grammi seatina ühe kraadi võrra soojendamiseks tuleb talle anda 0,03 cal soojust.

Riista, mille abil määratakse erisoojust, nimetatakse **kalorimeetriks.** Meil oli kalorimeetriks lihtne anum veega.

b) Vedelikkude, näiteks petrooleumi, e r i s o o j u s e leidmiseks võtame meile juba tuntud erisoojusega keha, näiteks seatinatüki, juhime temast osa soojust vedelikku ja vaatame, kui palju seetõttu tõuseb vedeliku temperatuur.

Olgu meil kalorimeetris näiteks 400 g petrooleumi, mille algtemperatuur on 19^0. Võtame 537-grammise seatinatüki, soojendame teda keeva vee aurus hoides 100^0-ni ja asetame petrooleumi. Seatinatükk annab osa oma soojusest petrooleumile ja petrooleumi temperatuur hakkab tõusma. Petrooleumi ümber segades paneme tähele kõige kõrgema temperatuuri, mis termomeeter näitab. Olgu see 25^0. Seatina erisoojus on 0,03, otsitav petrooleumi erisoojus x. Seatinatükk kaotas jahtudes $0,03 \cdot 537 \cdot (100—25)$ kalorit, petrooleum sai soojenedes soojust juurde $400 \cdot (25—19)$ x kalorit. Et mõlemad soojushulgad peavad olema võrdsed, siis saame võrrandi

$$400\ (25—19)\ x = 0,03 \cdot 537 \cdot (100—25),$$

millest x=0,5 (kalorit).

60. Gaaside erisoojus. Gaaside erisoojusest kõneldes tuleb vahet teha erisoojuse vahel jääva rõhu puhul (c_p), ja erisoojuse vahel jääva ruumala puhul (c_v). Kui gaas on soojendamisel jääva rõhu all, s. o. gaas saab soojendamisel vabalt paisuda, siis on ta erisoojus suurem kui sel juhul, kus gaasi ruumala on soojendamisel jääv, mistõttu rõhk soojendamisel suureneb. Selle nähtuse põhjuseks on asjaolu, et esimesel juhul kulub osa soojust tööks, mida gaas teeb paisumisel. Näitena toome mõne tuntud gaasi erisoojuse jääva rõhu puhul (c_p).

Hapnik	0,244	Vesinik	3,410
Lämmastik	0,217	Õhk	0,237

Erisoojuste tabel.

Alumiinium	0,212	Liivakivi	0,174
Huumus	0,433	Marmor	0,216
Hõbe	0,056	Nikkel	0,108
Inglistina	0,055	Plaatina	0,032
Jää	0,463	Raud	0,110
Kivisüsi	0,312	Seatina	0,031
Klaas	0,170	Tsink	0,094
Kuld	0,032	Valgevask	0,092
Kuusepuu	0,654	Vask	0,093

Bensiin	0,38	Petrooleum	0,51
Eeter	0,53	Piiritus	0,58
Elavhõbe	0,03	Tärpentiin	0,51
Glütseriin	0,50	Vesi	1,00

1. Millisel kehal eelolevast tabelist on kõige suurem ja millisel kõige väiksem erisoojus?

2. Seatina- ja raudkuul lendavad võrdse kiirusega vastu märklauda. Kumb neist läheb rohkem kuumaks, kui algtemperatuur oli ühesugune?

3. Missugust mõju avaldab vee erisoojus kliima kujunemisele?

4. Kui palju soojust kaotab 4,5-kg-ne klaasitükk jahtudes 200°-st 0°-ni?

5. Kui palju soojust läheb vaja, et 2 kg elavhõbedat soojendada 100° võrra?

6. 500 g vaske jahtus 100°-st 28°-ni. Kui palju kaotas ta soojust?

7. Seatinatükk kaalub 250 g. Kui palju soojust kulub ta soojendamiseks 15°-st 100°-ni?

8. Segati liiter 40°-st vett liitri piiritusega 20° juures. Leida segu temperatuur!

9. Mitme kraadi võrra jahtub jäätükk, mis kaalub 480 g, kui talt ära võtta 2,4 kcal soojust?

10. Alumiiniumlusikas kaalub 18 g. Mitme kraadi võrra tõuseb lusika temperatuur, kui talle juurde anda 72 cal soojust?

11. Mitme kraadi võrra soojeneb 500 g tsinki, kui talle juurde anda 2 kcal soojust?

12. Mitu g inglistina on võimalik 30 cal arvel teha 5° soojemaks?

13. 300-g-se seatinatüki soojendamiseks 15°-st 35°-ni kulub 186 cal soojust. Kui suur on seatina erisoojus?

14. Kui suur soojusmahtuvus on teeklaasil, mis kaalub 120 g?

15. Hõbelusikas kaalub 70 g. Kui suur on ta soojusmahtuvus?

Sulamine.

61. Sulamis- ja tahkumisnähtus ning -seadused. Keha olek (tahke, vedel, gaasiline) oleneb temperatuurist. Keha üleminekut tahkest olekust vedelasse nimetatakse **sulamiseks**, sellele vastupidist nähtust — **tahkumiseks.** Näitlikult võime sulamise ja tahkumise käiku kujutada graafiku abil (joon. 64). Märgime püstteljel temperatuuri ja rõhtteljel aja; oletame, et soojuse juurdevool soojendamisel ja kaotus jahtumisel on ühtlane, s. o. võrdeline ajaga. Siis kujutab joon *ABCD* keha temperatuuri muutumise käiku soojenemisel ja *EFGH* jahtumisel.

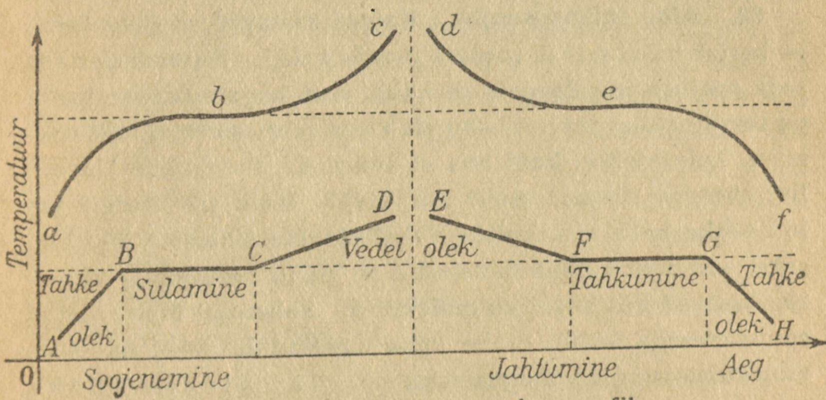
Samuti kui jää sulamine ja vee tahkumine toimub ka kõigi teiste kristalse ehitusega kehade oleku muutumine tahkest vedelaks ja ümberpöördult, nimelt:

1) iga keha hakkab sulama (tahkuma) kindlal, sellele kehale omasel sulamis- (tahkumis-) temperatuuril;

2) sulamistemperatuur on ühesugune tahkumistemperatuuriga;

3) sulamine (tahkumine) kestab niikaua, kui soojust juurde tuleb (kaob);

4) kogu sulamise (tahkumise) kestel on keha temperatuur jääv.



Joon. 64. Aine oleku muutumise graafik.

Mitte kõik kehad ei sula nõnda kui jää. Kui näiteks klaaspulka soojendada gaasipõleti leegis, siis ta muutub vedelaks mitte äkitselt, vaid läheb temperatuuri tõusmisel järjest pehmemaks, kuni lõpuks jõuab vedela olekuni. Sel klaasi omadusel on suur tähtsus klaasitööstuses, sest ta võimaldab klaasist välja töötada mitmekujulisi asju. Sarnaselt klaasiga sulavad (tahkuvad) üldiselt kõik amorfsed (mittekristalsed) kehad, nagu või, rasv, vaha, pigi, kummi jt. Seda liiki kehade temperatuuri muutumise käiku soojendamisel (jahutamisel) võime kujutada kõveraga *abc* (*def*) (joon. 64), mis muutub pidevalt. Sulamis- (tahkumis-) temperatuuriks loetakse niisugusel juhul see, kus temperatuuri muutumine toimub kõige aeglasemalt (*b* ja *e*).

Temperatuuri tõusuga hakkavad molekulid tahkes kehas (kristallis) tugevamini võnkuma. Teatud võnkumistugevuse juures ei suuda molekulaartungid enam säilitada üksikute molekulide asendeid kristalli ruumvõres. Ruumvõre variseb kokku ja molekulid saavad edasiliikumisvabaduse. Sellega ongi tahke keha (kristall) muutunud vedelikuks.

62. Aine sulamissoojus. Katsed näitavad, et jää sulamine kestab niikaua, kui soojust juurde tuleb. Termomeeter aga seda soojuse juurdevoolu ei näita, sest kogu sulamise kestel on temperatuur jääv. Kuhu jääb siis soojusenergia, mis sulamisel kulutatakse, kuid mis ei suurenda molekulide kineetilist energiat (temperatuur on jääv)? Kõik see energia kulub tahke keha molekulide vahel olevate sidemete lõhkumiseks, sest tahke keha molekulid on palju tugevamini üksteisega seotud kui vedeliku molekulid. Sulamisel äratarvitatud soojusenergia kulub tahke keha molekulide vahel mõjuvate molekulaartungide ületamiseks, nn. sisemiseks tööks, mis suurendab molekulide potentsiaalset energiat. Nagu Maa ja kivi potentsiaalne energia suureneb kivi maapinnast kõrgemale tõstmisel, samuti võib ka molekulide teistsugusel asetamisel üksteise suhtes suureneda nende potentsiaalne energia.

Soojushulka, mis kulub selleks, et 1 g antud ainet sulamistemperatuuris tahkest olekust vedelaks muuta, nimetatakse selle aine **sulamissoojuseks.** Nii näiteks on jää sulamissoojus **80 grammkalorit.**

Tahkumisel toimub vastupidine nähtus. Sulamiseks kulutatud energia saab vabaks, molekulide potentsiaalne energia muutub kineetiliseks ja andub edasi ümberolevaile kehadele. Et looduses energia ei hävi, siis on loomulik, et sulamiseks kulutatud energia hulk tahkumisel jälle täiel määral vabaneb; samuti muutub ka ülestõstetud kivi potentsiaalne energia kivi mahalangemisel molekulide kineetiliseks energiaks.

63. Jää sulamissoojuse määramine. Olgu kalorimeetris 434 g vett algtemperatuuriga $52{,}8^0$. Võtame tükikese kuiva jääd 0^0 juures ja laseme kalorimeetrisse. Jää sulamisel langeb vee temperatuur kalorimeetris. Segame vett järjest ümber ja märgime temperatuuri kohe, kui viimane jääraasuke on ära sulanud. Olgu vee lõpptemperatuur $27{,}6^0$ ja kogu vee hulk 536 g. Leiame saadud andmeist jää sulamissoojuse. Vesi jahtus kalorimeetris $52{,}8^0 - 27{,}6^0 = 25{,}2^0$ võrra. Ärasulanud jää mass on 536 g — 434 g = 102 g. Vesi kalorimeetris kaotas $25{,}2 \cdot 434$ g-kalorit soojust; sellest soojushulgast kulus, tähistades jää sulamissoojuse x-ga, $102\,x$ g-kalorit jää sulatamiseks ja $27{,}6 \cdot 102$ g-kalorit jää sulamisest tekkinud vee soojendamiseks 0^0-st $27{,}6^0$-ni. Et mõlemad soojushulgad peavad olema võrdsed, siis saame võrrandi

$$102x + 27{,}6 \cdot 102 = 25{,}2 \cdot 434,$$

millest $x = 79{,}6$.

Täpsed mõõtmised näitavad, et jää s u l a m i s s o o j u s on 80 k a l o r i t i g a g r a m m i k o h t a.

64. Ruumala muutumine tahkumisel. Jää ujub veepinnal — sellest järeldame, et vee ruumala tahkumisel suureneb (umbes $10^0/_0$). Sama omadus on ka malmil, bismutil ja mõnel teisel ainel. Suuremal hulgal kehadel (seatina, vask, väävel jt.) väheneb ruumala tahkumisel ja seepärast vajub tahke keha samast ainest vedelikus põhja.

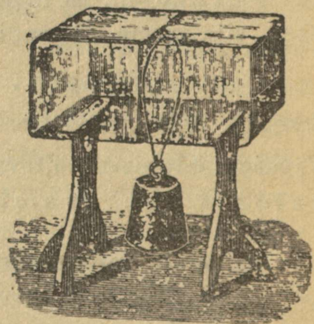
Vee ruumala muutumisel tahkumisel on looduses väga suur tähtsus. Kui jää vees põhja vajuks, siis muutuks vesi suuremas osas meie veekogudest (jõed, järved, osalt ka mered) põhjani jääks ja elu neis häviks. Mispärast?

Joon. 65. Jääks muutudes paisub vesi tugevasti ja lõhub raudpommi.

Kui tugevasti vesi jääks muutudes paisub, näitab katse raudpommiga (joon. 65), mille õõnsus täidetakse veega, siis kruvitakse kõvasti kinni ja asetatakse jahutavasse segusse. Jääks muutudes paisub vesi nii tugevasti, et pomm lõhkeb. — Samuti kui kõik teised kehad tõmbub jää jahtudes kokku ja paisub soojenedes.

Täita pudel veega ja panna välja kange külma kätte! Vaadata, mis juhtub ja mispärast?

65. Sulamistemperatuuri olenevus rõhust. Kehade sulamistemperatuur oleneb vähesel määral rõhust, mille juures toimub sulamine. Kõigil neil kehadel, mille ruumala tahkumisel suureneb (jää), langeb sulamistemperatuur rõhu suurenedes, teistel kehadel toimub nähtus ümberpöördult. Jää puhul on seda kerge katseliselt näidata.



Joon. 66. Jää sulamistemperatuur langeb rõhu suurenedes.

Võtame tüki jääd, paneme välja külma kätte ja riputame temast ülepandud traadi külge raske koormise (joon. 66). Nüüd hakkab traadi rõhu all olev jää sulama, kuna sulamisest tekkinud vesi ülalpool traati jälle jääks külmub. Sedaviisi lõikab traat jäätüki pikkamisi läbi, kuna jäätükk ise seejuures jääb terveks.

Nähtuse seletamiseks tuletame meelde, et jää ruumala sulamisel väheneb. Jäässe mõjuv rõhumine vähendab jää ruumala ja aitab sellega sulamisele kaasa. Kehade puhul, kus ruumala tahkumisel väheneb (seatina, vaha), on rõhumise mõju sulamistemperatuurile vastupidine.

See jää omadus mängib tähtsat osa jääliustikkude tekkimisel.

66. Jahutavad segud. Ülejahutamine. Ka lahustumisel kulub soojust, et nõrgendada sidet lahustatava aine molekulide vahel. Seepärast näiteks langeb keedusoola lahustumisel vees vee temperatuur. Iseäranis tugevasti langeb temperatuur (kuni —20^0) keedusoola lahustumisel jääs (lumes). Niisugust jää ja soola segu nimetatakse j a h u t a v a k s s e g u k s. Veel madalama temperatuuri (kuni —55^0) annab kristalse kloorkaltsiumi ja jää segu.

Ettevaatlikult puhast vett jahutades võib teda ü l e j a h u t a d a, s. o. jahutada alla hariliku tahkumistemperatuuri (0^0). Kuid see olek ei ole stabiilne, püsiv. Raputamisel või jääkristallikeste lisamisel muutub osa veest äkitselt jääks, kuna ülejäänud vee temperatuur tõuseb 0^0-ni. Vett võib kuni —20^0-ni üle jahutada.

Sarnaselt ülejahutamisega võib kõnelda ka kehade ü l e s o o j e n d a m i s e s t, s. o. nähtusest, kus keha püsib tahkes (või vedelas) olekus vaatamata sellele, et ta temperatuur on sulamistemperatuurist (või keemistemperatuurist) kõrgem.

Sulamistemperatuurid ja -soojused.

Aine	Sulamistemperatuur	Sulamissoojus	Aine	Sulamistemperatuur	Sulamissoojus
Alumiinium . .	657^0	102	Raud (puhas) .	1528	49
Eeter . . .	—132	—	Seatina	327	6,3
Elavhõbe . . .	—39	2,8	Tsink	419	26,6
Hõbe	961	24	Vaha . . .	63—64	42,3
Inglistina . . .	232	1,46	Vask	1083	42
Jää	0	80,0	Väävel	113	9,4
Kuld	1063	16			
Nikkel	1451	65	Hapnik . . .	—219	3,3
Parafiin . .	50—55	35,1	Lämmastik .	—210	6,1
Piiritus . . .	—130	—	Süsihappegaas .	—56,3	45,3
Plaatina	1764	27	Vesinik . . .	—258	14

1. Missugune on lume (jää) ja vee segu temperatuur? Millest tunneme, kas külmetab või sulab?

2. Jää (jäätis) tundub hambaile külmem kui jäävesi (0^0). Mispärast?

3. Kui palju kulub soojust 20 g jää sulatamiseks sulamistemperatuuris?

4. Kui palju —10^0-st jääd on võimalik ära sulatada 120 g vees, mille temperatuur on 20^0?

5. Kui palju kulub soojust selleks, et ära sulatada 300 g seatina, mille temperatuur on 25^0?

6. Segati 300 g vett 40^0 juures 20 g jääga —10^0 juures. Leida segu temperatuur!

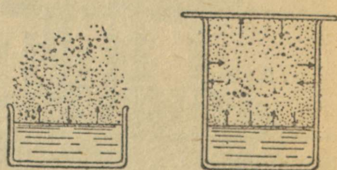
7. Mitu g jääd —5^0 juures peab 2 liitris 60^0-ses vees ära sulatama, et vee temperatuur langeks 10^0 võrra?

8. Mitu g 20^0-st vett tuleb segada 30 g lumega, mille temp. —6^0, et pärast lume ärasulamist segu temp. oleks 10^0?

9. Kui paksu jääkihi suudaks Päikeselt aasta jooksul saadud soojus ümber Maa ära sulatada (jää algtemperatuur 0^0)? Kas oleneb selle kihi paksus Maa raadiusest?

Aurustumine ja niiskus.

67. Aurustumine lahtises anumas. Aurustumiseks nimetame aine aeglast muutumist vedelast olekust gaasiliseks, kusjuures see muutumine toimub vedeliku pinnal ja igasuguses temperatuuris. Aurustumisel gaasilisse olekusse läinud vedelikku (vett) nimetame a u r u k s.


a *b*

Joon. 67. Aurustumine lahtises (*a*) ja kinnises (*b*) anumas.

Mõned tahked kehad (lumi, kamper, jood jne.) võivad minna otsekohe, ilma vedelaks muutumata, tahkest olekust gaasilisse. Niisugust kehade omadust nimetatakse l e n d u m i s e k s ja kehi endid l e n d u v a i k s.

Molekulaarteooria põhjal võime aurustumist seletada järgmiselt. Vedelikumolekulid on alalises liikumises ja selle keskmine kiirus oleneb temperatuurist. Et vedelikumolekulid asetsevad üksteisele väga lähedal, siis on sagedad kokkupõrked möödapääsematud. Need pinna lähedal olevad vedelikumolekulid, mille kiirus on keskmisest kiirusest suurem, võivad (tähtis on ka liikumise suund) ületada oma mõjupiirkonna molekulaartungid ja sedaviisi pääseda vedelikust välja ruumi, mis on vedeliku kohal. Nii siis moodustavad vedeliku auru need peaasjalikult suurema kiirusega vedelikumolekulid, mis vedelikust välja pääsevad. Õhus olevad aurumolekulid võivad üksteisega, samuti ka õhumolekulidega ja anuma seintega kokku põrgates uuesti vedelikku tagasi sattuda.

Et temperatuuri tõusuga kasvab molekulide liikumise kiirus, siis on loomulik, et ühes sellega suureneb ka aurustumise kiirus, mis on vee aurustumisest üldiselt tuttav.

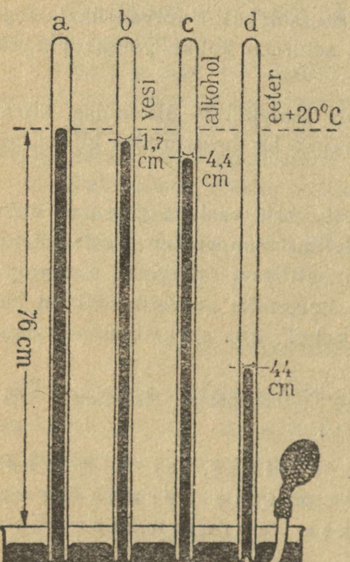
Nagu nägime, pääsevad vedelikust välja eeskätt suurema kiirusega molekulid. Seega siis peab vedeliku temperatuur, mis oleneb vedelikku järelejäänud molekulide kineetilisest energiast, aurustumisel langema. Vedeliku temperatuuri langemist aurustumisel on kerge tähele panna nende vedelikkude puhul, kus aurustumine toimub iseäranis kiiresti (eeter, piiritus).

Nimetada mõned nähtused vee aurustumise jahutava mõju kohta!

Soojushulk, mis kulub selleks, et 1 g vedelikku antud temperatuuris muuta auruks samas temperatuuris, nimetatakse aurustumise soojuseks.

Eespoolöeldust võiks järeldada, nagu peaks auru temperatuur vedeliku omast suurem olema (energilisemad molekulid). Kuid tõepoolest kulub osa vedelikust väljuvate molekulide kineetilisest energiast (kiirusest) molekulaartungide ületamiseks ja muundub seega potentsiaalenergiaks (võrdlus ülesvisatud kiviga). Aurust vedelikku tagasitulemisel muundub molekuli potentsiaalenergia uuesti kineetiliseks ja molekul omandab endise kiiruse, samuti vedelik endise temperatuuri. Seepärast siis saab aurustumisel kulunud soojus veeldumisel jälle uuesti vabaks, s. o. *aurustumissoojus võrdub auru veeldumise soojusega.*

68. Aurustumine kinnises anumas. Kui aurustumine toimub kinnises anumas (joon. 67,b), siis ei pääse aurumolekulid vedeliku peal olevast ruumist eemale, vaid kogunevad kõik sinna piiratud ruumi. Aurumolekulide arv suureneb järjest, kuni lõpuks tekib nn. **liikuv tasakaal,** s. o. seisund, kus v e d e l i k u s t v ä l j u n u d (auruks muutunud) m o l e k u l i d e a r v v õ r d u b a u r u s t v e d e l i k k u t a g a s i l ä i n u d m o l e k u l i d e a r v u g a. Nüüd antud ruumi antud temperatuuris aurumolekule enam ei mahu. Me ütleme, et **ruum** on aurust **küllastatud** ehk **aur on küllastunud.**



Joon. 68. Küllastanud auru rõhumise määramine.

Suurendame vedeliku kohal olevat kinnist ruumi, siis ei jätku aurumolekulidest selle ruumi küllastamiseks, ruum on aurust **küllastamata** ja vedelikust võib uusi molekule ruumi juurde tulla kuni küllastuseni. Vähendame auruga küllastatud ruumi, siis peab osa aurumolekule paratamatult vedelikku tagasi minema — v e e l d u m a, sest nii palju neid antud ruumi ei mahu.

69. Küllastunud auru rõhumine. Aurumolekulid liiguvad vabalt ruumis sarnaselt gaasimolekulidega. Seepärast peab aur sarnaselt gaasidega molekulide alaliste kokkupõrgete („pommitamise“) tõttu avaldama rõhumist. Nagu nägime, on küllastatud ruumis aurumolekulide arv kõige suurem, seepärast peab olema küllastunud aurul võrreldes küllastumatu auruga ka kõige suurem rõhk.

Auru rõhu uurimiseks võib tarvitada tühja ruumi baromeetri torus (Torricelli tühjus). Olgu meil 4 ühesugust baromeetri toru täidetud elavhõbedaga (joon. 68). Juhime kõvera otsaga pritsi abil toru *b* alla vett, *c* alla piiritust ja *d* alla eetrit. Vedelik tõuseb torus üles ja muutub elavhõbeda kohal olevas ruumis auruks. Juhime vedelikku niikaua torudesse juurde, kuni elavhõbeda peale tekib õhuke vedelikukiht. Sellest järeldame, et ruum vedeliku kohal on aurust küllastatud, sest vedelikku enam auruks ei muutu. Toru *b*, *c* ja *d* elavhõbedasamba kõrgust toru *a* omaga (baromeeter) võrreldes näeme, et esimestes küllastunud auru rõhumise mõjul on elavhõbe langenud, nimelt 20° juures: torus *b* (vesi) 1,7 cm, torus *c* (piiritus) 4,4 cm ja torus *d* (eeter) 44 cm. Sellest järeldame, et 20° juures on küllastunud veeauru rõhk 1,7 cm, piiritusel 4,4 cm ja eetril 44 cm.

Katsetest selgub, et küllastunud auru rõhk oleneb vedeliku ainest, auru temperatuurist ja suureneb temperatuuri tõustes. Küllastunud veeauru rõhu olenevus temperatuurist on katseliselt kindlaks määratud (tabel), kuid side matemaatilise valemi näol nende vahel on võrdlemisi keeruline.

Küllastunud auru rõhk ei olene sellest, kas ruum, kus aur tekib, on tühi või täidetud mõne teise auru või gaasiga, küll aga oleneb sellest aurustumise kiirus, mis on tühjas ruumis märksa suurem.

1. Vesi on poorses savianumas ümberolevast õhust jahedam. Mispärast?
2. Kui palju näitab baromeeter 20° juures vähem, kui baromeetri torus on niiskust?
3. Jäämäed meres on sageli ümbritsetud uduga. Mispärast?
4. Seletada, millest tuleb järvede ja soode auramine (udu)!

Küllastunud veeauru rõhk (p_{mm} Hg) ja küllastav niiskus $\left(A\ \frac{g}{m^3}\right)$ mitmesuguses temperatuuris (t^0).

t	*p*	*A*	*t*	*p*	*A*	*t*	*p*	*A*	*t*	*p*
—5	3,01	3,24	+6	7,0	7,3	+17	14,5	14,5	50	35,
—4	3,28	3,51	7	7,5	7,8	18	15,5	15,4	60	149,2
—3	3,57	3,81	8	8,0	8,3	19	16,5	16,3	70	038,9
—2	3,88	4,13	9	8,6	8,8	20	17,5	17,3	80	235,3
—1	4,22	4,47	10	9,2	9,4	21	18,7	18,3	90	529,9
0	4,58	4,84	11	9,8	10,0	22	19,8	19,4	95	634,4
+1	4,9	5,2	12	10,5	10,7	23	21,1	20,6	98	707,0
2	5,3	5,6	13	11,2	11,4	24	22,4	21,8	99	733,0
3	5,7	6,0	14	12,0	12,1	25	23,8	23,0	99,5	746,2
4	6,1	6,4	15	12,8	12,8	30	31,8	—	100	760,4
5	6,5	6,8	16	13,6	13,6	40	54,9	—	105	906,5

70. Õhu niiskus ja selle määramine. Vabalt veepinnalt, nagu mered, järved, jõed jne., aurustub vahet pidamatult vett (niiskust) õhku. Seepärast on õhus alati suuremal või väiksemal määral veeauru. Lihtsad katsed näitavad, et see on tõepoolest nõnda: kloorkaltsium imeb endasse õhus olevat veeauru ja läheb seetõttu varsti märjaks; kallame soojas toas väljastpoolt hästi ärakuivatatud veeklaasi külma vett, siis läheb klaas väljastpoolt niiskeks; aknad „higistavad" jne. **Õhu absoluutseks niiskuseks** nimetatakse ühes kuupmeetris olevat veeauru hulka, mõõdetud grammides, **relatiivseks niiskuseks** aga absoluutse niiskuse suhet küllastava niiskusega, s. o. antud ruumis oleva veeauru hulga suhet selle veeauru hulgaga, mis samas temperatuuris seda ruumi küllastaks.

Tegelikus elus on suure tähtsusega õhu relatiivse niiskuse teadmine, sest sellest oleneb, kas antud temperatuuris veeauru õhku veel mahub või mitte, s. o. õhu „kuivus“ harilikus mõttes.

Relatiivset niiskust võime leida absoluutse niiskuse abil. Kui näiteks teame, et 20^0 juures on õhu absoluutne niiskus 8,65 $\frac{g}{m^3}$, siis on relatiivne niiskus $\frac{8,65}{17,3}$ ehk $\frac{1}{2}$, sest ülaltoodud tabelist leiame, et 20^0 juures mahub 1 m^3 õhusse 17,3 g küllastunud veeauru. Harilikult väljendatakse relatiivne niiskus %-des (meie juhul $^1/_2$ ehk 50%); siis näitab relatiivne niiskus küllastuse määra, s. o. mitu % moodustab õhus juba olemas olev veeauru hulk sellest, mis sinna antud temperatuuris maksimaalselt mahuks.

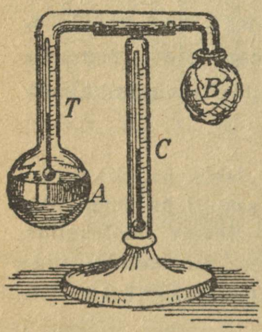
Kõige lihtsam on õhu relatiivset niiskust leida nn. kastepunkti meetodi abil. Me teame, et gaasi, samuti ka auru rõhk antud temperatuuris oleneb antud ruumalas olevate molekulide hulgast, sest auru rõhk pole muud kui üksikute molekulide tõugete summa. Sellest järgneb, et absoluutne niiskus on võrdeline auru rõhuga ja seetõttu

$$\text{rel. niiskus} = \frac{\text{olemasoleva veeauru rõhk}}{\text{küllast. veeauru rõhk samas temp.}}.$$

Suhte teise liikme leiame sellekohasest tabelist, kuna suhte esimene liige tuleb määrata katseliselt igal juhul eraldi. Selleks leiame nn. kastepunkti, s. o. temperatuuri, milleni tuleks jahutada õhku, et temas olev veeaur küllastuks. Olgu näiteks toa temp. 18^0. Jahutame sileda läikiva välispinnaga anumat (hõbetatud või kullatud klaas jne.), milles on kas jäävesi või mõni kiiresti auruv vedelik (eeter), niikaua, kui läikivale pinnale tekib õhuke kastekord ja ta muutub tuhmiks. Olgu seejuures anuma temperatuur 12^0. Anuma jahtudes jahtub ühtlasi ka ta seintega kokkupuutuv õhk ja veeaur; seejuures ei muutu jahtunud veeauru rõhk, sest ta (jahtunud aur) on otseses kokkupuutes ümberoleva veeauruga. Seepärast võime õhus oleva veeauru rõhku 18^0 juures lugeda niisama suureks kui küllastunud veeauru rõhku 12^0 juures. Viimase suuruse leiame tabelist; ta võrdub 10,5 mm. 18^0 juures aga on küllastunud veeauru rõhk 15,5 mm. Seega siis on otsitav relatiivne niiskus

$$\frac{10,5}{15,5} = 0,677 \text{ ehk } 67.7\%.$$

Tervishoiuliselt on meil kõige soodsam, kui õhu relatiivne niiskus on 50—60%, seepärast tuleb tähele panna relatiivset niiskust haigemajades, elutubades jm. Ka kasvuhooneis peab valitsema taimekasvule paras relatiivne niiskus. Relatiivsest niiskusest oleneb suurel määral ka sademete tekkimise võimalus.



Joon. 69. Danielli hügromeeter.

71. Hügromeetrid. Riistu, mille abil määratakse õhu niiskuse suurust, nimetatakse **hügromeetreiks**.

Joon. 69 kujutab nn. **Danielli** hügromeetrit, mis koosneb toruga ühendatud klaaskeradest *A* ja *B*. Kera *B* on tühi ja kaetud võrkriidega (marliga), kuna kera *A* on umbes pooleni täidetud eetriga, mille temperatuuri näitab termomeeter *T*. Kera *A* välispinna keskmine osa on kullatud. Danielli hügromeetri abil on võimalik määrata kastepunkti, mis toimub järgmiselt. Klaaskerale *B* tilgutatakse senikaua eetrit, kui kera *A* kullatud pinnale **hakkab ilmuma** tuhm niiskuskord, ning siis otsekohe märgitakse üles termomeetri *T* näitamine keras *A*. Saadud temperatuur ongi otsitav nn. kastepunkt, mille põhjal võime arvutada õhu relatiivse niiskuse. Täpsemaks kastepunkti määramiseks on soovitav üles tähendada termomeetri *T* näitamine tuhmi korra tekkimise alguses ja ärakadumise lõpul ning võtta kastepunktiks saadud temperatuuride aritmeetiline keskmine.

Seletada, kuidas mõjub eetri tilgutamine kerale B eetri temperatuuri muutumisele keras A! Misjaoks on termomeeter tulbal C? Kas ei võiks tarvitada eetri asemel Danielli hügromeetris mõnd teist vedelikku? Katsuda määrata ligikaudu kastepunkt, lund järjest veeklaasi lisandades, seni kui klaasi välispinnale hakkab tekkima „higi"!

Niiskushulga suurenemist ja vähenemist õhus vaadeldakse nn. niiskusenäitajate ehk hügroskoopide abil.

Kirjeldada juushügroskoobi ehitust!

1. Kuidas on võimalik tarbekorral õhu relatiivset niiskust toas suurendada?

2. Klassi ($9 \cdot 6 \cdot 4$ m^3) õhu relatiivne niiskus 16^0 juures on 70%. Kui palju kaalub kogu klassis olev veeaur?

3. Mitu kuupmeetrit ruumi on võimalik küllastada 10^0 juures 141 g vee arvel?

4. 15^0 juures on õhu relatiivne niiskus 65%. Leida absoluutne niiskus!

5. 18^0 juures on toaõhu relatiivne niiskus 75%. Leida kastepunkt ja veeauru rõhumine!

6. Õhus 25^0 juures olev niiskuse hulk suudaks küllastada selle õhu 14^0 juures. Leida relatiivne niiskus!

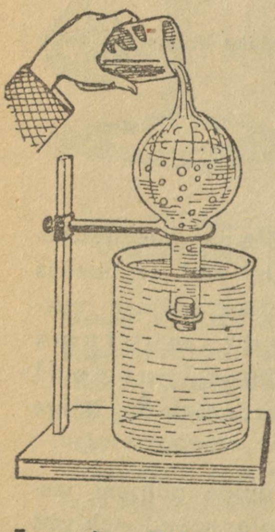
Keemine.

72. Keemisnähtus ja -seadused. Võtame keedupudelisse vett ja hakkame seda soojendama. On vesi segunedes 100^0 soojaks saanud, siis hakkab ta edaspidisel soojuse juurdevoolamisel **keema**, s. o. kiiresti auruks muutuma ehk auruma, kusjuures aurumullikesed tekivad igal pool vee sees, iseäranis seal, kus soojuse juurdevool on kõige tugevam.

Enne vee täieliku keemise algust on kuulda põhjast iseäralist kihinat. Soojuse tugeva juurdevoolu mõjul tekivad põhjas aurumullikesed, kuid veidi kõrgemale tõustes jahtuvad nad ja surutakse kokku õhu ning vee rõhumise mõjul. Alles siis, kui kogu vesi on jõudnud keemistemperatuurini, võrdub küllastunud veeauru rõhk õhurõhuga ja mullikesed tõusevad vabalt veepinnale. Seepärast võime täpsemalt vee **keemistemperatuuriks (keemispunktiks) nimetada seda temperatuuri, mille juures küllastunud veeauru rõhk võrdub välisrõhuga.**

Vee, samuti ka teiste vedelikkude keemisel kehtivad korrapärasused on sarnased tahkete kehade sulamisel tähelepandud korrapärasustega, nimelt:

1) **iga vedelik hakkab keema kindlal, sellele kehale omasel keemistemperatuuril;**



Joon. 70. Rõhu vähenedes langeb keemistemperatuur.

2) **keemistemperatuur on ühesugune veeldumistemperatuuriga;**

3) **keemine kestab niikaua, kuni soojust juurde tuleb;**

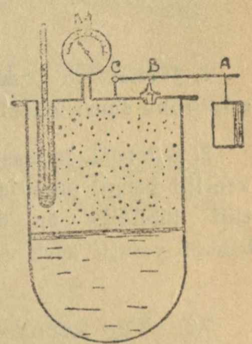
4) **kogu keemise kestel on temperatuur jääv.**

Katsed näitavad, et vedeliku temperatuur keemisel oleneb teataval määral anumast, milles vedelik keeb (anuma aine ja sisepinna puhtus). Kuid keeva vedeliku kohal oleva küllastunud auru temperatuur on alati jääv, kui ei muutu rõhumine, mille all on keev vedelik. Seepärast määratakse vedeliku keemistemperatuur keevast vedelikust tekkinud auru abil, mis on vedeliku kohal.

73. Keemistemperatuuri olenevus rõhust. Küllastunud auru rõhk suureneb temperatuuri tõustes. Vee keemise katses nägime, et keemistemperatuuris võrdub küllastunud auru rõhk vedeliku välisrõhuga. Sellest järeldub, et *vedeliku keemistemperatuur peab tõusma rõhu suurenedes ja ümberpöördult.*

Et rõhu vähenedes näiteks vee keemistemperatuur märksa langeb, on kerge näidata järgmise katse abil.

Võtame keedupudeli, täidame umbes pooleni veega ja ajame keema. Laseme mõne minuti keeda, nii et aur keedupudelist endaga kõik õhu kaasa viiks ja keedupudelis oleks vee kohal ainult aur. Nüüd korgime keedupudeli kõvasti kinni, pöörame ümber ja pistame kaela otsapidi vee alla (joon. 70). Keemine jääb kohe seisma, sest lõppes soojuse juurdevool. Temperatuur langeb varsti alla keemistemperatuuri. Külma vett peale kallates jahutame keedupudelis olevat auru, millest osa veeldub; selle läbi väheneb auru rõhumine vee peale ja vesi hakkab uuesti keema. Lume või jää abil tublisti jahutades võime sedaviisi vee keemistemperatuuri kuni kolme-, neljakümne kraadini alla viia.



Joon. 71. Papin'i katel.

Vesi keeb 100^{0} juures ainult siis, kui õhurõhk on normaalne (76 cm). Maapinnast kõrgemal väheneb kord-korralt õhurõhk, järelikult ka keemistemperatuur. Nii näiteks keeb Ecuadoris Quito linnas vesi 90^{0} juures, Mont Blanc'i tipus 84^{0} juures jne.

Välisrõhu suurendamisel tõuseb keemistemperatuur. Selle täpseks uurimiseks tarvitatakse nn. *Papini katelt* (joon. 71), mis on tugevate seintega kinnine katel, varustatud termomeetri ja manomeetriga.

Täpsed mõõtmised annavad järgmise keemistemperatuuri (t^0) olenevuse rõhust $\left(\frac{kG}{cm^2}\right)$:

p	t	p	t	p	t	p	t
1	99	6	158	11	183	16	200
2	119	7	164	12	186	17	203
3	132	8	169	13	190	18	206
4	142	9	174	14	194	19	209
5	151	10	179	15	197	20	211

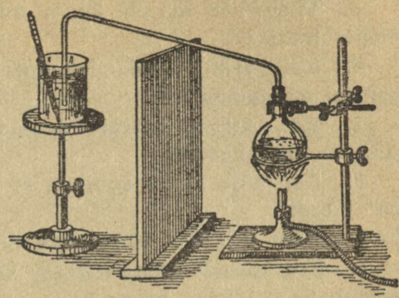
1. Joonestada graafik, mis näitab vee keemistemperatuuri muutumist rõhu suurenedes!

2. Seletada, kuidas töötab Papini katla kaitseventiil! Oletame, et ventiili kangil punktis *A* rippuv koormis kaalub 1 kG ja kaitseventiili läbilõige on 0,2 cm^2. Mitme-atmosfäärilise rõhu juures hakkab ventiil auru välja laskma?

74. Vee keemissoojus ja selle määramine. Soojushulka, mis läheb vaja, et 1 g antud ainet keemistemperatuuris vedelast olekust auruks muuta, nimetatakse selle aine **keemissoojuseks.** Et keemisel kulunud soojus võrdub täpselt selle soojushulgaga, mis veeldumisel vabaneb, siis mõõdetakse esimest viimase abil.

Selleks juhitakse keeva vee auru kõvera toru kaudu kalorimeetrisse (joon. 72). Olgu kalorimeetris katse alguses 400 g vett 16^0 juures. Kui tükk aega lasta kalorimeetrisse auru, tõuseb vee temperatuur; olgu see $56{,}5^0$ ja kalorimeetris oleva vee mass 428 g. Saadud andmeist arvutame vee keemissoojuse.

Kalorimeetrisse tuli 428 g — 400 g, s. o. 28 g vett juurde, millest järeldame, et veeldus 28 g 100^0-st veeauru. Seejuures pidi auru veeldumisel vabanema 28 x kalorit soojust, kui tähistada x-ga vee keemissoojust 100^0 juures. Edasi auru veeldumisest tekkinud vesi jahtus $(100—56{,}5)^0$ võrra ja andis ära $(100—56{,}5) \cdot 28$ kalorit soojust. Vesi kalorimeetris soojenes $(56{,}5—16)^0$ võrra ja sai seega juurde $400 \cdot (56{,}5—16)$ kalorit soojust. Et vesi kalorimeetris soojenes ainult auru veeldumisel vabanenud soojuse ja veeldumisest tekkinud vee jahtumise arvel, siis saame x-i leidmiseks võrrandi



Joon. 72. Vee keemissoojuse määramine.

$$28\,x + (100 - 56{,}5)28 = 400(56{,}5 - 16),$$

millest $x = 535$ kalorit.

Täpsete mõõtmiste järgi on vee keemissoojus **540** kalorit grammi kohta normaalrõhu puhul.

Keemistemperatuurid ja -soojused.

Aine	Keemistemperatuur	Keemissoojus	Aine	Keemistemperatuur	Keemissoojus
Bensiin . .	90—110	92,9	Petrooleum	110—120	75
Eeter . . .	35	85	Piiritus . .	78	216
Elavhõbe .	357	69	Tärpentiin .	159	74
Hapnik . .	—183	51	Vesi	100	540
Lämmastik.	—194	48	Vesinik . .	—252,5	114

1. Mis vahe on keemise ja aurustumise vahel?

2. Kui palju vabaneb soojust 50 g veeauru veeldumisel keemistemperatuuris?

3. Mispärast mõjub kuum aur põletavamalt kui vesi samas temperatuuris?

4. Kui palju on keemistemperatuur S.-Munamäe otsas madalam kui merepinnal?

5. Kas saavad suurel tulel keetes munad rutem keenuks kui väikesel tulel keetes?

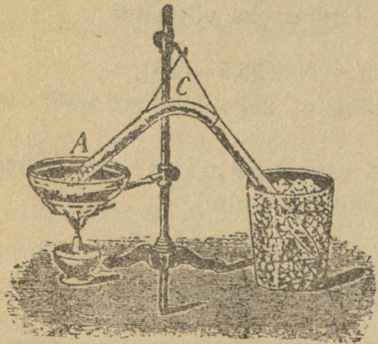
6. Kui palju kulub soojust, et 100 g —5°-st jääd auruks muuta 100° juures?

7. Mitu g jääd —10° juures sulatab ära 15 g 100°-st veeauru?

8. Kui kõrgele tõuseb 250 g 15°-se vee temperatuur, kui temas veeldub 10 g 100°-st veeauru?

9. Mitu kg 100°-st veeauru peab juhtima 3 kg —10°-se jää ja 5 kg 15°-se vee segusse, et segu lõpptemperatuur oleks 60°?

75. Gaaside veeldumine ja kriitiline temperatuur. Küllastumata auru kohta kehtivad Boyle-Mariotte'i ja Gay-Lussac'i seadused, kuid küllastunud auru kohta mitte. Nii näiteks, kui suurendada küllastunud auru rõhku, ei vähene auru ruumala vastavalt Boyle-Mariotte'i seadusele, vaid osa auru veeldub; samas mõttes mõjub ka temperatuuri langemine. Ruumala suurenedes või temperatuuri tõustes aga kaob küllastunud olek ja me saame küllastumata auru, mis allub Boyle-Mariotte'i ja Gay-Lussac'i seadustele.



Joon. 73. Gaaside veeldumine.

Küllastumata auru võime kergesti rõhu suurendamise (ruumala vähendamise) või temperatuuri langemise abil küllastuseni viia ja siit edasi samade võtete abil veeldumiseni. Et gaasid ja küllastumata aur alluvad samadele korrapärasustele, siis näib olevat loomulik, et gaasegi on võimalik veeldada, tarvitades selleks suurt rõhku ja madalat temperatuuri. Tõepoolest sel teel läkski Faraday'l (1791—1867) korda veeldada peaaegu kõiki temale tuntud gaase. Faraday korraldas oma gaaside veeldamise katsed järgmiselt.

Tugevate seintega kinnise klaastoru (joon. 73) ühte otsa (A) on pandud ainet (näiteks kloorhüdraati), millest kuumutamisel tekib uuritav gaas (kloor). Toru teine ots asetatakse jahutavasse segusse. Toru kuumutamisel tekib gaas, rõhk järjest suureneb ja suure rõhu all ning madalas temperatuuris olev gaas veeldub toru teises otsas.

Tarvitades parajat rõhku ja temperatuuri, läks dr. Andrews'il korda veeldada ka süsihappegaasi. Seejuures pani ta tähele, et niikaua kui süsihappegaasi temperatuur oli alla 30,9°, oli võimalik süsihappegaasi veeldada, suurendades vajalisel määral rõhku; tõusis aga temperatuur üle 30,9°, siis ei olnud see enam võimalik kuitahes suure rõhu puhul. Temperatuuri 30,9° nimetatakse seepärast süsihappegaasi kriitiliseks temperatuuriks. Hilisemate täpsemate mõõtmiste järgi on süsihappegaasi kriitiliseks temperatuuriks 31,1°. Allpool kriitilist temperatuuri on süsihappegaasil küllastumata auruga ühine omadus — veelduda rõhu suurendamisel, kuna ülalpool kriitilist temperatuuri ainult rõhust ei jätku süsihappegaasi veeldumiseks.

Samas mõttes tarvitatakse kriitilise temperatuuri mõistet ka teiste gaaside kohta.

Igal gaasil on oma kriitiline temperatuur. Nii näiteks on eetri kriitiliseks temperatuuriks —194° C, vee —374°, hapniku —119°, lämmastiku —147° jne. Siit näeme, et nn.

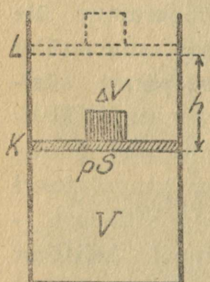
permanentsed gaasid (hapnik, lämmastik jt.) erinevad nn. aurudest (eeter, vesi jne.) ainult selle poolest, et nende kriitiline temperatuur on väga madal, võrreldes meie hariliku temperatuuriga. Seepärast pole ka võimalik nn. permanentseid gaase ainult rõhumisega veeldada. Kokkuvõttes võime aine olekud järjestada järgmiselt:

tahke | vedel | gaasiline (aur | gaas)

sulamis- temper. | keemis- temper. | kriitiline temper.

Gaasi ja auru töö.

76. Gaasi töö paisumisel. Jääva rõhu all oleva gaasi või auru ruumala temperatuuri tõustes suureneb — gaas või aur paisub ja teeb seejuures tööd. Olgu näiteks silindris eraldatud teatud hulk gaasi ruumalaga $V cm^3$ (joon. 74). Seejuures gaasi jääv rõhk on $p \left| \frac{\text{düün}}{\text{cm}^2} \right.$ ja silindri ristilõige $S cm^2$. Juhul kui silindrisse suletud gaasi temperatuur tõuseb, hakkab gaas paisuma ja kolb nihkub asendist K asendisse L, s. o. tõuseb $h cm$ võrra. Et kolvi liikumine toimub gaasi rõhumise suunas, siis gaasi rõhumine teeb tööd. Selle töö hulga A arvutamiseks korrutame kolvile toimuva rõhumise suuruse pS düüni kolvi edasinihkumise suurusega ($h cm$). Saame



Joon. 74. Gaasi töö paisumisel.

$$A = pSh \text{ ergi.}$$

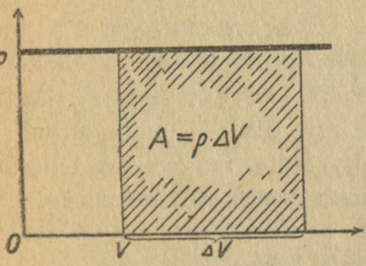
Et korrutis Sh mõõdab gaasi ruumala suurenemist ($\Delta V cm^3$) paisumisel, siis võime eelmise valemi ümber kirjutada nõnda:

$$\mathbf{A = p \cdot \Delta V},$$

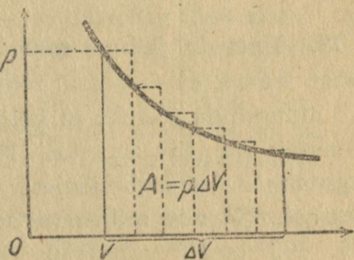
s. o. gaasi töö paisumisel jääva rõhu juures võrdub rõhu (p) ja ruumala suurenemise (Δ V) korrutisega. Tahame, et töö väljenduks ergides, tuleb rõhk väljendada $\frac{\text{düün}}{\text{cm}^2}$-tes ja ruumala suurenemine cm^3-tes. Näiteks, kui $p = 12 \frac{\text{düün}}{\text{cm}^2}$ ja $\Delta V = 5\ cm^3$, siis sel juhul gaasi töö $A = 12 \cdot 5 = 60$ ergi.

Tahame aga saada tööhulka kGm-tes, tuleb rõhk p väljendada tehnilistes atmosfäärides ja ruumala suurenemine Δ V detsiliitrites. Tõepoolest, $1 \frac{\text{kG}}{\text{cm}^2} \cdot 0{,}1\ dm^3 = 1 \frac{\text{kG}}{\text{cm}^2} \cdot 100\ cm^3 =$ $= 1$ kG. 100 cm $= 1$ kG. 1 m $= 1$ kGm.

Muidugi gaas teeb paisumisel tööd ka mittejääva rõhu juures. Tehtud tööhulga arvutamiseks sel juhul tuleb arvestada rõhu muutust. Seda on kõige lihtsam teha graafiliselt.



Joon. 75. Gaasi töö jääva rõhu juures.



Joon. 76. Gaasi töö muutuva rõhu juures.

77. Gaasi töö graafiline väljendus. Gaasi paisumise tööd valemi $A = p \Delta V$ põhjal on hõlpus kujutada graafiliselt. Selleks märgime rõhtteljele ruumala ja püstteljele vastavad rõhu väärtused. Jääva rõhu puhul kujutab rõhu muutuse käiku ruumala muutudes sirge, mis on rööpne rõhtteljega (joon. 75). Paisumisel tehtud töö hulka A kujutab sel juhul ristküliku pindala, mis on moodustatud ruumala alg- ja lõppordinaadiga, abstsissteljega ja rõhu muutumise käiku kujutava sirgega.

Juhul, kui ruumala muutudes muutub ka rõhk, kujutab rõhu muutuse käiku kõverjoon, nagu me seda nägime Boyle-Mariotte'i seadust kujutava graafiku puhul (joon. 76).

Gaasi paisumisel tehtud tööhulga arvutamiseks jagame kogu ruumalamuutuse vahemiku väikesteks võrdseteks osadeks ja loeme rõhu iga sellise väikese ruumalamuutuse kestes jäävaks. Siis saame rakendada jääva rõhu puhul kehtivat valemit ($A = p\Delta V$). Liites kõik need väikesed tööelemendid, saame summas kogu paisumise töö, mida graafiliselt kujutab pindala rõhu muutumist kujutava kõvera, rõhttelje ja alg- ning lõppordinaatide vahe.

Et küllastumatu aur käitub üldiselt samuti kui gaaski, siis on eelmised mõttekäigud kehtivad ka küllastumatu auru kohta. Kooskõla on seda täielikum, mida kaugemal on aur küllastusolekust.

78. Energia jäävus mehaanilistes protsessides. Mehaanikast teame, et mehaanilistes protsessides üks energia liik võib muunduda teiseks ja kõigi energia liikide summa antud protsessis on jääv suurus. Näiteks keha langemisel tema potentsiaalne energia järjest väheneb ja kineetiline energia suureneb. Nende mõlemate summa aga on antud protsessis jääv. Nii omab teraskuul lihvitud klaasalusele langedes ainult kineetilist energiat. Põrgates vastu alust, muudab kuul oma liikumissuuna otse vastupidiseks ja kineetiline energia hakkab uuesti muunduma potentsiaalseks. Kuul tõuseb enam-vähem samale kõrgusele, millest varem algas langemine, ja nähtus kordub endisel viisil. Samalaadne nähtus toimub ka pendli võnkumisel.

Kuid mehaanilise energia jäävus mehaanilistes protsessides on kehtiv eeldusel, et kõik need protsessid toimuvad i l m a h õ õ r d u m i s e t a. Kuna aga kõik mehaanilised protsessid on seotud hõõrdumisega, siis osa mehaanilisest energiast kulub hõõrdumise ületamiseks ja tegelikult mehaanilise energia summa antud protsessis järjest väheneb. Selle asemele aga tekib hõõrdumise tulemusena soojusenergiat.

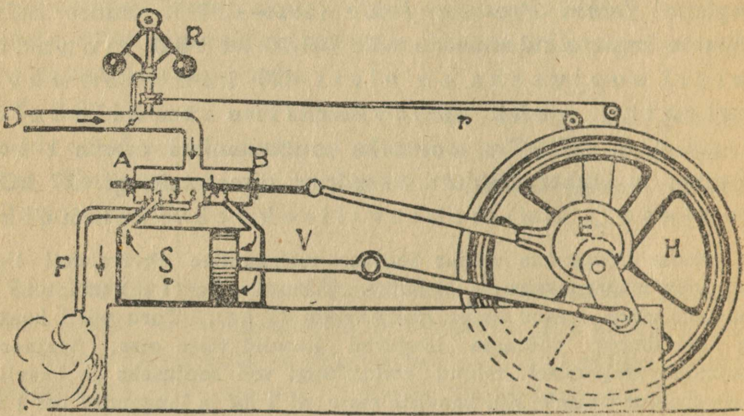
79. Soojuse mehaaniline ekvivalent. Me teame, et mehaaniline töö võib muunduda soojuseks. Täpsema seose kulutatud tööhulga ja sellest tekkinud soojushulga vahel leidsid esimestena sakslane *Robert Mayer* (1814—1878) ja inglane *James Prescott Joule* (1818—1889). Suure hulga täpsete katsete tulemusena võib öelda, et töö muundumisel soojuseks on alati 427 kGm tööd ekvivalentne ehk ühevääriline 1 kilokaloriga, s. o. 427 kGm soojuseks muundamisel saame 1 kcal soojust ja ümberpöördult. Seepärast nimetataksegi 427 kGm soojuse (1 kcal) mehaaniliseks ekvivalendiks.

Üheks lihtsamaks viisiks soojuse mehaanilise ekvivalendi ligikaudseks määramiseks on järgmine. Võtame pika (1 m) papptoru ja asetame sinna teatud hulga tinahaavleid (1 kg). Toru püsti hoides ja äkki ümber pöörates langevad haavlid teise otsa. Seejuures muundub langemisel tehtud raskustungi töö soojuseks ja haavlite temperatuur tõuseb. Kui haavlite mass oli 1 kg ja langemise tee 1 m, siis igakordsel toru ümberpööramisel tehtud töö hulk on 1 kgm. Mõõtes ära haavlite alg- ja lõpptemperatuuri, võime neist andmeist arvutada tekkinud soojushulga, ja võrreldes seda tehtud tööhulgaga — soojuse mehaanilise ekvivalendi.

Näiteks 30-korralise ümberpööramise puhul on tehtud töö hulk 30 kGm. Kui seejuures haavlite temperatuur tõuseb 2,1 kraadi, siis on tekkinud soojushulk $1 \cdot 2{,}1 \cdot 0{,}03 = 0{,}063$ kcal ja soojuse mehaaniline ekvivalent $30 : 0{,}063 = 476 \frac{\text{kGm}}{\text{kcal}}$.

80. Aurumasin. Soojusenergia tööks muundamisel kasutame aurumasinat. Aurumasina katlas muutub soojusenergia kuuma auru potentsiaalseks energiaks, mis paisudes paneb liikuma kolvi aurumasina silindris. Kuidas see toimub, selgub järgmisest skeemist.

Toru D mööda juhitakse aur katlast aurukarpi AB, millest väljuvad kolm toru: torud 1 ja 3 ühendavad aurukarpi aurusilindriga S, toru 2 kaudu juhitakse läbitöötatud aur masinast välja. Aurukarbis liigub tihedalt edasi-tagasi jaotaja *J*, ühendades kord 1., kord 3. toru kaudu aurukarpi aurusilindriga. Silindris *S* liigub tihedalt edasi-tagasi kolb.

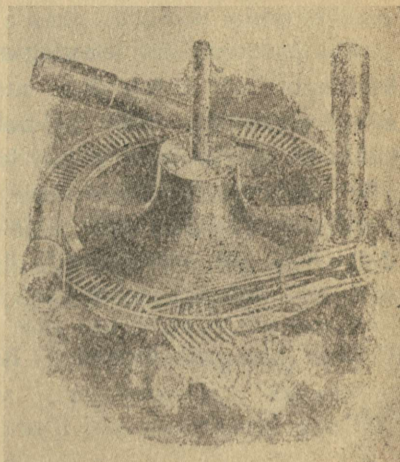


Joon. 77. Aurumasina skeem.

Joonisel kujutatud asendis tuleb aur katlast, tungib paremale poole kolvi taha ja rõhub teda vasakule poole. Silindris vasakul pool kolbi olev aur läheb jaotaja alt toru 2 kaudu välja. On kolb jõudnud silindri vasakusse otsa, nihkub jaotaja niivõrra paremale poole, et ta toru 3 kinni katab ja toru 1 kaudu aurukarpi silindriga ühendab. Nüüd tungib katlast tulev aur vasakule poole kolvi taha ja rõhub selle paremale poole silindri otsa, kuna kolvi taga olev aur endist viisi toru 2 kaudu masinast välja juhitakse. Kolvi edasi-tagasi liikumised antakse väntade abil hoorattale edasi, teda pöörlema pannes. Hoorattal käib rihm, mis masinaid ümber veab.

Jaotaja edasi-tagasi nihkumine toimub automaatselt hooratta võlli külge kinnitatud nn. ekstsentriku *E* abil. Auru silindrisse pääsemist reguleerib toru *D* küljes olev tsentrifugaalregulaator *R*, mis on rihma *r* abil hooratta võlliga ühendatud. Hakkab hooratas kiiremini käima, tõusevad regulaatori *R* kerakesed kõrgemale, seega ühtlasi torus *D* olevat plaati rohkem risti asetades. Pääseb aga katlast vähem auru silindrisse, väheneb aururõhk ja hooratas hakkab aeglasemalt käima. Hooratta aeglasema käigu puhul mõjub regulaator vastupidiselt.

Esimese seda laadi aurujaotaja ehitas inglane James Watt a. 1765.



Joon. 78. Auruturbiin.

Auruturbiinide abil muudetakse tööks kuuma auru kineetilist energiat. Aurukatlast suure kiirusega (umbes 1000 m/sek) väljavoolav aur juhitakse otseselt töötava ratta kühvlitele, milledele ta oma kineetilise energia edasi annab ja ratta pöörlema paneb.

81. Aurumasina töö. Auru tööd aurumasina silindris kolvi ühe täiskäigu juures võime arvutada diagrammi põhjal, mis näitab sellele vastavat aururõhu muutumise käiku. See töö toimub katlast saadud soojusenergia arvel.

Kolvi edasi-tagasi liikumine kandub väntade abil edasi hooratta võllile ja paneb ta pöörlema. Hooratta võllist saadav töö ongi see, mida me kasulikult rakendada saame. Selle põhjal arvutatud aurumasina võimsus kannab efektiivse võimsuse nime, kuna eespoolmainitud rõhudiagrammi põhjal arvutatud võimsust nimetatakse indikatoorseks võimsuseks. Efektiivne võimsus on umbes 90% indikatoorsest võimsusest.

82. Aurumasina kasutegur. Mõne masina või riista kasuteguri all mõeldakse masinast saadud energiahulga suhet kogu tema töös hoidmiseks ära tarvitatud energiahulgasse. Aurumasina puhul juhime katlasse keemilist energiat kütte näol. Kütte energiasisaldavust hindame tema kütteväärtuse abil. Selle all mõeldakse kilokalorites saadud soojushulka 1 kg kütteaine täielikul ärapõlemisel, s. o. ühinemisel hapnikuga CO_2-ks. Nii on bensiini küttevääartus $11\,000\ \frac{kcal}{kg}$, petrooleumi — $10\,500\ \frac{kcal}{kg}$, puu (õhukuiva) — $3000\ \frac{kcal}{kg}$ jne.

Esimeseks suureks energia kaotuseks aurumasina juures on see, et kogu katla koldes põlemisest tekkinud soojus ei lähe mitte katlasolevasse vette, vaid suur osa sellest (ligi 25%) läheb korstna kaudu õhku. Edasi katlasse üleläinud soojusest suurem osa läheb äratarvitatud auruna jahutajasse, kuna ainult võrdlemisi väike osa muundub kasulikuks tööks.

Olgu näiteks katla koldes ära põletatud 10 kg puitu küttevääartusega 3000 kcal/kg. Siis vabaneb sellest kokku $10 \cdot 3000$ ehk 30 000 kcal soojust. Kui seejuures aurumasin tegi nimetatud kütteaine arvel 1 921 000 kGm kasulikku tööd, siis on selle aurumasina kasutegur

$$\frac{1\,921\,000 \cdot 100}{427 \cdot 30\,000} \text{ ehk } 15\%.$$

Nagu näeme, on aurumasina kasutegur võrdlemisi väike. Täielikumad aurumasinad muudavad tööks praegusel ajal ainult ~17% kütteainest tekkinud soojusest, kuna paremal juhul see protsent võiks tõusta 25-ni. Harilikud vedurid ja lokomobiilid ei muuda tööks läbisegi rohkem kui 8—12%. Eelmised andmed on õiged madalarõhuliste aurumasinate kohta. Kõrgerõhulistel aurumasinatel (60 at ja enam) on kasutegur suurem (~25%).

Võrdlemisi väikese soojusenergia tööks muundumise % põhjuseks ei ole niivõrra masinate puudulik ehitus, kui loodusseadus, mis ütleb: **kõigil energia liikidel on kalduvus muunduda soojuseks, mis püüab levida ühtlaselt maailmaruumis.** Soojuse muundamine tööks masinate abil käib selle looduse kalduvuse vastu. Seepärast võimaldab meile loodus muundada soojust tööks ainult siis, kui niiöelda vastutasuks toimub sellega ühtlasi soojuse liikumine kõrgema temperatuuriga kehadest madalama temperatuuriga kehadesse (aurukatlast jahutajasse või õhku), mis aitab kaasa soojuse ühtlasele levimisele maailmaruumis.

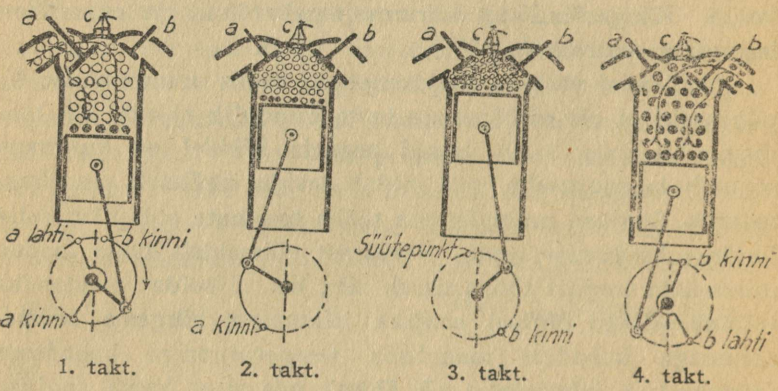
L e p p e k ü t e. Soojushulk, mida annavad kütteained, on erinev. Doni kivisüsi annab 1 kg kohta 7000 kcal, kuivpuu ja turvas — 3150, nafta — 10 000, põlevkivi umbes 1500 kcal. Kütteaine ühikuks võetakse kokkuleppe alusel doni söe kütteväärtus, s. t. 1 t doni sütt = 1 t leppekütet, 1 t naftat = 1,43 t leppekütet, 1 t põlevkivi = 0,2 t leppekütet jne.

83. Plahvatusmootor. Nagu nägime, on aurumasina kasutegur võrdlemisi väike. Ka on aurumasinad liiga rasked, et neid saaks kasutada näiteks autode või lennukite liikumapanemiseks. Hoopis paremad selleks otstarbeks on nn.

p l a h v a t u s m o o t o r i d. Siin on praegusaja tehnikas jõudud juba nii kaugele, et ühe hobusejõu kohta tuleb ainult 0,5 kG mootori kaalu. Sellepärast on plahvatusmootorid eriti levinud liiklemistehnikas (auto, lennuk jt).

Plahvatusmootorites tarvitatakse peamiselt vedelat kütet (bensiin, petrool, piiritus jt.) või põlevat gaasi (puugaasigeneraator). See süüdatakse mootori silindris ja sellest tekkinud kuumad gaasid panevad liikuma kolvi.

Vaatleme lähemalt nn. n e l j a t a k t i l i s e m o o t o r i töökäiku.



Joon. 79. Neljataktilise mootori töökäik.

1. takt. Kolb liigub silindri põhjast eemale. Gaasi sisselaskev klapp (ventiil) a avaneb ja gaasi väljalaskev klapp b on kinni. Põletusaine tungib silindrisse.

2. takt. Kolb liigub tagasi silindri põhja poole (mõlemad klapid on kinni) ja surub kokku põletusaine.

3. takt. Mõlemad klapid on kinni. Kokkusurutud gaas süüdatakse küünla c abil. Sellest tekkinud kuum gaas surub tugeva hooga kolvi silindri põhjast väljapoole.

4. takt. Kolb liigub silindri põhja poole ja surub plahvatusproduktid avatud klapi b kaudu silindrist välja.

Edaspidised kolvi käigud toimuvad endises järjekorras. Nagu näha, saab siin kolb kahe edasi-tagasi käigu jooksul plahvatavast gaasist ainult ühe töövõimsa tõuke. Selle töö arvel toimubki kogu plahvatusmootori töö, järelikult ka kolvi liikumine ühe tööperioodi ülejäänud kolme takti kestel. Hooratas on siin akumulaatoriks, mis kogub endasse osa 3. takti jooksul tehtud tööst ja mille kulul toimub ka kolvi liikumine ülejäänud kolme takti jooksul.

Plahvatusaine süütamine toimub elektrisädeme abil nn. süüteküünlas (c). Sisselaske ja väljalaske ventiilide (klappide) avamine ning sulgemine toimub automaatselt erilise seadeldise abil.

Plahvatusmootori kasutegur on harilikult 20—30%, seega keskmiselt tunduvalt suurem aurumasina kasutegurist.

84. **Diiselmootor.** Diiselmootori nime all tuntud plahvatusmootoris kasutatakse kütteainena odavaid raskeid õlisid (nafta). Diiselmootoris surutakse õhk 30—35 atmosfäärini kokku, kuhu siis erilise pumba abil pritsitakse põletusaine. Õhu kokkusurumisel tehtud töö arvel tõuseb õhu temperatuur niivõrd kõrgele (kuni 600° C), et plahvatav segu süttib, mistõttu siin pole vaja erilist süüteseadeldist. Seega toimub põlemine diiselmootoris kõrge rõhu, 30—35 atm. juures, kuna tavalises plahvatusmootoris toimub põlemine 4—5 atm. juures. Kõrge süütetemperatuuri tõttu võibki diiselmootoris kasutada raskesti auruks muutuvaid õlisid. Diiselmootorid ehitatakse tavaliselt suure võimsusega ja neid kasutatakse laevadel, vedureil jm.

Diiselmootori leiutajaks oli saksa insener *Rudolf Diesel* (1893), kelle nimest on tuletatud ka diiselmootori nimetus.

85. **Aurumasina ajaloost.** Esimese aurumasina ehitas prantslane *Papin* 1690. a., mis aga oli väga puudulik. Ka inglase *Newcomeni* poolt 1711. a. kaevandusest veepumpamiseks

ehitatud aurumasin jäi ainult omaette üksikuks katseks ja ei leidnud laiemat rakendamist. Neis mõlemas lükkas aur kolvi silindris ainult ühtepidi, siis külma vee silindrisse pritsimisega kondenseeriti aur ja õhurõhumine lükkas kolvi tagasi silindri teise otsa. Alles inglane *James Watt* konstrueeris aurumasina (1765), kus auru jahutamine toimus väljaspool silindrit ja auru rõhumine pani liikuma kolvi mõlemas suunas.

Vene leidur *Ivan Polzunov* (1730—1766) ehitas aurumasina juba enne Watt'i (a. 1764), mida aga kasutati ainult õige lühikest aega. Pärisorjusaegne Venemaa ei osanud hinnata Polzunovi leiutise tähtsust.

Papini masina kasutegur oli umbes $1/_6$ %, Newcomeni oma pisut suurem (¼%), Watti aurumasina kasutegur küündis juba 1%-ni.

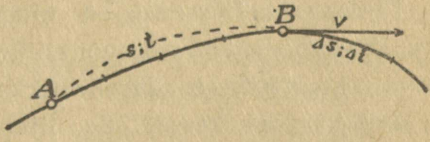
Aurumasina rakendamine laeva liikumapanemiseks toimus 1807. a. (Fulton), raudteel aga 1825. a. (Stephenson).

IV. Mehaanika.

Kõverjooneline liikumine.

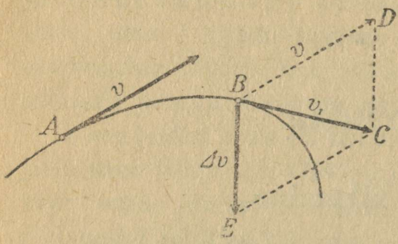
86. Kõverjoonelise liikumise kiirus ja kiirendus. Kõverjoonelisel liikumisel on liikumistee kõverjoon ja selle tõttu liikumise suund muutub alatasa (joon. 80). Ainult käidud tee pikkust arvestades võime analoogiliselt sirgjoonelise liikumisega kõnelda ühtlasest ja mitteühtlasest kõverjoonelisest liikumisest. Defineerida need! Kiiruse suuruse saamiseks tuleb käidud tee pikkus (s) jagada vastava ajaga (t).

Sirgjoonelise liikumise juures võtsime kiiruse suunaks keha liikumise suuna. Kõverjoonelise liikumise suuna määramiseks mõnes teepunktis, näiteks B, tõmbame kõverjoonele selles punktis puutuja. Et puutuja kõverjoonega puutepunktis ühte langeb, siis määrab kõverjoonelise liikumise kiiruse suuna antud teepunktis liikumisteele selles punktis tõmmatud puutuja suund.



Joon. 80. Kõverjoonelise liikumise kiirus.

Inertsiseadusest järgneb, et kõverjooneline liikumine võib tekkida ainult tungi mõjul, sest ilma selleta keha kas püsib paigal või liigub ühtlaselt ning sirgjooneliselt. Oletame, et tungi mõju kehasse lakkas näiteks teepunktis B. Siis hakkab keha sellest punktist peale edasi liikuma ainult inertsi mõjul ühtlaselt ning sirgjooneliselt kiirusega (v), mis oli kehal tungi mõju lakkamise momendil. See ongi keha kiirus punktis B.

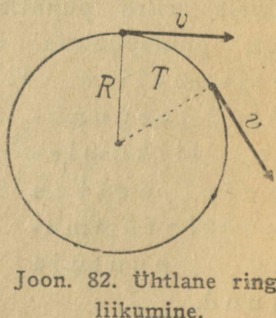


Joon. 81. Kiiruse juurdekasvu määramine.

Tahame leida keha liikumise kiirendust ehk kiiruse juurdekasvu ühe ajaühiku jooksul, siis tuleb lõppkiirusest (v_1) lahutada algkiirus v (joon. 81). Selleks ehitame rööpküliku $BDCE$, milles diagonaal $BC = v_1$ ja külg $BD = v$ on antud. Saadud rööpküliku külg BE ongi otsitav kiiruse juurdekasv Δv ühe ajaühiku jooksul ehk kiirendus. Kuigi kõverjooneline liikumine on läbitud tee pikkuse suhtes ühtlane ja kiirus suuruselt jääv, on k õ v e r j o o n e l i s e l l i i k u m i s e l a l a t i k i i r e n d u s, sest muutub liikumise ja ühes sellega kiiruse suund.

87. Ühtlane ringliikumine.

a) Ühtlane ringliikumine on niisugune, kus keha mööda ringjoont liikudes mistahes võrdsetes ajavahemikkudes läbib võrdsed kaared. See liikumine on täiesti määratud, kui on

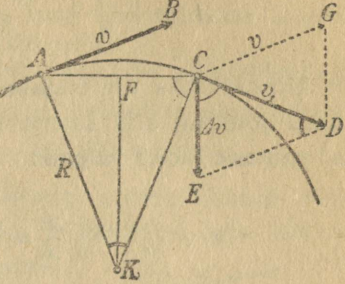


Joon. 82. Ühtlane ringliikumine.

antud ringi raadius R ja ühe täistiiru vältus ehk periood T. Siit võime otsekohe määrata kiiruse suuruse:

$$v = \frac{2\pi R}{T} \quad . \ . \ . \ . \quad (1).$$

Nagu definitsioonist näha, on ühtlase ringliikumise kiiruse suurus jääv, kuna kiiruse suund muutub järjest, sest ringjoone puutujad on igas punktis isesuunalised.



Joon. 83. Ühtlase ringliikumise kiirendus.

Et kiiruse suund kogu aeg muutub, on meil siin tegemist kiiruse muutumise ehk kiirendusega, mille tekitab kestev tung. Leiame kiirenduse nii suuruse kui suuna poolest.

Olgu keha mööda ringjoont liikudes antud momendil punktis A (joon. 83) ja tema kiirus sel momendil AB ehk v. Oletame, et Δt sek jooksul keha käib ära kaare AC ja jõuab punkti C, milles tema kiirus on CD ehk v_1. Et teada saada Δt sekundile vastavat kiiruse juurdekasvu (Δv), selleks lahutame lõppkiirusest v_1 algkiiruse v, saame kiiruse juurdekasvu CE ehk Δv. Joonisest näeme, et $\triangle\, CDE \sim \triangle\, ACK$ kui võrdhaarsed kolmnurgad, millel $\hat{D} = \hat{K}$ (vastastikku $\perp$ külgedega, mispärast?). Selle põhjal

$$\frac{\Delta v}{AC} = \frac{ED}{AK}, \text{ millest } \Delta v = \frac{AC \cdot ED}{AK} = \frac{AC \cdot v}{R}, \quad (2),$$

sest ED võrdub kiiruse suurusega v ja AK ringi raadiusega R. Kui Δt on küllalt väike, siis võime ilma suurema veata lugeda kõõlu AC pikkuse võrdseks kaare AC pikkusega, viimase pikkus aga väljendub tee valemist $(s = vt)$ nõnda:

$\smile AC = v\,\Delta t$. Asetades AC asemele valemisse (2) temale vastava väärtuse, saame:

$$\Delta v = \frac{v\,\Delta t\,v}{R} = \frac{v^2\,\Delta t}{R} \quad \ldots\ldots \quad (3).$$

Et kiirenduseks nimetatakse kiiruse juurdekasvu ühe ajaühiku jooksul, siis saame ühtlase ringliikumise kiirenduse (a) suuruse jaoks valemi:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v^2\,\Delta t}{R\,\Delta t} = \frac{v^2}{R} \quad \ldots\ldots \quad (4).$$

Asendades kiiruse suuruse v valemist (1) temaga võrdse $\frac{2\pi R}{T}$-ga, saame valemist (4):

$$a = \frac{(2\pi R)^2}{T^2 \cdot R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2} \quad \ldots\ldots \quad (5).$$

Valemitest (4) ja (5) järgneb, et ühtlase ringliikumise kiirenduse suurus on jääv, sest ta oleneb jäävatest suurustest v, R ja T.

Ühtlase ringliikumise kiirenduse suuna leidmiseks arutame järgmiselt. Kiiruse juurdekasvu Δv ehk CE suund on ühtlasi kiirenduse suunaks. $CE \perp AC$, sest $\widehat{ACK} = \widehat{ECD}$ (mispärast?) ja $\widehat{KCD} = 90^0$. KF on $\widehat{K}$ poolitaja, järelikult $KF \perp AC$, seega siis $KF \parallel CE$. Et aja juurdekasvu Δt vähenedes punkt C lõpuks liitub punktiga A, siis peab ka FK liituma AK-ga, samuti ka temaga alati rööpne CE. Järelikult, kiiruse juurdekasv ja kiirendus on suunatud ringi keskpunkti. Sellepärast nimetatakse ühtlase ringliikumise kiirendust sagedasti ka **kesktõmbe-** ehk **tsentripetaalkiirenduseks** (ladina k. *centrum* — keskpunkt ja *petere* — püüdma).

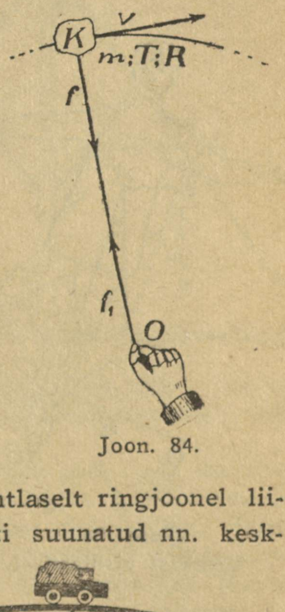
1. Sõnastada valemite (4) ja (5) põhjal kesktõmbekiirenduse suuruse olenevus kiirusest v, perioodist T ja raadiusest R!

2. Lingu pikkus on 80 cm ja ta teeb 2 tiiru sekundis. Leida lingukivi kiirus ja kiirendus!

3. Hooratta läbimõõt on 1,2 m ja ta teeb 300 tiiru minutis. Leida hooratta välise ääre kiirus ja kiirendus!

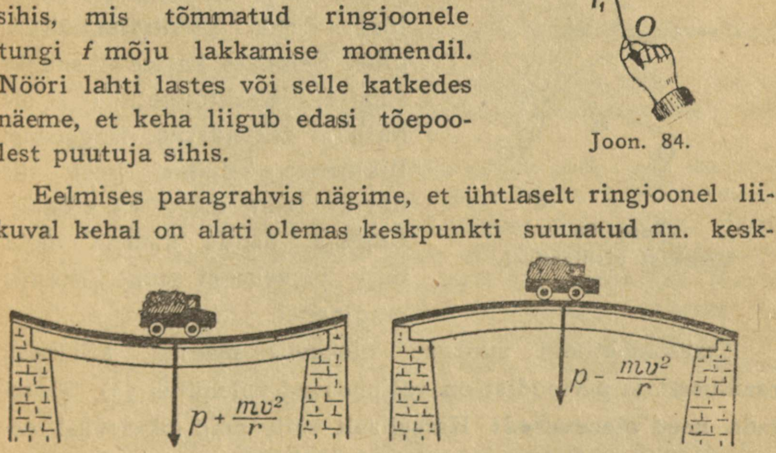
4. Leida Maa ekvaatoril asetsevate punktide kesktõmbekiirendus $\left(\frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}\right)$ pöörlemisel Maa telje ümber! Lahendada sama küsimus Tallinna ($\varphi = 59^0\ 26'$) ja Tartu ($\varphi = 58^0\ 23'$) kohta!

88. Kesktõmbe- ja kesktõuketung. Seome kõvasti nööri otsa mõne keha (kivi, kartuli jne.) ja hakkame teda kiiresti ringi tiirutama (joon. 84). Me tunneme tiirutades, et nöör on tublisti pingul. Nööri pinevus tõmbab ühelt poolt keha K ringi tsentri O suunas, teiselt poolt tõmbab nöör niisama tugevasti kätt suunas OK. Teha see katse tingimata! Tung f hoiab keha K ringliikumisel, sest ilma selleta liiguks keha inertsi mõjul puutuja sihis, mis tõmmatud ringjoonele tungi f mõju lakkamise momendil. Nööri lahti lastes või selle katkedes näeme, et keha liigub edasi tõepoolest puutuja sihis.



Joon. 84.

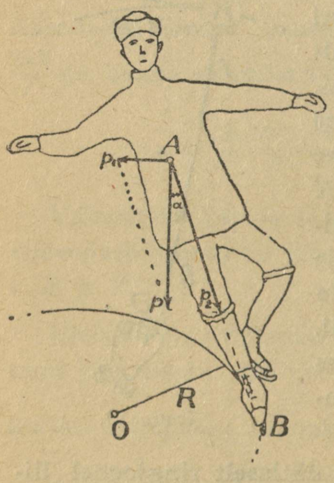
Eelmises paragrahvis nägime, et ühtlaselt ringjoonel liikuval kehal on alati olemas keskpunkti suunatud nn. kesk-



Joon. 85. Auto rõhumine sillale.

tõmbe- ehk tsentripetaalkiirendus. Newtoni II seaduse järgi on sinna suunatud ka tung, mis selle kiirenduse tekitab. Tungi, mis on kesktõmbekiirenduse põhjuseks, nimetatakse **kesktõmbe- ehk tsentripetaaltungiks.** Eelmises katses moodustas kesktõmbetungi niidi pinevus f. Kesktõmbetungi (f) suuruse saame, kui korrutame liikuva keha massi (m) kiirendusega (a), s. o.

$$f = \frac{mv^2}{R} = \frac{4\pi^2 mR}{T^2} \quad . \ . \ . \ . \ . \ (1).$$



Joon. 86.
Tasakaal uisutamisel.

Tung f mõõtub düünides, kui m mõõtub grammides, v — $\frac{\text{cm}}{\text{sek}}$, R — cm-tes ja T — sek-tes.

Kesktõmbetungiga Newtoni III seaduse põhjal võrdvastupidist tungi nimetatakse **kesktõuke- ehk tsentrifugaaltungiks.** Eelmises katses oli selleks tung f_1. Kesktõuketung ei ole millalgi rakendatud ringjoonel liikuvasse kehasse, sest siis häviks tema mõju kesktõmbetungiga, nende summa oleks null ja keha ei saaks liikuda ringjoonel.

Kesktõmbetungi suuruse olenevus massist, kiirusest, raadiusest ja perioodist on väljendatud valemites (1). Sõnastada need olenevused! Katseliselt võib neid olenevusi demonstreerida sellekohaste riistade abil.

Näiteid. 1. Lingu pikkus on 60 cm ja tema otsas mass 196 g. Missuguse kiirusega tuleb lingu tiirutada, et lingunöör oleks pingul 1,2 kG tugevuselt?

Valemist $f = \frac{mv^2}{R}$ saame:

$$v^2 = \frac{f \cdot R}{m} = \frac{1,2 \cdot 1000 \cdot 980 \cdot 60}{196} = 600^2,$$

millest $v = 600 \left(\frac{\text{cm}}{\text{sek}}\right)$. Mitu tiiru teeb ling seejuures sekundis?

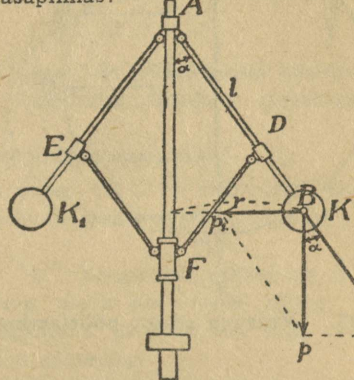
2. Kui suur vähemalt peaks olema jalgrattasõitja kiirus v, et oleks võimalik sõita ringi püsttasapinnas?

Olgu püstringi raadius R. Selles ringis sõitmine on võimalik, kui kogu raskus kulub kesktõmbetungiks. See tingimus on täidetud, kui kesktõmbekiirendus võrdub raskuse kiirendusega,

s. o. $\frac{v^2}{R} = g$, millest $v^2 = Rg$

ja $v = \sqrt{Rg}$. Olgu $R = 5$ m,

siis $v = \sqrt{5 \cdot 9,8} \approx 7 \left(\frac{\text{m}}{\text{sek}}\right)$.



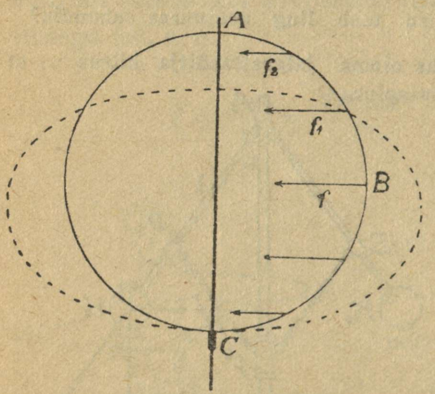
Joon. 87. Tsentrifugaalregulaator.

3. Kui suure nurga (α) võrra peab uisutaja kaldu hoiduma vertikaaltasapinna suhtes, tehes $T = 10$ sekundiga ühe ringi, mille raadius $R = 10$ m?

Ringi joostes peame hoidma keha tsentri poole, sest siis saame enese raskusest rõhtsa komponendi (p_1), mis on kesktõmbetungiks. Samuti on lugu uisutajaga, jalgrattasõitjaga jne. — Olgu uisutaja raskus p rakendatud punktis A (joon. 86). Lahutame raskuse kaheks komponendiks: rõht- (p_1) ja toetuspunkti (B) suunas (p_2). Viimane (p_2) tasakaalustub sõidutee vasturõhumisega, esimene (p_1) moodustab aga kesktõmbetungi, s. o. hoiab uisutajat ringliikumisel. Olgu uisutaja mass m, siis $p_1 = p \tan \alpha = mg \tan \alpha$. Tasakaalu korral võrdub p_1 kesktõmbetungiga, s. o.

$$mg \tan \alpha = \frac{4\pi^2 mR}{T^2}, \text{ millest } \tan \alpha = \frac{4\pi^2 R}{gT^2}, = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot 10}{9,8 \cdot 10^2} = 0,4 \text{ ja } \alpha = 22^0,$$

4. Kesktõmbetungi omadusel põhineb nn. W a t t'i t s e n t r i f u g a a l r e g u l a a t o r i kasutamine (joon. 87). Pöörleva püstteljega *AF* on ühendatud varbadest kaldruut *AEFD*, mis muhvi *F* abil võib üles ja alla liikuda. Varbade *AD* ja *AE* otsas on massiivsed kerad *K* ja K_1. Mida suurem on regulaatori pöörlemise kiirus, seda suurem peab olema kesktõmbetung ja seda kõrgemale tõusevad tasakaalustamiseks kerad *K* ja K_1.



Joon. 88. Vetruva rõnga pöörlemine.

Lahendada järgmine ülesanne: mitu tiiru sekundis (n) peab tegema regulaator, et varb *AB* moodustaks püstteljega nurga α?

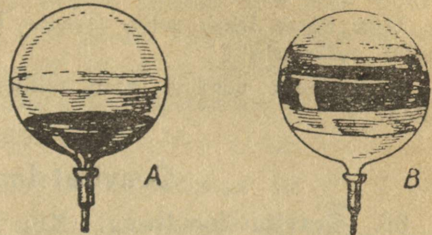
Aurumasina juures ühendatakse muhv *F* klapiga, mis reguleerib auru juurdepääsu silindrisse. Kui masin hakkab käima kiiremini, suureneb nurk α, muhv *F* tõuseb kõrgemale ning ühes sellega asetub klapp enam risti, takistades seega auru juurdepääsu. Masina käigu aeglasemaks muutumise korral mõjub regulaator vastupidises suunas.

5. V e t r u v r õ n g a s *ABC* pöörleb ümber telje *AC* (joon. 88), olles kinnitatud teljega otsas *C*. Et rõngaosade tiirlemisperioodid on võrdsed, siis oleneb kesktõmbetung ainult kaugusest pöörlemisteljest, suurenedes keskkoha *B* suunas. Kesktõmbetungi moodustab antud juhul rõnga deformeerumisel tekkinud pinevus, mis on seda suurem, mida kiiremini pöörleb rõngas. Tõepoolest, rõngas muutub pöörlemisel lapikuks (punktiirjoon).

Täpsem Maa kuju uurimine näitab, et Maa on lapik pöörlemistelje sihis. Sellest järeldame, et kui Maa mitte praegu ei peaks pöörlema, siis ta vähemalt varematel aegadel on pidanud pöörlema oma telje ümber, millest ongi tekkinud see lapikus.

6. Mitmesuguse tihedusega vedelad ained pöörlemisel samas anumas (trumlis) asetuvad kontsentriliste kihtidena nõnda, et tihedus pöörlemisteljest lugedes järjest suureneb (joon. 89 *B*). Nii

näiteks elavhõbeda, vee ja petrooleumi pöörlemisel moodustab sisemise kihi petrooleum, keskmise vesi ja välise elavhõbe. Sel nähtusel põhineb mitmesuguste separaatorite ehitamine. Näiteks koorelahutaja trumlis koguneb koor kui kergem osa trumli keskpaika, kuna piim kui raskem osa trumli äärtele koguneb ja sealt välja juhitakse.

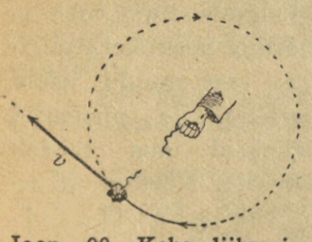


Joon. 89. Pöörlemisel eralduvad vedelikud tiheduse järjekorras.

1. Seletada, kuidas töötab meevurr, kuidas kasutatakse tsentrifugaalmasinat piima rasvaprotsendi määramisel, pesu kuivatamisel, terade sortimisel jne.!

2. Millest tuleb vahel veskikivide purunemine?

3. Tiirutame teeklaasi käe otsas ($R = 70$ cm) ringi püsttasapinnas. Vähemalt mitu tiiru sekundis peaks tegema, et vesi klaasist välja ei voolaks?



Joon. 90. Keha liikumine lingu katkemisel.

4. Lingunööri pikkus on 60 cm ja otsas oleva kivi mass 100 g. Leida lingunööri pinevus, kui ling teeb 2,5 tiiru sekundis!

5. Nööri pinevus katkemismomendil on 10 kG. Kui kiiresti võib selle nööri otsa seotud 200-grammist massi püst-tasapinnas tiirutada, kui nööri pikkus on 1 m? Vastata samale küsimusele rõht-tasapinna suhtes (joon. 90)!

Märkus: Nööri pinevuse all antud punktis mõeldakse tungi, mis nööri otsi endiselt koos hoiaks, kui nöör selles punktis katki lõigata.

6. Jalgrattasõitja teeb 10 sekundiga ühe ringi, mille raadius on 10 m. Kui suure nurga moodustab ta püst-tasapinnaga?

7. Mitu korda kiiremini peaks Maa oma telje ümber pöörlema, et ekvaatoril asetsevad kehad midagi ei kaaluks? Kuidas tuleks sama küsimus lahendada Tartu suhtes?

8. Kui suure rõhtsa algkiirusega tuleks visata keha, et ta enam Maa peale ei langeks, vaid trabandina ümber Maa liikuma hakkaks?

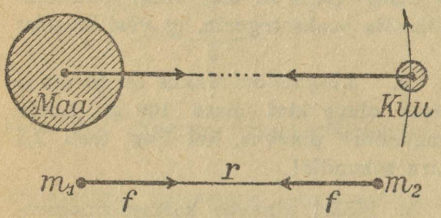
9. Lennuki kiirus sööstlennu kõige madalamas asendis on $540 \frac{km}{h}$. Seejuures moodustab lennuki tee vertikaaltasapinnas asetseva ringi kaare raadiusega 450 m.

Mitu korda läheb selles asendis lenduri keha kesktõmbetungi mõjul „raskemaks“?

Missuguseid nõudeid seab selline sööstlend lennuki ehituse kohta?

Gravitatsioon.

89. Gravitatsioonitung. Kuu liigub ümber Maa, samuti Maa ja teised planeedid ümber Päikese peaaegu ringjoonelisi (õigemini elliptilisi) teid mööda. Me teame, et ringliikumine ei teki iseendast, vaid selleks läheb tarvis nn. kesktõmbetungi, mis hoiab keha ringliikumisel. Järelikult peab Kuu ja Maa, Maa ning Päikese jne. vahel mõjuma mingisugune tung, mis on võrdne kesktõmbetungiga, sest muidu kaoks tasakaal ja planeedid läheksid oma teedelt kõrvale. Newton nimetas selle tungi üldiseks tõmbe- ehk gravitatsioonitungiks (lad. k. *gravitas* — raskus) ja oletas, et ta ei mõju mitte ainult taevakehade, vaid kõigi aineosakeste (ainepunktide) vahel järgmiselt: kaks ainepunkti tõmbuvad neid ühendava sirge sihis võrdeliselt ainepunktide masside (m_1 ja m_2) korrutisega ja pöördvõrdeliselt nende kauguse (r) ruuduga, s. o. tõmbetung $f = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$.



Joon. 91. Masside tõmbumine.

Tõmbetung f mõõtub düünides, kui m_1 ja m_2 on mõõdetud grammides, r — cm-tes ning võrdetegur ehk nn. gravitatsioonikonstant $G = 6{,}68 \cdot 10^{-8}$.

Selle järgi pole meile tuntud keha **tung Maa poole** ehk **raskus** muud midagi kui **gravitatsiooni tung keha massi ja Maa massi vahel.** Et mõju ja vastumõju on võrdsed, siis tungib näiteks kivi Maa poole niisama tugevasti kui Maa kivi poole. Tegelikult aga langeb kivi Maa poole, sest sama tungi mõjul on kiirendused pöördvõrdelised massidega, järelikult Maa kiirendus on tegelikult null, võrreldes kivi kiirendusega.

1. Kivi (1 kg) langeb Maa poole kiirendusega 9,8 $\frac{m}{sek^2}$. Kui suur $\left(\frac{m\mu}{sek^2}\right)$ on Maa ($d = 5,5 \frac{g}{cm^3}$) kiirendus kivi poole? sinu keha massi poole?

2. Kui palju kaalub inimene (75 kg) Kuu kaugusel Maast?

3. Kui tugevasti (G) tõmbuvad teineteise poole kaks ühesugust seatinakera, mille raadiused on 50 cm ja keskpunktide kaugus 2 m?

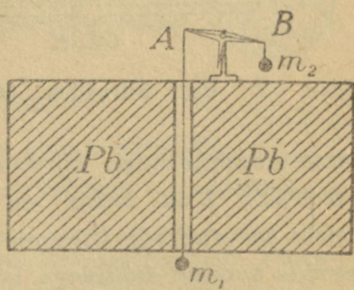
4. Mitu mG väheneb 1 kg (sinu) kaal 1 m võrra kõrgemale tõstmisel?

5. Kui suur peaks olema Maa kaaslase tiirlemisperiood, kui see kaaslane liiguks ümber Maa kahe Maa raadiuse kaugusel keskpunktist?

6. Kui kõrgel maapinnast kaotavad ekvaatoril asetsevad kehad, mis ühes Maaga pöörlevad, oma kaalu?

90. Gravitatsioonikonstandi määramine. Gravitatsioonikonstandi suuruse määramiseks on vaja otseselt mõõta kahe tuntud massi (m_1 ja m_2) tõmbetung ning nendevaheline kaugus r. Neist andmeist võime valemi $f = G\left(\frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}\right)$ põhjal arvutada gravitatsioonikonstandi suuruse.

Esimesena määras sel põhimõttel G suuruse Cavendish a. 1798. Praegusel ajal loetakse täpseimaks Richarzi poolt 1896. a. tarvitusele võetud mõõtmisviisi, mis on järgmine.

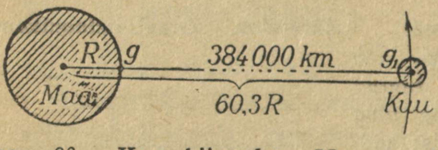


Joon. 92. Richarzi viis G määramiseks.

Kaks võrdset massi m_1 ja m_2 (niitide mass kaasa arvatud) riputatakse kaalu külge, nagu on näha joon. 92. Mõlema kaalutava massi (m_1 ja m_2) vahele on asetatud massiivne seatinaplokk (umbes 2 m^3), mis oma gravitatsiooniga vähendab m_1 ja suurendab m_2 kaalu. Et kõik massid ja kaugused on otseselt mõõdetavad, siis saadud m_1 ja m_2 kaalu vahest sellisel kaalumisel ongi võimalik arvutada G suurust. Richarzi mõõtmiste järgi on $G = 6{,}685 \cdot 10^{-8} \frac{cm^3}{g \cdot sek^2}$. Nagu näha, on G nimetuseks CGS-süsteemis $\frac{cm^3}{g \cdot sek^2}$. See on vajalik, sest muidu ei saa me gravitatsioonitungi valemis massi- ja kaugusühikute nimetuse asendamisel tungühiku (düüni) nimetust.

91. Kuu liikumine seletub Maa tõmbega.

Newton rakendas gravitatsiooniseaduse kõige esiti Kuu liikumise seletamiseks. Ta arutas järgmiselt: kui gravitatsioonitung on loomult ühesugune raskusega ja väheneb pöördvõrdeliselt kauguse ruuduga, siis peaks Maa raskuskiirendus Kuu tee kaugusel (g_1) olema $60{,}3^2$ korda väiksem kui maapinnal, sest Kuu kaugus Maast on 60,3 Maa raadiust. Järelikult $g_1 = \frac{g}{60{,}3^2} = 0{,}27 \left(\frac{cm}{sek^2}\right)$. Teiselt poolt Kuu keskmise kauguse (384 400 km) ja tiirlemisperioodi (27,3 päeva) põhjal arvutades Kuu kesktõmbekiirenduse, leiame samuti 0,27 $\frac{cm}{sek^2}$. Gravitatsioonikiirendus võrdub seega kesktõmbekiirendusega, järelikult Kuu kohta on gravitatsiooniseadus õige. Ka teiste taevakehade liikumiste seletamisel on gravitatsiooniseadus andnud faktidega kooskõlas olevad resultaadid.



Joon. 93. Kuu kiirendus Maa poole.

Oma suure ulatuse poolest kuulub gravitatsiooniseadus üldisemate ja viljakamate loodusseaduste hulka.

Väljendada Kuu kaugus Maast Kuu tiirlemisperioodi (T), Maa raadiuse (R) ja gravitatsioonikiirenduse (g) abil!

92. Maa pöörlemise mõju kehade kaalusse. Maa pöörleb oma telje ümber, tehes 24 tähetunni jooksul ühe täistiiru (tähe öö-päev on ~ 4 min. lühem keskmisest Päikese ööstpäevast). Ühes Maaga liiguvad ka kõik maapinnal asetsevad kehad ümber Maa telje ringjoonelisi teid mööda. Selleks tarvismineva kesktõmbetungi saavad kehad raskustungist. Kui raskustungist kesktõmbetungiks kuluva osa lahutame, siis järelejäänud osa ongi see, mida me nimetame kehade kaaluks. Järelikult sama keha kaal ei ole igal pool maapinnal ühesugune, vaid oleneb koha geograafilisest laiusest, sest kesktõmbetungi suurus Maa pöörlemisel ümber telje väheneb ekvaatorilt pooluse poole minnes, kuna vähenevad pöörlemisraadiused.

Peale pöörlemise mõjub kaalusse veel kaugus Maa tsentrist (õieti raskuspunktist). Et lapikuse tõttu on maapind ekvaatoril Maa tsentrist kaugemal kui poolustel, siis seetõttu suureneb kaaluvahe veelgi. Mõlemad põhjused ühtekokku suurendavad 1 kg kaalu poolustel, võrreldes ekvaatoriga, umbes 5 G võrra.

Raskuse kiirenduse suurust geograafilisel laiusel φ, s. o. g_φ, arvutatakse järgmise valemi abil:

$$g_\varphi = g_0 (1 + 0{,}0053 \sin^2 \varphi),$$

kus g_0 on raskuskiirendus ekvaatoril ja võrdub $978{,}05 \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2}$.

1. Leida eelmise valemi põhjal g Tallinna ($\varphi = 59^0 26'$) ja Tartu ($\varphi = 58^0 23'$) kohta!

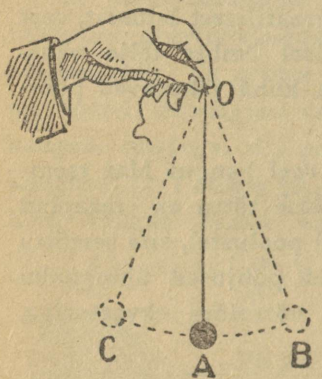
2. Mitu G kaalub keskmine inimene (75 kg) poolusel rohkem kui ekvaatoril?

3. Milliste kaaludega tuleb kaaluda, et ilmsiks teha kaaluvahet poolustel ja ekvaatoril?

Võnkliikumine ja pendel.

93. Pendli võnkumine. Kui pendel tasakaaluasendist (joon. 94 A) välja viia ning lahti lasta, hakkab ta **raskustungi mõjul** võnkuma. Selline liikumine ühest äärmisest asendist teise ja tagasi kestab seni, kuni õhu ja teiste takistuste ületamiseks on ära tarvitatud pendlile tema liikumise algul antud energia. Siis jääb pendel oma endisse tasakaaluasendisse jälle seisma.

Katsed näitavad, et pendli võnkumisel *sama liikumine*, näiteks ühest äärest teise ja tagasi, *kordub* võrdsete ajavahemikkude ehk perioodide järel: seega on pendli liikumine *perioodiline liikumine*. *Võnkeperioodiks* on ajavahemik **T**, mille jooksul pendel teeb ühe *täisvõnke*, s. o. liigub ühest äärmisest asendist teise ja tagasi lähteasendisse. *Võnkeamplituudiks* nimetame äärmise asendi (B või C) kaugust tasakaaluasendist. *Võnkesageduseks* ehk *frekventsiks* **n** nimetatakse täisvõngete arvu ühes sekundis, järelikult $n = \frac{1}{T}$, millest $n.T = 1$.

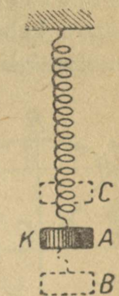


Joon. 92.
Pendli võnkumine.

Võnkesagedust mõõdetakse hertsides, kusjuures **1 herts (Hz)** on *sagedus 1 täisvõnge ühes sekundis*. Kui näiteks pendli võnkeperiood T = 0,5 sek, siis tema sagedus n = 1 : 0,5 = 2Hz.

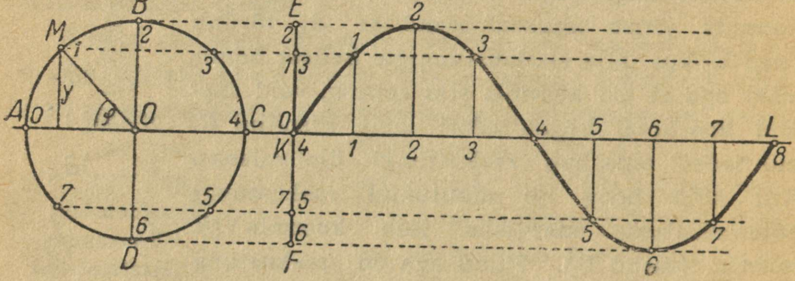
94. Võnkliikumine elastsustungi mõjul. Pendlitaoline *võnkliikumine* tekib mitte ainult raskustungi, vaid ka teiste tungide, näiteks elastsustungi mõjul.

Riputame paraja koormise *K* terasvedru või kumminiidi otsa (joon. 95). Koormise raskuse mõjul venib vedru sedavõrd pikemaks, et vedru elastsustung võrdub koormise raskusega. Siis on koormis *K* oma tasakaaluasendis *A*. Kui aga vedru veel enam välja venitada (asend *B*), siis muutub vedru elastsustung koormise raskusest suuremaks. Koormist nüüd lahti lastes hakkab ta elastsustungi mõjul ülespoole liikuma. Kui koormis jõuab tasakaaluasendisse *A*, võrdub tema raskus jälle elastsustungiga. Sellest hoolimata aga ei jää koormis siin seisma, vaid saadud hoo arvel liigub edasi kuni asendini *C*, kulutades oma hoo raskustungi ületamiseks. Kui kõik hoog on muutunud raskustungi potentsiaalseks energiaks, jääb koormis *K* seisma (asend *C*). Nüüd aga on raskustung elastsustungist suurem ja koormis hakkab uuesti allapoole liikuma, läbib hoo tõttu jällegi tasakaaluasendi, jõuab uuesti *B*-sse ja hakkab sealt tagasi liikuma. Sedaviisi saame elastsustungi mõjul koormise *K* hoo muundumise kord raskustungi potentsiaalseks energiaks (asend *C*), kord elastsustungi potentsiaalseks energiaks (asend *B*). Liikumine ise aga on koormise pendlitaoline võnkliikumine üles-alla, amplituudiga *AB* või *AC*. See liikumine kestab seni, kuni koormise liikumise alguses antud energia on ära kulunud õhu- ja teiste takistuste ületamiseks. Me ütleme siis, et takistused s u m m u t a s i d koormise *K* võnkumise.



Joon. 95. Võnkumine elastsustungi mõjul.

95. Võnkliikumise hälbe muutuse graafiline kujutamine. Pendlitaolist võnkliikumist võime vaadelda kui ühtlase ringliikumise projektsiooni mõnele ringi tasapinnas olevale sirgele (joon. 96). Alustagu vaadeldav keha ringliikumist diameetri AC otsast A. Projekteerime liikuva keha asendid AC-ga risti olevale diameetrile BD või temaga rööpsele sirgele EF. Siis saame sellel projektsiooni pendlitaolise edasitagasi liikumise (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 0), mis kannab **h a r m o o n i l i s e v õ n k l i i k u m i s e** nime. Ringjoonel liikuva keha või tema projektsiooni kaugust diameetrist AC nimetatakse **h ä l b e k s** ehk **e l o n g a t s i o o n i k s** (y) ja



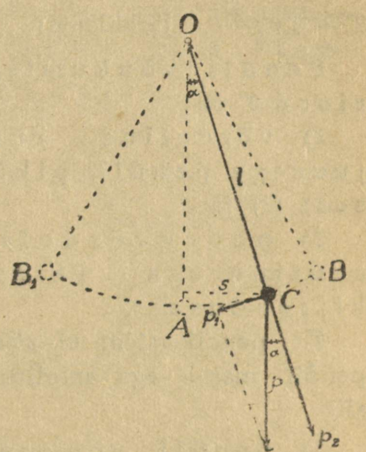
Joon. 96. Hälbe muutuse graafiline kujutamine.

raadiuse OA pöördumisnurka algasendist (OA) kuni antud asendini (OM) **f a a s i k s** (φ). Hälvet mõõdame pikkusühikuis, faasi nurgamõõdu-ühikuis. Nagu 96. joonisest näha, hälve $y = a \sin \varphi$, kus a on ringi raadius.

Kui aga tahame jälgida hälbe muutumist olenedes ajast, näiteks ühe võnkeperioodi jooksul, siis märgime rõhtteljel üksteisele järgnevad ajamomendid (0, 1, 2, 3, . . .), antud juhul iga $\frac{1}{8}$ perioodi järel, ja ehitame igale ajamomendile vastava hälbe suuruse. Sedaviisi ehitatud hälvete otsad ühendame ladusa joonega. Saame lainelise joone KL, mis kujutabki hälbe ehk elongatsiooni muutumise käiku ühe võnkeperioodi jooksul. See laineline kõver kannab ka **s i n u s o i d i** nime, sest hälve on faasi siinuse funktsioon. Hälbe maksimumväärtuse ehk **a m p l i t u u d i** saame, kui $\sin \varphi = 1$, siis $y = a \sin \varphi = a \cdot 1 = a$.

96. Matemaatiliseks pendliks nimetatakse ainepunkti, mis on kinnitatud painduva, mitteveniva ning kaalutu niidi külge ja mis võib vabalt võnkuda vertikaaltasapinnas raskustungi mõjul. Meil ei ole tegelikult võimalik niisugust pendlit valmistada. Enam-vähem neile tingimustele vastab füüsiline pendel, milleks on kõva peenikese niidi otsa riputatud seatinakuulike.

Viime pendli tasakaaluasendist OA välja asendisse OB ja laseme lahti (joon. 97). Pendel hakkab võnkuma vertikaaltasapinnas ühest äärmisest asendist (OB) keskasendisse OA ning saadud hoo arvel edasi teise äärmisse asendisse (OB_1) ja tagasi.



Joon. 97. Matemaatiline pendel.

Pendli võnkumist võime vaadelda kui liikumist kaldpinnal, kusjuures kaldenurk järjest muutub. Olgu pendel asendis OC. Lahutame pendli massi raskuse p kaheks komponendiks: pikuti pendli niidiga (p_2) ja sellega risti (p_1). Komponent p_2 tõmbab pendli niiti pingule, kuna komponent p_1 pendli liikuma paneb. Nagu 97. joonisest näha, on tung

$$p_1 = p \sin \alpha \text{ ja } p_2 = p \cos a \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1),$$

s. o. pendlit liikuma panev tung kui ka niidi pinevus olenevad pendli asendist tasakaaluasendi suhtes, mille määrab nurk α.

Õhk takistab pendli võnkumist, selle tõttu pendli võnkumise amplituud järjest väheneb, kuna periood enam-vähem samaks jääb.

Väikeste amplituudide (kuni 5^0) juures väljendub pendli täisvõnke vältus (periood) T valemiga

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

kus l on pendli pikkus ja g raskuskiirendus.

97. Matemaatilise pendli võnkumise seadused. Sekundpendel. Pendli valemist

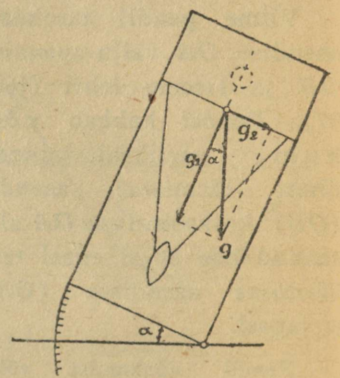
$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ järeldame:

Pendli võnkumisperiood T on:

1) võrdeline ruutjuurega pendli pikkusest (l) ja

2) pöördvõrdeline ruutjuurega raskuskiirendusest.

Et pendli valem ei sisalda pendli massi ega amplituudi, siis



Joon. 98. Mach'i pendli skeem.

3) pendli võnkumisperioodid ei olene pendli massist ega amplituudist.

Kõik eelmised pendli võnkumise seadused on kehtivad eeldusel, mis on olnud aluseks pendli valemi tuletamisel, s. o. väikeste amplituudide puhul.

Esimest seadust on katseliselt hõlpus demonstreerida: kui pikendada näiteks pendli niiti 4 korda, suureneb T 2 korda, jne.

Teist seadust võime demonstreerida nn. Mach'i pendli abil (joon. 98). Kui pendli võnkumistasapind vertikaaltasapinnast nurga α võrra kõrvale viia, ei mõju pendli võnkumisel mitte enam kogu raskuskiirendus g, vaid komponent $g_1 = g \cos\alpha$. Mis mõju avaldab komponent g_2? Nurka α vastavalt muutes võime jälgida T olenevust kiirendusest. Näiteks kui $\alpha = 75{,}5^0$, siis $\cos\alpha = \frac{1}{4}$ ja $g_1 = \frac{4}{g}$, ning T suureneb 2 korda.

Kolmanda seaduse tõestamiseks muudame pendlikeha massi ja amplituudi ning määrame vastavad perioodid.

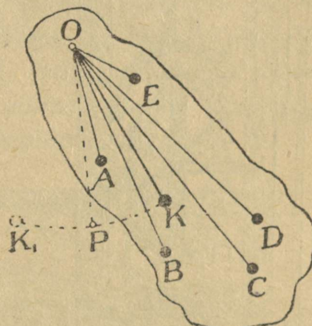
Pendli abil on kerge määrata raskuskiirendust g, sest valemist $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ saame $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$. Pendli pikkus ja võnkumisperiood on kergesti mõõdetavad, järelikult ka g.

Määrata sel teel g niidi otsa riputatud seatinakuulikesega ja võrrelda saadud resultaati teisel teel saadud g suurusega!

Pendlit, mille poolvõnke vältus on 1 sek., nimetatakse sekundpendliks. Sekundpendli pikkuse saame valemist

$2 = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, millest $l = \frac{g}{\pi^2} = \frac{981}{9{,}87} =$ **99,4** (cm).

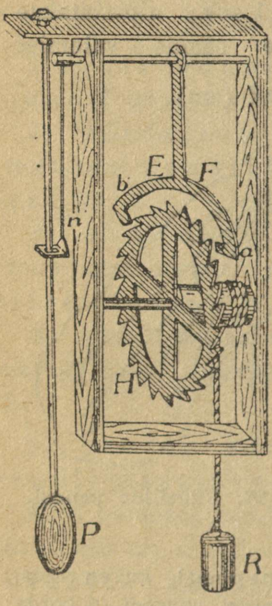
Nagu siit näeme, on sekundpendli pikkus umbes 1 m.



Joon. 99. Füüsiline pendel.

1. Mitu täisvõnget sekundis teeb matemaatiline pendel, mille pikkus on 50 cm?
2. Foucault oma kuulsas katses Pariisi Panthéonis a. 1851 tarvitas pendlit, mille pikkus oli 67 m ja mass 28 kg. Leida täisvõnke vältus!
3. Arvutada pendli pikkus, mille poolvõnke vältus on 0,5 sek.!
4. Kuidas oleneb sekundpendli pikkus koha geograafilisest laiusest?
5. Leida sekundpendli pikkus Päikese (Kuu) pinnal, kui on teada, et seal raskuse kiirendus on vastavalt 28 korda suurem (6 korda väiksem)!

98. Füüsiline pendel. Varem käsiteldud pendli võnkumise seadused on kehtivad matemaatilise pendli kohta. Tegelikult ei ole meil võimalik ehitada matemaatilist pendlit, vaid tarvitame selle asemel nn. f ü ü s i l i s t p e n d l i t, mis enam-vähem vastab matemaatilisele pendlile. Üldse võime füüsiliseks pendliks nimetada iga keha, mis oma raskuse mõjul mõne punkti või rõhtsa telje ümber võib võnkuda (joon. 99). Olgu füüsilise pendli telg punktis *O*. Kujutame füüsilise pendli koosnevana üksikutest ainepunktidest *A*, *B*, *C* jne., mis on seotud kaalutu niidiga sama teljega *O*. Sedaviisi võime mõttes lahutada füüsilise pendli üksikuteks matemaatilisteks pendliteks, mis on pikkuselt väga mitmesugused. Lühemad neist püüavad vähendada, pikemad suurendada füüsilise pendli võnkeperioodi. Kahtlemata leidub nende matemaatiliste pendlite hulgas üks, näiteks *OK*, mille periood võrdub füüsilise pendli võnkeperioodiga. Pikkus *OK* nimetatakse füüsilise pendli t a a n d a t u d ehk r e d u t s e e r i t u d p i k k u s e k s ja punkti *K* füüsilise pendli võnkumistsentriks. Tähendab, füüsiline pendel võngub samuti kui matemaatiline pendel, mille pikkus võrdub füüsilise pendli taandatud pikkusega. Selle füüsilise pendli omaduse põhjal võime kõik matemaatilise pendli võnkumise seadused üle kanda ka füüsilise pendli kohta.



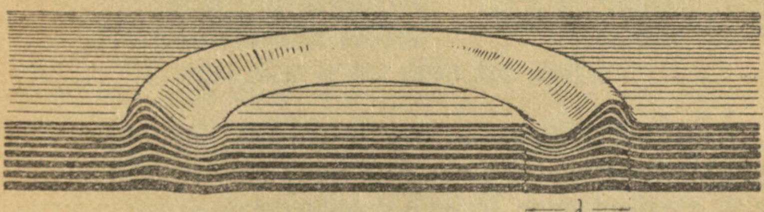
Joon. 100.
Seinakella skeem.

Teooria ja katse näitavad, et kui füüsilise pendli võnkumistsenter teha kinnituspunktiks, siis endine kinnituspunkt muutub võnkumistsentriks. Selle omaduse põhjal on võimalik füüsilise pendli taandatud pikkust määrata. Füüsiline pendel leiab laialdast kasutamist raskustungi kiirenduse määramisel ja kella käigu reguleerimisel (joon. 100). Iga poolvõnke juures laseb pendel hammasrattal, mida rippuva koormise või vedru abil ümber veetakse, ainult ühe hamba võrra edasi liikuda. Pendli pikkust muutes võime hammasratta liikumist kiiremaks või aeglasemaks teha. Pendli seismajäämist takistavad tõuked, mis hammasratas talle annab.

1. Kuidas mõjub temperatuuri muutus kella käigusse?
2. Kust saab kell oma energia kõigi käimisel ettetulevate takistuste ületamiseks?

Laineline liikumine.

99. Lained veepinnal. Viskame vaiksesse vette puuklopi — see jääb pinnale ujuma — ja hakkame tekitama laineid. Nüüd võime tähele panna, kuidas puuklopp lainete mõjul perioodiliselt üles-alla võnkuma hakkab. Tähendab, sellises liikumises on vee osakesed, mis puukloppi kannavad. Samalaadseid tähelepanekuid võime teha ka õngekorgi või lootsiku liikumisi lainetaval veepinnal jälgides.



Joon. 101. Veepinnal leviva laine ristilõige.

Vaatame lähemalt veelaine tekkimist. Selleks viskame vaiksesse vette näiteks kivi. Kivi vette langemisel tekib tema järel vees pinna läheduses nõgu. Ümberringi olevad veeosakesed oma raskuse mõjul tungivad tekkinud nõkku, täidavad selle, ja veel enam, saadud hoo arvel kuhjuvad kühmana endise nõo kohale, suurendades nende veeosakeste potentsiaalset energiat. Selle arvel langevad veeosakesed jälle madalamale, läbivad hooga tasakaaluasendi, milleks on rõhtpind, ja tekitavad uuesti nõo. Sedaviisi saame samas kohas olevate veeosakeste perioodilise üles-alla liikumise, mis aga varsti sumbub.

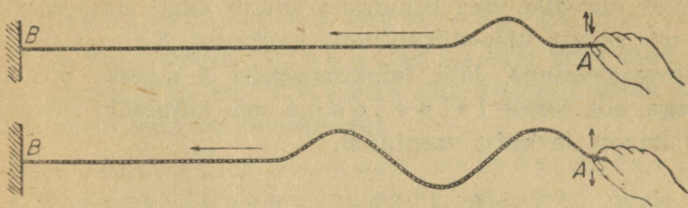
Kirjeldatud nähtus ei piirdu ainult vee langemiskohaga, vaid levib sellest ringikujuliselt laiali. Põhjuseks on asjaolu, et veeosakeste tasakaalukaotus vaiksel veepinnal kivi langemiskohas andub edasi naaberosakestele, mis samuti madalama koha (tekkinud nõo) suunas liikuma hakkavad. Naaberosakeste tasakaalukaotus tekitab tasakaalukaotuse järgmistes osakestes jne. Seetõttu tekivad veepinnal ringikujulised nõod ja kühmud, *lained*, mis *levivad* tekkimiskohast eemale *kontsentriliste ringidena*. Et siin *laine levimissuund* (rõhtsiht) *on risti laineosakeste tegeliku liikumisega* üles-alla (püstsiht), siis nimetatakse sellist lainet **ristlaineks**.

Joon. 102. Laine kiir ja laine front.

Tuleb eraldada veeosakeste võnkumist, mis toimub samal kohal, laine levimisest, mis pole muud midagi kui võnkliikumise edasiandumine järjest uutele eemalseisvatele veeosakestele. Et laine on võnkliikumise edasiandumine, iga liikuv keha aga sisaldab energiat, siis ka laine liikumine on seotud energia levimisega lainetavas keskkonnas. Laine levimissuunda nimetatakse *laine kiireks*. Laine kiir on alati risti laine eespinna ehk *laine frondiga* (rindega) selles kohas (joon. 102).

Eespool on antud veepinna lainetuse tekkimise lihtsustatud, skemaatiline seletus. Tegelikult on siin esinevad liikumised keerulisemad, sest veeosakesed ei võngu lainetamisel täpselt üles-alla, vaid kõverjooneliselt.

100. Ristlainete tekitamine. Veelainetega sarnaseid r i s t- ehk t r a n s v e r s a a l - l a i n e i d võime hõlpsasti tekitada pikema tugeva nööri (pesunööri) või, mis veel parem, pika, veega täidetud kummitoru või terasspiraali abil.

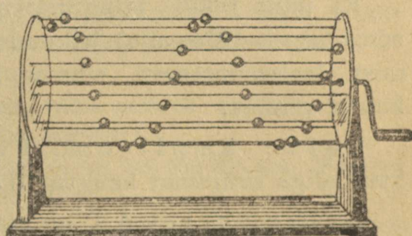


Joon. 103. Lainete levimine nööril.

Kui anname sellisele otsast kinnitatud ja lõdvalt pingule-tõmmatud nöörile teises otsas käega rea järske tõukeid, tekivad lained, mis levivad mööda nööri edasi (joon. 103).

Veel sobivam on kasutada ristlainete levimise demonstreerimiseks 104. joonisel kujutatud riista.

Tugev varb (telg) on varustatud otstes kahe ühesuguse kettaga, mis on ühendatud rööpsete niitidega. Neile niitidele on asetatud spiraalitaoliselt rida kergeid kuulikesi. Kui sedaviisi saadud silindrilist keha vändast ümber ajada, liigub iga kuulike ringjoont mööda ümber telje. Kui aga projekteerime (eest vaadates) kõik need liikuvad kuulikesed tasapinnale, saame pidevalt liikuva ristlaine mulje.



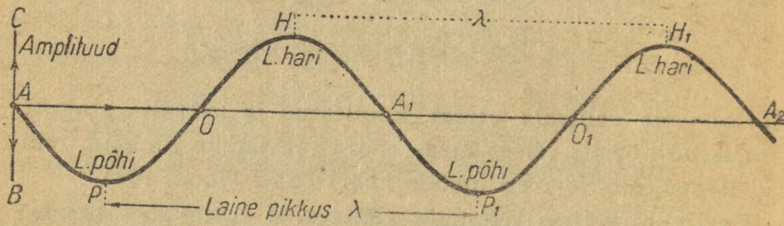
Joon. 104. Lainetusriist.

1. Jäljendada käega ristlaine levimist! Kuidas kulgevad sel juhul laine kiir ja laine front?

2. Kuidas kulgevad 103. ja 104. joonisel kujutatud katsetes laine kiir ja laine front?

3. Vaadelda lainetusmasinas ainult ühe kuulikese liikumist, kõiki teisi ära varjates! Millise näiva liikumise saame siis?

101. Ristlainet iseloomustavaid suurusi ning seoseid nende vahel. Kujutleme, et rõhtsal veepinnal punktist A kui lainetustsentrist levivad ristlained. Läbilõikes kujutab seda skemaatiliselt joon. 105. Veeosake punktis A liigub pendlitaoliselt üles-alla. See liikumine andub edasi naaberosakestele, mis samuti üles-alla liikuma hakkavad. Kui aga lõikame lainetava veepinna läbi lainetustsentri A mineva püsttasapinnaga, siis saame l a i n e j o o n e, mis kujutabki skemaatiliselt lainete levimist veepinnal.



Joon. 105. Laine levimise skeem.

Et laine tekib lainetustsentri osakeste pendlitaolisest edasi-tagasi (üles-alla) liikumisest, siis on pendli võnkliikumist iseloomustavad suurused rakendatavad ka lainetuse kohta, nimelt:

L a i n e a m p l i t u u d i k s nimetatakse lainetava osakese kõige suuremat kaugust tasakaaluasendist (AB või AC).

L a i n e p e r i o o d T on ajavahemik, mille jooksul lainetav osake liigub ühest äärmisest asendist (näiteks B) teise (C) ja tagasi.

On selge, et ühe perioodi möödudes hakkab lainetav osake kordama endisi liikumisi, seetõttu hakkab korduma ka laine kuju. Näiteks on laine vahemikus $APOHA_1$ täpselt samasugune kui vahemikus $A_1P_1O_1H_1A_2$ jne. Seepärast lainelise liikumise tundmaõppimisel on küllalt tunda ühte neist korduvaist liikumiselementidest, lihtsalt ühte lainet, mis koosneb laine harjast ja laine põhjast. Kõik teised lained on samasugused. Selleks eraldame lainetest osa, näiteks mõnest laine harjast (H) kuni järgmise laine harjani (H_1), või mõnest laine põhjast (P) kuni järgmise lainepõhjani (P_1), s. o. ühe lainepikkuse (λ).

Üldse nimetatakse laine pikkuseks kahe lähima ja samasuguses liikumisolekus ehk faasis oleva lainetava osakese kaugust teineteisest.

Ühe perioodi T jooksul levib lainetus just ühe lainepikkuse λ võrra. Seetõttu laine ühe sekundi jooksul kulgetud tee ehk laine levimiskiirus

$$v = \frac{\lambda}{T}.$$

Et aga võnkesagedus $n = \frac{1}{T}$, siis saame eelmisest valemist:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{1}{T} \cdot \lambda = n\lambda.$$

Samale tulemusele ($v = n\lambda$) jõuame ka järgmiselt mõeldes: ühe perioodi (T) jooksul levib laine ühe lainepikkuse λ võrra, sekundis aga on n perioodi, järelikult ühe sekundi jooksul levib laine $n\lambda$ võrra, mis ongi laine levimiskiirus v.

1. Kui kiiresti levib ristlaine, mille periood on 0,02 sek. ja pikkus 40 m? Milline on selle laine sagedus?

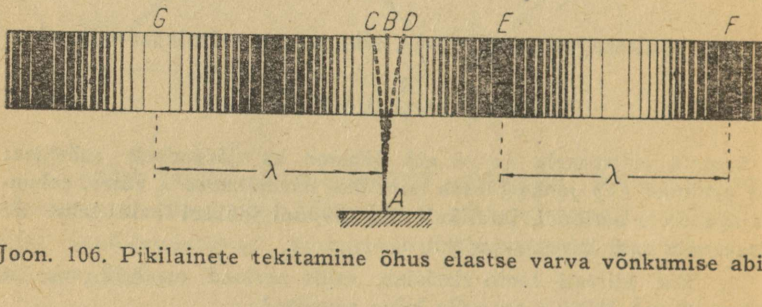
2. Ristlaine (valgus) levimiskiirus on 300 000 km/sek. Määrata periood ning sagedus, kui $\lambda = 0{,}75\ \mu$!

3. Joonestada ristlaine, mille pikkus $\lambda = 6$ cm ja amplituud $a = 1$ cm! Samast punktist alates joonestada sama faasi ja pikkusega ristlained amplituudiga $a_1 = 0{,}5$ cm ning $a_2 = 1{,}5$ cm! Võrrelda neid laineid omavahel!

4. Joonestada ristlaine, mille $\lambda = 12$ cm ja $a = 2$ cm!

102. Pikilained. Eespool-käsiteldud lainelises liikumises toimub aineosakeste võnkumine risti laine levimissuunaga. Sellest ka nimetus rist- ehk transversaallained. Kuid lainetusel võivad aineosakesed võnkuda ka pikuti laine levimissuunaga. Sel juhul on meil tegemist piki- ehk longitudinaal-lainega.

Tuletame meelde, kuidas lainetab rukkiväli. Rukkikõrred painduvad tuule käes ühele ja teisele poole kõrvale. Vahel on nende ladvad üksteisega koos tihedasti, vahel hõredalt. Need kõrte latvade tihedused ja hõrendused ongi rukkivälja lainetuse elemendid, mis mööda välja edasi liiguvad, moodustades selle lainetuse. Muidugi jäävad kõik rukkikõrred oma kohale, võnkudes vaid latvadega teatud tasakaaluasendi ümber. — Mitte üksnes peenikesed kõrred, vaid ka tugevad puud, vabrikukorstnad, raadiomastid, kirikutornid ja „pilvelõhkujad" võnguvad tuule käes.



Joon. 106. Pikilainete tekitamine õhus elastse varva võnkumise abil.

Analoogiliselt rukkikõrte võnkumisega võime tekitada elastse varva (plaadi) võnkumisi, mis omakorda tekitavad ümberolevas õhus tihendusi ja hõrendusi ehk pikilaineid. Olgu meil elastne varb AB kinnitatud punktis A (joon. 106). Kui painutame sellise varva tasakaaluasendist (AB) kõrvale (asend AC) ja laseme lahti, siis hakkab ta pendlitaoliselt võnkuma oma tasakaaluasendi ümber amplituudiga BC ehk BD. Õhutakistuse ja mittetäieliku elastsuse tõttu jääb võnkumisamplituud järjest väiksemaks ning varsti sumbub.

Vaatame nüüd, kuidas mõjub varva AB võnkumine ümberolevasse õhusse. Viime varva tasakaaluasendist AB

vasakule, asendisse AC, laseme lahti ning jälgime tekkinud liikumist. Varva asendist AC kiiresti asendi AD poole liikudes tekib varvast paremale poole õhu tihendus ja vasakule hõrendus. See kestab seni, kuni varb jõuab asendisse AD. Nüüd algab tagasiliikumine ja nähtus toimub vastupidiselt: paremal pool tekib hõrendus ja vasakul tihendus. Sedaviisi varva AB võnkudes tekivad õhu perioodilised tihendused ja hõrendused, mis levivad varvast kui lainetustsentrist ümberolevasse ruumi. Saame õhu pikilainetuse, nagu see on skemaatiliselt kujutatud joonisel 106.

Analoogiliselt ristlainetega nimetatakse pikilainete puhul **laine pikkuseks** λ kahe lähima samasuguses liikumisfaasis oleva võnkuva osakese kaugust teineteisest, näiteks mõnest suurimast tihendusest (E) kuni järgmise suurima tihenduseni (F), või mõnest suurimast hõrendusest (G) kuni järgmise suurima hõrenduseni (B). Samuti kehtivad ka siin ristlainetuse puhul tuletatud valemid:

$$v = \frac{\lambda}{T} = n\lambda,$$

kus T on pikilainetuse võnkeperiood ja n sagedus.

1. Jäljendada käega pikilaine levimist! Kuidas kulgevad sel juhul laine kiir ja laine front?

2. Liigutada käega edasi-tagasi (viibutada) nii kiiresti kui võimalik! Määrata selle liikumise frekvents ja arvutada vastavad T ning λ, oletades, et käe viibutamisest tekkinud õhulained levivad kiirusega 340 m/sek!

3. Kärbse tiib pirisedes võngub sagedusega ~ 300 Hz. Leida vastavad T ja λ, kui lainetuse levimiskiirus on 340 m/sek!

4. Tihedama ja hõredama viirutuse abil kujutada pikilaineid, mille lainepikkus λ on 4 cm!

103. Rist- ja pikilainete tekkimise eeldusi. Nagu nägime, tekib võnkliikumine juhul, kui keha osakestel on mõnesugune tasakaaluasend ja neid sellest välja viies tekib tung, mis *püüab neid tasakaaluasendisse jälle tagasi tuua*. Oluline tähtsus on ka aineosakeste inertsil, sest muidu jääksid tasakaaluasendist väljaviidud osakesed sinna tagasi jõudes kohe seisma. Seda aga ei juhtu, sest *inertsi tõttu liiguvad nad sellest läbi edasi*.

Me tutvusime kahte liiki lainetega: rist- ja pikilained. Missugustes kehades on need lained võimalikud? Ristlaine tekkimise eelduseks on asjaolu, et keha mõne osakese tasakaaluasendist väljaviimine sunnib ka tema naaberosakese samas suunas kaasa liikuma. Selline nähtus on võimalik ainult tahketes kehades, kus aineosakesed on molekulaartungide varal üksteisega tugevasti seotud. Vedelais ja gaasilistes kehades puuduvad tungid, mis nende kehade kuju muutmist takistavad, *puudub* n.-ö. *elastsus kuju suhtes*, *seetõttu pole vedelais ja gaasilistes kehades ristlained võimalikud*.

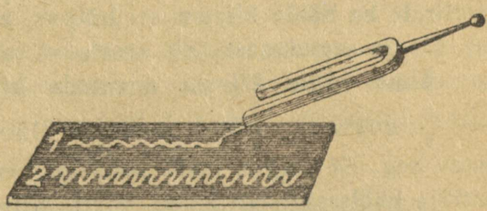
Et aga vedelad ja gaasilised kehad püüavad säilitada oma ruumala, s. o. neil *on elastsus ruumala suhtes*, siis on neis võimalik tihenduste ja hõrenduste tekkimine, järelikult ka *piki-* ehk *longitudinaal-lained*. Muidugi on longitudinaal-lained võimalikud *ka tahketes kehades*, sest nemadki püüavad säilitada oma ruumala. Vedelikes ja gaasides aga on ristlained võimalikud ainult pinnal, nagu me seda nägime veepinnal lainetusest, kus lainetus tekib vee ja õhu kokkupuute pinnal.

V. Hääl.

Hääle levimine.

104. Hääl kui lainetamisnähtus. Häälenähtuste hulka kuuluvad need, mida me tajume oma k õ r v a a b i l. H ä ä l e tekkimise põhjuste selgitamiseks teeme järgmise katse (joon. 107).

Kinnitame helihargi ühe haru külge mõne teraviku. Paneme helihargi helisema ja tõmbame teravikuga mööda nõetatud klaasipinda. Siis saame jäljena k o r r a p ä r a s e l a i n e l i s e j o o n e, mille a m p l i t u u d h e l i n õ r g e n e d e s j ä r j e s t v ä h e n e b. Sellest katsest võime järeldada, et heliseva helihargi harud on korrapärases võnkliikumises. Samuti tõendavad teisedki katsed ja tähelepanekud (keelte võnkumine, müristamine), et h ä ä l e t e k k i m i s e p õ h j u s e k s o n h ä ä l e a l l i k a k i i r e e d a s i - t a g a s i l i i k u m i n e e h k v õ n k u m i n e. Hääleallika võnkumine tekitab õhus tihendusi ja hõrendusi, s. o. p i k i l a i n e i d. Need levivad ümber hääleallika ning meie kõrva tungides ärritavad kuulmisnärvi



Joon. 107. Helihargi võnkeamplituud järjest väheneb.

otsi. Kuulmisnärvid annavad ärrituse edasi peaajule ja me kuuleme häält.

Tuleb kindlasti silmas pidada, et hääleaisting on subjektiivne, psüühiline nähtus, kuna väljaspool meid toimuv õhu või mõne teise keskkonna võnkumine on objektiivne, mehaaniline nähtus. Sõna „hääl" kasutame aga mõlemate, s. o. nii subjektiivsete kui ka objektiivsete häälenähtuste puhul.

Füüsika osa, kus häälenähtusi lähemalt tundma õpitakse, kannab akustika nime.

1. Mispärast hääl ei levi tühjas ruumis?

2. Hääl sagedusega 440 Hz levib vees kiirusega 1440 $\frac{m}{sek}$. Arvutada laine pikkus ja periood!

105. Hääle kiirus. Et hääl tarvitab levimiseks aega, seda teame igapäevastest tähelepanekutest (kauge puuraiuja vaatlemine, välk ja müristamine). Lainete levimiskiirust, järelikult ka hääle kiirust on hõlpus arvutada laine pikkusest (λ) ja sagedusest (n), sest $v = n\lambda$ (vt. § 101). Otseselt aga võime hääle kiirust arvutada kiiruse valemi põhjal: $v = \frac{s}{t}$, kus s on hääle levimisel läbitud tee pikkus ja t vastav aeg. Et valgus levib peaaegu hetkeliselt, siis märkab vaatleja häältesignaali t sek. võrra hiljemini temaga samaaegselt toimunud valgussignaalist. Mõõtnud ära veel kauguse s, võime arvutada hääle kiiruse v.

Rohkearvulistest mõõtmistest (Esimese Maailmasõja aegu toimetati tuhandeid selliseid mõõtmisi) on leitud, et

$$\textbf{hääle kiirus õhus } (0^\circ \text{ C}) = 331 \frac{m}{sek}.$$

Hääle kiirus õhus oleneb õhu temperatuurist ja suureneb temperatuuri tõustes. Üldse hääle kiirus õhus t^0 C juures on:

$$v_t = 331 \sqrt{1 + 0{,}004\,t}.$$

Hääle kiirus tahketes ja vedelates kehades on üldiselt suurem kui gaasides. Näitena toome siin hääle kiirused mõnedes ainetes.

Süsihappegaas (0°C)	258 m/sek	Klaas	5190—5950 m/sek
Vesinik (0°C)	1261 „	Kork	430—530 „
Petrooleum (7° C). .	1395 „	Raud	5000 „
Vesi (15°C)	1440 „	Seatina	1320 „
Alumiinium	5105 „	Tammepuu . . .	3380—4310 „
Kirjutuspaber	2100 „	Vask	3900 „

1. Raudteerongi mürin on kuulda juba ammu enne, kui rong lähedale jõuab, eriti aga siis, kui kõrv rööbaste lähedal hoida. Millest see tuleb?

2. Müristamine algas 10 sek. pärast välgulöömist. Kui kaugel sähvatas välk?

3. Millise sagedusega häälelaine pikkus on 1 m? Kuidas oleneb sagedus laine pikkusest, kui kiirus on konstantne?

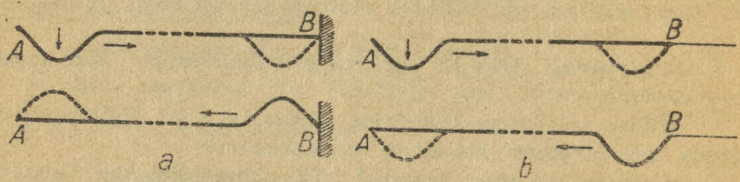
4. Mitme m/sek võrra suureneb hääle kiirus, kui õhu temperatuur tõuseb 5^0-st kuni 25^0-ni?

5. Määrata sagedusele 440 Hz vastavad häälelaine pikkused õhus, korgis, vees ja rauas ning võrrelda neid isekeskis.

106. Lainete peegeldumine. Veepinnal levivate ristlainete puhul võime kergesti tähele panna, et vastu mõnd tõket (lauda, kallast) jõudes lained ei kao, vaid põrkavad sellest tagasi, p e e g e l d u v a d (joon. 108).

Joon. 108. Veelainete peegeldumine kaldalt.

Sama nähtust võime tähele panna ka nööri abil tekitatud lainetega. Kinnitame nööri ühe otsa (B) seina külge, teises nööri otsas (A) aga anname talle a i n u l t ü h e järsu tõuke (joon. 109). Sellest tekkinud nõgu (pool-laine) liigub mööda nööri teise otsa (B), muudab seal oma liikumisfaasi vastupidiseks (sümmeetriliselt alt üles) ja tuleb siis otsa A tagasi. Me ütleme sel juhul: l a i n e p e e g e l d u b n ö ö r i **kinnisest** o t s a s t (t i h e d a m a s t k e s k k o n n a s t) v a s t u p i d i s e f a a s i g a.



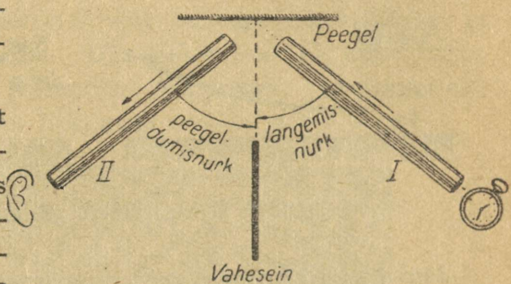
Joon. 109.
Lainete peegeldumine nööri kinnisest (a) ja lahtisest (b) otsast.

Kinnitame nüüd nööri AB seina külge mitte otseselt, vaid teise umbes meetripikkuse peenikese nööri abil (joon. 109). Sel juhul eelmist katset korrates näeme, et l a i n e p e e g e l d u b n ö ö r i **lahtisest** o t s a s t (h õ r e d a m a s t k e s k k o n n a s t) s a m a f a a s i g a.

Üldse peame meeles, et elastses keskkonnas leviv laine, jõudes keskkonna piirini, muudab oma levimissuunda ehk peegeldub sellest. Seejuures muutub laine faas vastupidiseks, kui peegeldumine toimub tihedamast keskkonnast (kinnisest otsast), faas ei muutu, kui peegeldumine toimub hõredamast keskkonnast (lahtisest otsast).

107. Hääle peegeldumine. Hääle peegeldumisnähtus on üldiselt tuntud kaja näol. Siin võivad olla peegliks suured pinnad, nagu metsaserv, mäekülg, pilv, majasein jne. Katseliselt võime hääle peegeldumist demonstreerida järgmisel viisil (joon. 110).

Kaks toru (I ja II) on eraldatud suurema vaheseinaga (papi- või vineeritükk). Peegliks on mõni tasane lauatükk või raamat. Taskukella tiksumist I toru otsa juures on II toru otsas selgesti kuulda, kui torud moodustavad peeglile tõmmatud ristjoonega võrdsed nurgad, s. o. **langemisnurk võrdub peegeldumisnurgaga.**



Joon. 110. Hääle peegeldumine.

Hääle peegeldumist kasutatakse nn. **kajaloodi** ehitamisel, mis leiab laialdast rakendamist mere- kui ka õhusõidul (sügavuste ja kauguste määramine).

1. Meie kõrv võib tajuda sekundis kuni 9 eraldatud häält. Arvutada, kui kaugel vähemalt peab olema peegeldav pind, et kaja ei liituks ühte esialgse häälega.

2. Millest tekib suurtes ruumides, näiteks tühjas kontsertsaalis, nn. järelkõla?

Mispärast me ei kuule omaenda kõne kaja toas?

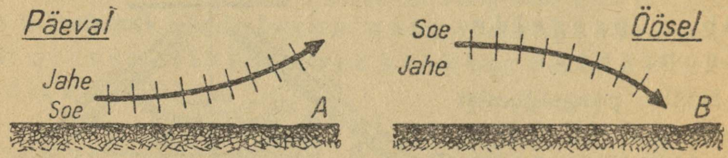
3. Rahvaga täidetud saalis on kõne paremini kuulda kui tühjas ruumis. Mispärast?

4. Hääl jõudis merepõhjast laeva kajaloodi tagasi 6 sek pärast. Kui sügav oli meri selles kohas?

5. Lennuki kajaloodi jõudis hääl maapinnast tagasi 30 sek pärast. Kui kõrgel oli lennuk?

108. Hääle murdumine. Ühtlases keskkonnas levib hääl sirgjooneliselt. Kui aga keskkond pole ühtlane, näiteks kui õhus esinevad tunduvad temperatuuri vahed, siis muudab hääl oma levimissuunda ehk murdub samuti, kui see toimub valguse puhul. Hääle levimissuuna muutmist ehk murdumist õhus tekitab eeskätt **temperatuuri** ja **tuule** mõju.

Päikese kiirguse mõjul on maapinna-lähedane õhk sageli soojem kui kõrgemal. Seetõttu on hääle kiirus maapinna lähedal suurem kui kõrgemal ning hääle kiired painduvad kõveraks ülespoole ja lähevad kuulajast (A) üle. Öösel toimub vastupidine nähtus: maapind jahtub kiiresti ning seetõttu on madalamad õhukihid jahedamad kui kõrgemad, hääle lained painduvad allapoole, järelikult on hästi kuulda (B).



Joon. 111. Hääle lainete (kiirte) murdumine.

Samal viisil on seletatav, mispärast vastu tuult on halvasti kuulda. Maapinnaga kokkupuutumise tõttu on tuule kiirus maapinna ligidal väiksem kui kõrgemal. Seetõttu on ka hääle kiirus maapinnast kõrgemale tõustes väiksem kui maapinna ligidal ning hääle kiired painduvad k õ v e r a k s ü l e s p o o l e. Selle tulemusena läheb hääl meist üle ja me ei kuule teda. Pärituult aga pöörduvad hääle kiired allapoole ning seetõttu on hästi kuulda.

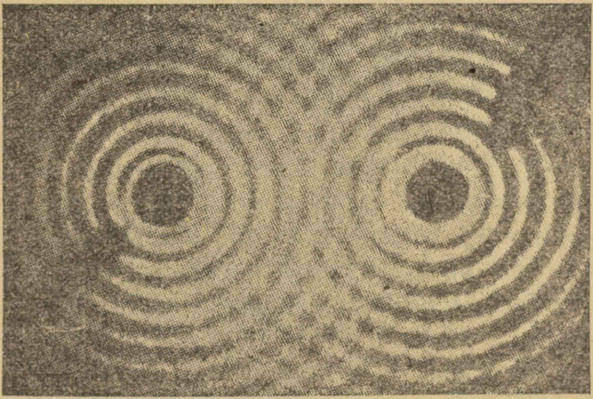
Hääle murdumisega on seletatavad ka nn. v a i k u s v ö ö d e (p i i r k o n d a d e) t e k k i m i n e, kus mõnest tugevast häälellikast levivat häält, näiteks kahurimürinat, pole sugugi kuulda, kuna tublisti kaugemal on sama hääl jälle hästi kuulda (joon. 112). Näiteks ühe suure plahvatuse puhul Moskvas (1920. a.) oli selle hääl kuulda ümberringi umbes 50 km ulatuses, sellele järgnes umbes 100 km laiune vaikus-

Joon. 112. Vaikuspiirkondade tekkimine hääle paindumise tõttu.

vöö, millest eemale hääl jällegi kuulda oli veel ligi 100 km laiuses töös.

1. Päeval on üle vee (järve) sageli hoopis paremini kuulda kui samalt kauguselt üle maa. Kuidas seda seletada?

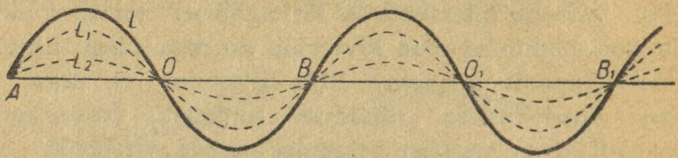
109. Lainete interferents. Mehaanikast teame, et näiteks kaldu horisondile visatud kivi võib korraga edasi liikuda ja ühtlasi allapoole langeda. Üks liikumine ei sega teist. Mõlema sirgjoonelise liikumise summana (resultandina) saame kivi kõverjoonelise liikumise mööda parabooli.



Joon. 113. Veelainete interferents.

See liikumiste olenematuse printsiip kehtib ka lainetuse puhul. Üks laineline liikumine ei sega teist, vaid nad võivad vabalt üksteisest läbi tungida, ilma et oma liikumisest midagi kaotaks. Vaatleja aga, kes mõlemaid laineid korraga näeb, paneb tähele nende liitumisest tekkinud liitlainet, mis võib olla hoopis erinev liidetavaist. Seejuures tekkinud nähtusi, kus kahe või enam laine liitumisest tekkinud liitlaine tugevneb, nõrgeneb või hoopis ära kaob, nimetatakse lainete interferentsiks. Vaatame mõnda tüüpilisemat neist.

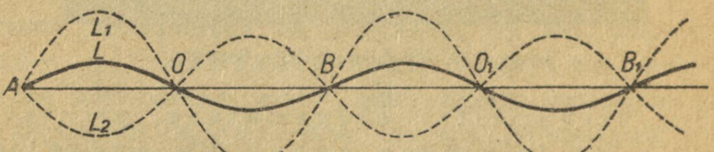
Joonisel 114 on kujutatud kaks sama pikkusega (AB) lainet L_1 ja L_2. Alguspunkt A on mõlema laine suhtes samas liikumisolekus ehk faasis: ta algab liikumist tasakaaluasendist ülespoole. Lainete L_1 ja L_2 liitmisest saa-



Joon. 114. Sama pikkuse ja faasiga lainete liitmine.

dud liitlaine L on sama pikkusega (AB), kuid tema hälbed ja amplituud võrduvad liidetavate lainete hälvete ja amplituudide summaga.

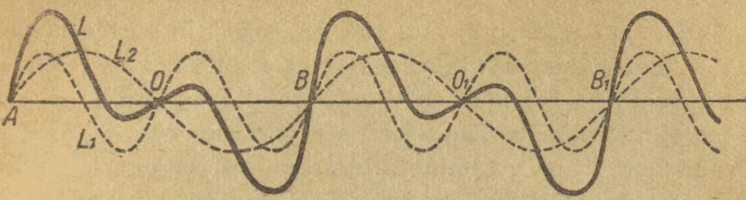
Joonisel 115 on liidetud sama pikkusega, kuid vastupidiste faasidega (L_1 algab punktis A liikumist ülespoole, L_2 — allapoole) lained L_1 ja L_2. Nende summana esineb liitlaine L. Juhul, kui liitunud lainete L_1 ja L_2 amplituudid oleksid võrdsed, saaksime summana sirge, s. o. laine kaoks hoopis ära.



Joon. 115. Sama pikkusega, kuid vastupidise faasiga lainete liitmine.

Joonisel 116 on laine L_2 kaks korda suurema pikkusega kui L_1 (AB=2AO). Punktis A on mõlemad lained samas faasis. Liitmisest saadud laine L omab siin keerulisemat kuju kui liidetavad.

Üldse võib liitmisel saadud laine omada väga keerulist kuju. Eriti keerulised lainekujud tekivad juhul, kui lainettekitavate aineosakeste võnkumissuunad ei ühtu, vaid üksteisega nurga moodustavad.

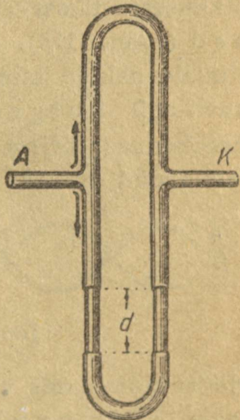


Joon. 116. Erineva pikkusega lainete liitmine.

1. Liita kolm samast punktist kulgevat ning sama faasiga algavat lainet L_1, L_2 ja L_3, millede lainepikkused ning amplituudid vastavalt on: $\lambda_1 = 4$ cm ja $a_1 = 0,5$ cm; $\lambda_2 = 8$ cm ja $a_2 = 1$ cm; $\lambda_3 = 6$ cm ja $a_3 = 2$ cm.

2. Liita eelmises ülesandes antud lained juhul, kui L_2 algab võrreldes L_1 ja L_3-ga vastupidise faasiga.

110. Hääle interferents. Häälelained, samuti kui veelainedki, võivad liitudes tugevneda, nõrgeneda või hoopis kustuda. Tulemus oleneb liituvate lainete pikkusest, amplituudist ja faasist. Kui näiteks liitub ühe häälelaine tihendus teise häälelaine tihendusega, või hõrendus hõrendusega, siis saame laine tugevnemise; vastupidisel juhul — nõrgenemise. Häälelainete liikumise ehk interferentsi nähtusi võime demonstreerida nn. Quincke toru abil (joon. 117). Hääleallikast *A* tulev hääl jõuab kõrva K kahte teed pidi, milledest alumine on pikem kui ülemine. Kui teede pikkused on ühesugused, siis jõuab mõlemat teed pidi tulev hääl kõrva sama faasiga ja me kuuleme häält selgesti. Kui aga alumist teed näiteks poole lainepikkuse võrra pikendada, toru vasta-



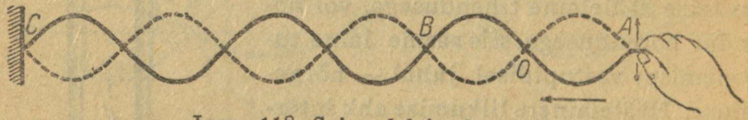
Joon. 117. Quincke toru.

valt välja tõmmates, jõuavad lained kuulaja kõrva vastupidiste faasidega, s. o. nad liitudes kustuvad ja me ei kuule häält.

Üldse, kui teede pikkuste ehk nn. käigu vahe võrdub 1, 3, 5 jne. poollaine pikkusega, siis liituvad kõrva juures vastasfaasidega lained, nende amplituudide summa on null ja me ei kuule häält. Kui aga teede pikkuste ehk käigu vahe võrdub 2, 4, 6 jne. poollaine pikkusega, siis toimub liitumine sama faasiga, järelikult on hääl hästi kuulda.

1. Quincke toru ühte poolt tuli d = 25 cm võrra väljapoole tõmmata, et toon jälle ära kaoks. Määrata sellest vastav lainepikkus.

111. Seisvad lained. Joonisel 118 kujutatud viisil tekitame nööri abil mitte ühe laine, vaid terve rea üksteisele järgnevaid laineid. Need peegelduvad nööri kinnisest otsast (C), liituvad (interfereeruvad) otsast A tulevate uute samasuguste lainetega ning kui poollaine pikkus mahub nööri pikkusesse täisarv kordi, moodustuvad nn. seisvad lained (joon. 118). Nagu sõna ise näitab, püsib siin meie silmale nähtav lainekuju samal kohal paigal, kuna edasiliikuva ehk kulgeva laine puhul lainekuju võnkuvas keskkonnas järjest edasi liigub. Meie näites on kogu nöör jagunenud kuueks võrdseks osaks, mis võnguvad omaette.



Joon. 118. Seisvad lained nööril.

Nööri kohad, mis võnkumisel paigale jäävad (O; B), nimetatakse sõlmpunktideks, kõige suurema amplituudiga võnkuvad kohad moodustavad seisvate lainete paisu. Nagu joonisest näha, kahe kõrvuoleva sõlmpunkti vahe võrdub laine poole pikkusega.

1. Esimese ja neljanda sõlmpunkti vahe on 12 cm. Kui pikk on siis laine?

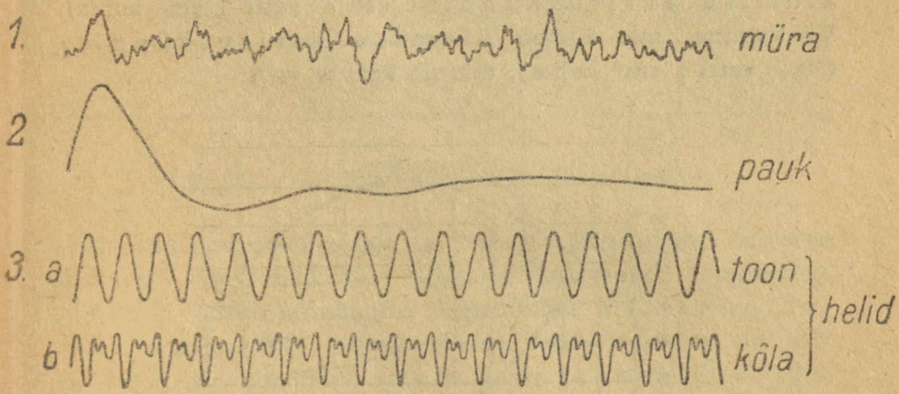
Hääle omadusi.

112. Häälte liigitus. Oma kuulmis-elundi — kõrvaga tajume väga mitmesuguseid hääli. Kõik hääled võime jagada kolme rühma:

1) Mürad. Siia kuuluvad mitmesugused ebakorrapärased hääled, nagu: kohin, mühin, vihin, vuhin, vulin, sahin, krõbin, kõlin jne., mis on õieti suure hulga mitmesuguste häälte segu.

2) Paugud — väga lühikest aega kestvad tugevad hääled (häületõuked).

3) Helid — korrapärased pikemat aega vältavad hääled, milliseid me tarvitame muusikas. Seepärast nimetamegi muusikat teisiti helikunstiks.



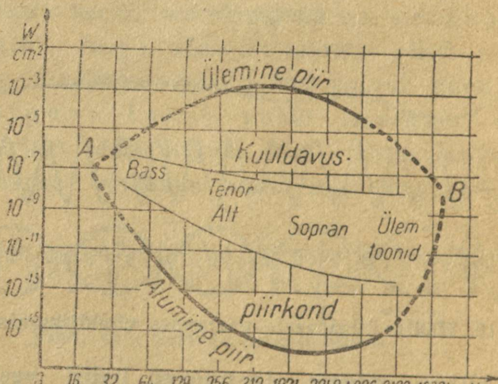
Joon. 119. Häälte liigitusele vastavate võnkliikumiste tüübid.

Nagu hiljem näeme, jagunevad helid veel omakorda toonideks ja kõladeks. Toon on puhas heli, ilma teiste toonide seguta, kuna kõlas kuuleme ühte põhitooni koos hulga teiste nn. ülemtoonidega (vt. 120).

Eelmine häälte liigitus on tehtud meie kuulmisaistingute põhjal. Füüsikalisest seisukohast vastab igale häälte rühmale ka eriline võnkliikumise laad, nagu seda 119. joonisel tähele võime panna. Vaadelda seda! Edaspidi tegeleme peamiselt helidega.

113. Kuuldavuspiirkond. Nagu teame, tekitab hääle aistingut meid ümbritseva ainelise keskkonna (õhu) võnkliikumine. Kuid mitte igasugune võnkliikumine pole suuteline tekitama hääle aistingut. Et meie kõrv oleks suuteline tajuma võnkliikumist häälena, selleks peab see võnkliikumine olema teatud tugevusega (amplituudiga), s. o. sisaldama nii palju energiat, mis suudaks veel meie kuuldemehhanismi — kõrva tegevusse panna.

Kõige nõrgem kõrvaga tajutav võnkumine moodustab nn. alumise ärrituskünnise (10^{-16} vatti 1 cm^2 kohta). Võnkumine, mis ületab ülemise ärrituskünnise (10^{-3} vatti 1 cm^2 kohta), tekitab kõrvas valu.

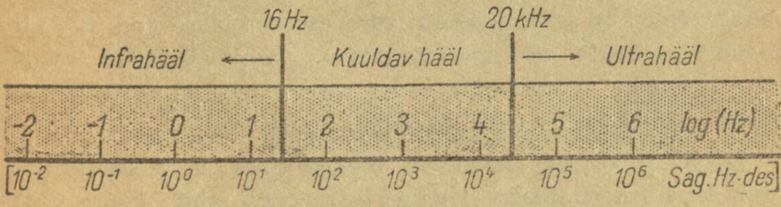


Joon. 120. Kuuldavuspiirkond.

Teiselt poolt on kuuldavuseks vajalik ka teatud võnkumissagedus. Siin loetakse alumiseks piiriks 16, ülemiseks piiriks ~20 000 hertsi ehk $20 kHz$. Muusikas kasutatakse võnkumisi 30 ja 5000 hertsi vahel. Üldse on kuuldavuspiirkonna ulatus väga individuaalne ja väheneb tunduvalt vanusega.

Näitlikult kujutab kuuldavuse olenevust võnkumise võimsusest (vattides) ja sagedusest (hertsides) 120. joon. antud graafik. Sellel on rõhtteljel kujutatud sageduse, ja püstteljel vastavad võimsuse logaritmid. Graafikust nähtub, et suurema sagedusega võnkumised (kõrgemad toonid) on kuuldavad hoopis vähema võimsuse juures kui vähema sagedusega võnkumised (madalad toonid).

114. Ultra- ja infrahääl. Kõrv võib tajuda häälena võnkumisi 16—20 000 hertsi piirides. Kuid ka väljaspool seda piiri, s. o. alla 16 ja üle 20 000 hertsi, võib tekitada võnkumisi. Need võnkumised aga pole meie kõrvaga tajutavad,



Joon. 121. Kuuldavad ja mittekuuldavad hääled.

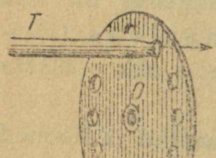
kuigi nad oma iseloomult on täiesti ühesugused kõrvaga tajutavate võnkumistega. Selliseid väljaspool kuuldavuse piirkonda olevaid võnkumisi nimetatakse m i t t e k u u l d a v a k s hääleks. Kui mittekuuldava hääle sagedus on alla 16 hertsi, siis nimetame seda häält i n f r a h ä ä l e k s (värisemine, vabisemine), üle 20 000 hertsi ehk 20*kHz* — u l t r a h ä ä l e k s.

Infrahäälelises võnkumises on näiteks maapind ja hooned tuule, maavärisemise või merilainetuse mõjul. Siin esinevad võnkumissagedused on $^1/_{200}$ ja 1 Hz piirides.

Ultrahääli tekitatakse kunstlikult eriliste elektrivõnkumiste abil alates 20kHz-st kuni mitme miljoni Hz-ni. Ultrahääle võnkumised on mitmesuguse erilise füüsikalise, keemilise ja bioloogilise toimega, näiteks: ultrahääle mõjul pihustuvad mõned ained vees ja annavad temaga emulsiooni (parafiin, elavhõbe jt.); ultrahääl soodustab õhu eraldumist vedelikust, samuti kristallisatsiooni, mõjub tapvalt üherakulistele ja teistele väiksematele loomadele (konnad, kalad). Ultrahääli kasutatakse veealuses signalisatsioonis ja sügavuste mõõtmisel, sest vesi absorbeerib neid suhteliselt vähe, umbes 1000 korda vähem kui õhk. Ka on tähele pandud, et mõned taimed annavad tunduvalt paremat saaki, kui nende seemneid enne külvi kiiritada ultrahäälega.

115. Hääle kõrgus. Meie kuulmisorgan — kõrv teeb vahet kõrgete ja madalate, valjude ja tasaste häälte vahel. Need on meie subjektiivsed otsesed aistingud. Objektiivselt — hääle aistingut tekitavas võnkliikumises vastab kõrgusele võnkumise sagedus ja valjusele — võnkumistugevus (amplituud).

Et hääle kõrgus tõepoolest oleneb võnkumise sagedusest, seda on lihtne näidata ketassireeni abil (joon. 122). Õhukesse kettasse, mida võib tsentrit 0 läbiva telje ümber kiiresti pöörlema panna, on tehtud kontsentriliselt terve rida mulgukesi. Paneme ketta kiiresti pöörlema ja puhume läbi toru T mulkude-reale õhku. Kui õhuvool satub mulgu kohale, tungib ta sellest läbi ja annab õhule teisel pool ketast tõuke. Mulkude vahekohal katkeb õhuvool. Järgmisest mulgust saab õhk uue tõuke jne. Mida rohkem on mulke ja mida kiiremini ketas pöörleb, seda enam tõukeid saab õhk, seda suurem on tema võnkumise sagedus ning ühes sellega ka tekkinud hääle kõrgus. Kaks korda suurema sagedusega hääl moodustab esialgse häälega nn. oktaavi.



Joon. 122. Ketassireen.

Kui reas on näiteks 40 mulku ja ketas teeb 10 tiiru sekundis, siis on võnkumissagedus 10 · 40, s. o. 400 hertsi.

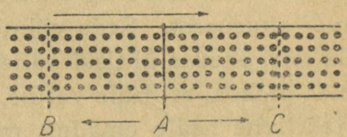
Tahame mõne hääle sagedust mõõta, siis tekitame sireeniga sama kõrge hääle ja arvutame sireeni andmeist vastava sageduse.

1. Millest teame, et kõrged ja madalad toonid levivad sama kiirusega?

2. Sireeni kettas on 32 mulku ja ta teeb 25 pööret sekundis. Arvutada tekkinud võnkumise sagedus.

3. Arvutada madalaima ja kõrgeima kuuldava hääle lainepikkus ning periood.

116. Doppleri-efekt. Kujutleme, et tänaval liigub kogu aeg samas suunas ühtlase tihedusega rahvavool (minnakse näiteks spordipidustustele). Seisame tänava ääres (joon. 123, asend A) ja loendame, mitu inimest möödub meist ühes minutis. Olgu näiteks 300. Kui aga samasugust loendamist toimetame ise voolule vastu liikudes, saame suurema, pärivoolu liikudes — väiksema arvu. Tõepoolest: esimesel juhul tuleb 300-le lisaks veel see osa voolust (AB), mille võrra me ise voolule vastu kõnnime, teisel juhul jääb loendamata see osa voolust (AC), mille võrra me ise pärivoolu edasi läksime. Analoogiliselt eelmisele lõikab lootsik vastu tuult sõudes rohkem laineid kui pärituult sõudes.



Joon. 123.
Möödujate loendamine paigal seistes ja liikudes.

Samalaadne nähtus esineb ka hääle juures. Kui kuulaja läheneb hääleallikale (vedurivile), satub kuulaja kõrva sekundis rohkem võnke kui paigaloleku puhul, eemaldumisel vastavalt vähem. Esimesel juhul kuuleme kõrgemat, teisel juhul madalamat häält, võrreldes olukorraga, kus kuulaja kaugus hääleallikast ei muutu.

Kirjeldatud nähtus kannab **Doppleri-efekti** nime. Muidugi pole siin tähtis, kumb neist liigub — hääleallikas või kuulaja. Oluline on ainult see, et nende vastastikune kaugus muutub.

Doppleri-efekt esineb ka valgusnähtuste juures, kus ta leiab väärtuslikku rakendamist astrofüüsikas.

1. Meist kiiresti lähedalt mööduva lennuki hääl kuuldub eemaldumisel madalamana kui lähenemisel. Mispärast?

2. Tulekahjukell saab iga 0,5 sek pärast ühe löögi. Mitu lööki kuuleme 1 min 40 sek jooksul, kui läheneda sellele kellale kiirusega 17 m/sek?

3. Mida kuuleme siis, kui eemalduda hääleallikast hääle kiirusega?

117. Hääle valjus oleneb häält tekitava võnkliikumise intensiivsusest ehk t u g e v u s e s t, mis oleneb võnkumisamplituudi suurusest. Seda võime näha katsest helihargiga, kus hääle nõrgenedes ühtlasi väheneb ka võnkeamplituud. Tuleb meeles pidada, et hääle valjus, samuti kui kõrguski, on puhtsubjektiivne hääle omadus, mis esineb ainult meie kuulmiselundis. Hääle tugevus aga iseloomustab võnkumisprotsessi, olenematult sellest, kas keegi oma kuulmis-elundiga seda tajub või mitte.

Hääle tugevust mõõdab ühes sekundis 1 cm^2 läbiva võnkumisenergia hulk, s. o. 1 cm^2 kohta tulev hääleenergia võimsus $\frac{W}{cm^2}$-tes. See energia tekitab meie kuulmis-elundi ärrituse, millele vastab teatud kuulmisaisting.

Psühholoogiast tuntud W e b e r - F e c h n e r i s e a d u s e järgi kasvab hääle valjus märksa aeglasemalt kui vastav ärritus (hääle tugevus), nimelt: kui hääle t u g e v u s kasvab g e o m e e t r i l i s e s p r o g r e s s i o o n i s, siis kasvab vastav hääle v a l j u s a r i t m e e t i l i s e s p r o g r e s s i o o n i s. Seega näiteks 10-kordsele hääle tugevuse suurenemisele vastab valjuse suurenemine ainult 10 valjusühiku võrra.

Kogemused näitavad, et k a u g u s e g a hääle valjus, järelikult ka h ä ä l e t u g e v u s v ä h e n e b. Kui häälekiired hääleallikast igas suunas ühtlaselt levivad, siis toimub hääle tugevuse kahanemine pöördvõrdeliselt kauguse ruuduga. Arvestades aga Weber-Fechneri seadust ei toimu hääle valjuse nõrgenemine võrdeliselt hääle tugevuse nõrgenemisega. Näiteks kuulaja kauguse 10 korda suurenedes kahaneb hääle tugevus 10^2 ehk 100 korda, kuna vastav hääle valjus väheneb ainult 20 valjusühiku (fooni) võrra.

Hääle valjust muusikas hinnatakse harilikult kuueastmelise skaala järgi: ff, f, mf, mp, p, pp. Tehnikas on valjuse mõõduühikutena tarvitusel foonid, kusjuures 1 foon vastab enam-vähem kõige väiksemale kõrvaga eraldatavale hääle valjuse muutusele. Kogu valjuse skaala ulatab 0-st kuni 130 foonini.

Hääle tugevust mõõdetakse detsibellides, kusjuures hääle tugevusele 0 db 1937. a. Pariisis toimunud rahvusvahelise kokkuleppe kohaselt vastab hääleenergia võimsus $10^{-16}\,\frac{W}{cm^2}$. See hääle võimsus on tugevuse alumiseks künniseks ja temale vastav valjus loetakse kuuldavuse alumiseks künniseks. Kõige suurem hääle tugevus, mida meie kõrv veel häälena suudab tajuda, on 10^{13} korda suurem hääle tugevuse alumisest künnisest, s. o.

$$10^{13} \cdot 10^{-16}\,\frac{W}{cm^2} \text{ ehk } 10^{-3}\,\frac{W}{cm^2}.$$

Kui hääl veel tugevamaks teha, tekib kõrvas valutunne, me ei suuda enam häält tajuda. Et Weber-Fechneri seaduse järgi hääle valjus võrdub hääle tugevuse astendajaga (teatud alusel), siis hääle tugevuse alumisele künnisele ($10^{-16}\frac{W}{cm^2} =$ 1 tugevusühik) vastab valjus 0 ja tugevuse ülemisele künnisele (10^{13}) vastab valjus 13. Seega saame hääle valjuse skaala 0—13-ni ja samuti temale vastava tugevusskaala 0—13-ni. Praktikas on ühikutena tarvitusele võetud selle skaala kümnendikud, mis kannavad tugevuse puhul nimetust detsibell (db) ja valjuse puhul — foon. Nii siis ulatub hääle tugevuse skaala 0—130 detsibellini ja valjuse skaala 0-st kuni 130 foonini.

Näitena toome järgneva tabeli, kus on antud mõned meile tuntud hääle valjused foonides ning neile vastavad hääletugevused detsibellides.

Hääl	Hääle valjus foonides	Hääle tugevus detsi-bellides	Hääle tugevus suhteline
Vaevalt kuuldav (alumine künnis)	0	0	$1 = 10^{-16} \frac{W}{cm^2}$
Tasane sosin 1,5 m kaugusel .	10	10	10
Tasane jutlemine	40	40	10^4
Vali jutlemine	60	60	10^6
Vali tänavamüra suurlinnas .	70	70	10^7
Karjumine, maa-alune tramm .	80	80	10^8
Trükimasinate müra	90	90	10^9
Suure orkestri fortissimo . . .	100	100	10^{10}
Aeroplaanimootori müra 3 m kaugusel	110—120	110—120	10^{11}—10^{12}
Valutundega seotud hääl (ülem. künn.).	130	130	10^{13}

1. Esitatud tabeli abil määrata selles tabelis toodud häälte tugevus $\frac{W}{cm^2}$-tes!

2. Kui ühe pasunaheli valjus on 60 fooni, kui suur on siis 10 sellise pasunaheli valjus ühtekokku?

3. Palju läheks vaja 60 fooni valjusega pasunaid, et nad koos annaksid valjuse 130 fooni?

118. Heliredel. Kui me kuuleme kahte häält korraga või järjestikku, siis nende koosmõju meisse võib olla kas meeldiv või ebameeldiv. Esimesel juhul kõneleme nende häälte kooskõlast ehk konsonantsist, teisel juhul ebakõlast ehk dissonantsist. Kõige harilikum ja hõlpsamini tajutav konsonants on oktaav, kus kaks eri kõrgusega heli liituvad nagu üheks kõlaks. Katseist sireeniga nägime, et oktaavis kõlavate helide sageduse suhe ehk intervall on alati paarisarv (2, 4, 8 jne.). Tähendab, kui mõne heli sagedus on näiteks 440 Hz, siis temaga oktaavis kõlavate naaberhelide sagedus on 220 ja 880, neile järgnevate oktaavis kõlavate helide sagedus 110 ja 1760, 55 ning 3520 Hz jne.

Samuti näitavad katsed, et kaks heli annavad alati konsonantsi ka siis, kui nende sageduste suhe ehk intervall on hästi lihtne murd, nagu $\frac{3}{2}, \frac{4}{3}, \frac{5}{4}$. On aga sageduse suhe keerulisem, nagu $\frac{9}{8}$ või $\frac{16}{15}$, siis saame ebakõla ehk dissonantsi.

Muusikas reastatakse helid, lähtudes mistahes vabalt valitud helist, nn. h e l i r e d e l i k s 124. joonisel antud viisil. P õ h i h e l i sagedus on võetud ühikuks ja teiste helide intervallid määratud põhiheli suhtes ning märgitud vastavates püstlahtrites.

Helide nimetused	do ehk c	re d	mi e	fa f	sol g	la a	si h	do' c'
Intervallide nimetused	priim / põhiheli	sekund	terts	kvart	kvint	sekst	septiim	oktaav
Intervallid põhiheli suhtes	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

Joon. 124. Duur-heliredel.

Nagu sellest tabelist nähtub, on oktaavi intervall 2, temale järgneb lihtsuse järjekorras kvint — $\frac{3}{2}$, siis kvart — $\frac{4}{3}$, edasi terts — $\frac{5}{4}$ ja sekst — $\frac{5}{3}$. Katseist võime veenduda, et kõik need intervallid annavad meeldiva kooskõla ehk konsonantsi. Kui aga võtame kaks kõrvuolevat heli, näiteks do ja re või mi ja fa, siis nende sageduste suhted ehk intervallid on võrreldes eelmistega keerulisemad ($\frac{9}{8}$ ja $\frac{16}{15}$), järelikult saame kooskõla asemel ebakõla ehk dissonantsi. Nii konsonants kui ka dissonants võib tekkida mitte üksi kahe, vaid ka kolme, nelja ja enamgi heli koosmõjust. Sel juhul on meil tegemist helide akordidega.

Eelmises tabelis (joon. 124) toodud heliredel nimetatakse duur- ehk mažoorheliredeliks. Teda kasutatakse rõõmsailmelise muusika loomiseks. Kurvailmelise muusika loomisel kasutatakse moll- ehk minoorheliredelit, kus ühe oktaavi intervallid põhiheli suhtes on:

$$1; \quad \frac{9}{8}; \quad \frac{6}{5}; \quad \frac{4}{3}; \quad \frac{3}{2}; \quad \frac{8}{5}; \quad \frac{9}{5}; \quad 2.$$

Kui arvutame duur-heliredeli kõrvuolevate helide intervallid ühe oktaavi piirides, siis saame järgmise rea.

$$\begin{matrix} \text{do} & & \text{re} & & \text{mi} & & \text{fa} & & \text{sol} & & \text{la} & & \text{si} & & \text{do}' \\ & \frac{9}{8} & & \frac{10}{9} & & \frac{16}{15} & & \frac{9}{8} & & \frac{10}{9} & & \frac{9}{8} & & \frac{16}{15} & \end{matrix}.$$

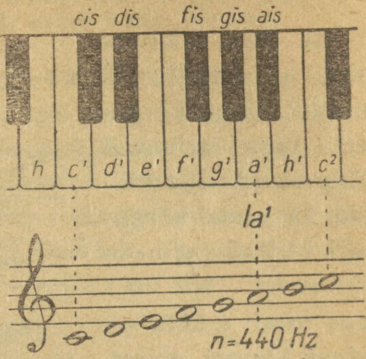
Sellest nähtub, et intervalle on kahte liiki: suuremaid ($\frac{9}{8}$ ja $\frac{10}{9}$) ja väiksemaid ($\frac{16}{15}$). Esimesi nimetatakse täis-, teisi pooltoonideks. Klaveril on kõik kahe üksteisele järgneva heli intervallid tehtud võrdseks. Selline heliredel kannab tempereeritud heliredeli nime. Seega on klaveril kõik täistoonilised intervallid omavahel võrdsed, samuti pooltoonilised. Viiulil aga võime võtta kahesuguseid täistoonilisi intervalle: $\frac{9}{8}$ (do-re) ja $\frac{10}{9}$ (re-mi).

1. Arvutada ühe duur-heliredeli toonide sagedus, kui põhitooni sagedus on 72 Hz.

2. Arvutada moll-heliredeli toonide sagedus, kui põhitooni sagedus on 72 Hz. Võrrelda tulemusi eelmise ülesande tulemustega.

3. Tempereeritud heliredelis on kõik kõrvuolevate toonide intervallid võrdsed. Tuletada valem tempereeritud heliredeli pooltoonilise intervalli määramiseks ja arvutada kvardi ning kvindi sagedus duurheliredelis, kui põhitooni sagedus on 72 Hz. Võrrelda saadud tulemusi esimese ülesande tulemustega.

119. Normaal-la'. Heliredel määrab helide suhtelise ehk relatiivse järjekorra, s. o. olenematult helide kõrgusest. Tahame aga helide kõrgust absoluutselt, s. o. nende sageduse abil ära määrata, siis peame andma heliredeli mõne heli sageduse. Selle põhjal võime intervallide abil arvutada kõigi teiste heliredelis leiduvate helide sagedused.



Joon. 125. Normaal-la'.

1939. a. rahvusvahelise kokkuleppe põhjal on heli la' ehk a' sageduseks võetud 440 Hz. Varem oli 1885. a. kokkuleppe põhjal normaal-la' (kammertooni) sageduseks 435 Hz.

1. Määrata praeguse ja endise normaal-la' intervall. Mitu protsenti on see intervall suurem ühest (unisoonist)?

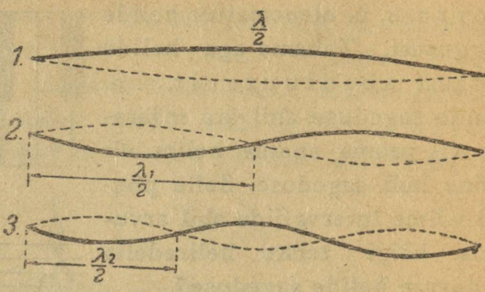
2. Kui palju erineb praeguse normaal-la' heli lainepikkus endise normaal-la' heli lainepikkusest?

Ülemtoonid ja resonants.

120. Keelte võnkumine. Ülemtoonid. Keelte võnkumist lihtsamal kujul nägime katsetes nööriga. Otstest kinnitatud nöör võib võnkuda tervikuna, moodustades ainult ühe seisva poollaine: pais keskel, sõlmpunktid otstes (joon. 126, 1). Me võisime teda ka nõnda võnkuma panna, et kogu nööri pikkus jagunes kaheks, kolmeks, neljaks jne. võrdseks seisvaks poollaineks (joon. 126, 2 ja 3).

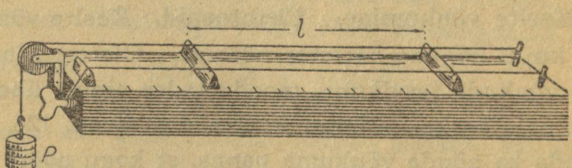
Just samasuguselt toimub ka helisevate keelte võnkumine. Keel oma täies pikkuses võnkudes annab põhitooni, osakaupa võnkudes tekivad antud põhitooni ülemtoonid, millede sagedus on 2, 3, 4 jne. korda suurem põhitooni sagedusest. Põhitoon koos ülemtoonidega moodustab liitheli, mida nimetame kõlaks.

Et sama põhitooniga võivad liituda arvult kui ka kõrguselt väga erinevad ülemtoonid, siis võivad ka sama kõrgusega kõlad erineda üksteisest. Nii näiteks viiuli a kõla on erinev klaveri omast, laulmisel ühe õpilase hääl sama kõrgest teise õpilase häälest jne. Sel puhul ütleme, et sama kõrged kõlad erinevad oma värvilt ehk tämbrilt, neil on igaühel oma eriline kõla värv.



Joon. 126. Seisvad lained nööril.

Sageduse suurenemisega väheneb muidugi vastav laine pikkus. Kuigi keelte võnkumine toimub risti võnkumiste levimissuunaga (keele pikkus), on keelte võnkumisest tekkinud lained õhus pikilained, laine levimissuunas tekkinud tihendused ja hõrendused.

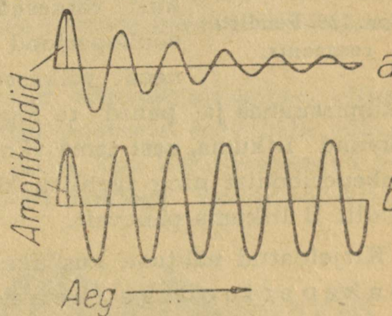


Joon. 127. Monohord.

Keele osakaupa võnkumise demonstreerimiseks puudutame helisevat keelt näiteks keskelt mõne tikukesega. Siis saame ülemtoonid, mis on oktaav kõrgemad põhitoonist. — Ühe kolmandiku kohal keelt puudutades saame ülemtoonid, mille sagedus on 3 korda suurem põhitooni sagedusest jne.

Keele võnkumise nähtavaks tegemiseks ja pais- ning sõlmpunktide ülesleidmiseks kasutatakse kergeid paberist „ratsureid", mis keele võnkumise kohal (pais) maha kukuvad, sõlme kohal aga mitte.

121. Vaba- ja sundvõnkumine. Vabalt võnkuva pendli amplituud väheneb järjest ja varsti jääb pendel hoopis seisma. Mispärast aga seinakella pendel seisma ei jää? Sellepärast, et üleskeeratud vedru või ülestõstetud koormiste energia arvel saab seinakella pendel iga täis- või poolvõnke jooksul liikumissuunas väikese tõuke, mis asendab (kompenseerib) võnkumisel ärakulunud energiat.

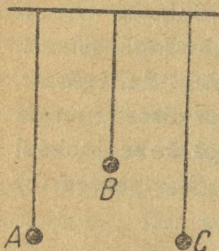


Joon. 128. Sumbuv (a) ja mittesumbuv (b) laine.

Käimalükatud kiik jääb samuti varsti seisma, kui ta uut energiat juurde ei saa mitmesuguste takistuste ületamiseks ärakulunud energia asemele. Seda teeb harilikult kiikuja ise, andes oma kehaga kiigele rütmilisi tõukeid. Siin on oluline, et antud tõuke suund ühtuks kiige (pendli) liikumissuunaga, sest ainult siis soodustab ta kiige liikumist, lisandab talle uut liikumisenergiat.

Eelmisis näiteis oli meil esimesel juhul tegemist vaba võnkumisega, kus võnkumisamplituud järjest kahanes ehk sumbus. Teisel juhul on meil tegemist nn. sundvõnkumisega, kus rütmilised, väljastpoolt saadud tõuked sunnivad võnkuvat keha säilitama oma amplituudi. Seepärast nimetataksegi sellist väljastpoolt saadud tõugete koosmõjul toimuvat võnkumist sundvõnkumiseks. Mõlema eelmise võnkumise amplituud on kujutatud joonisel 125.

122. Mehaaniline resonants. Teeme järgmise katse. Võtame kolm pendlit, neist 2 (A ja C) ühepikkused (joon. 129). Riputame nad elastse varva või traadi külge ja paneme ühe neist (A) võnkuma. Varsti näeme, et temaga ühepikkune pendel (C) hakkab esimesega kaasa võnkuma, kuna teine pendel (B) paigale jääb. Kust sai pendel C oma liikumisenergia? Neist väikestest tõugetest, mis pendel A talle kinnitusvarva kaudu andis. Need olid küll väikesed, aga et mõlema pendli võnkeperiood on sama, siis mõjusid kõik need väikesed tõuked alati pendli C liikumissuunas ja panid ta lõpuks võnkuma. Pendel B ei hakanud liikuma, sest tema võnkeperiood erineb pendli A võnkeperioodist ning seetõttu kõik saadud tõuked ei mõju pendlit B liikuma panevalt.



Joon. 129. Pendlite resonants.

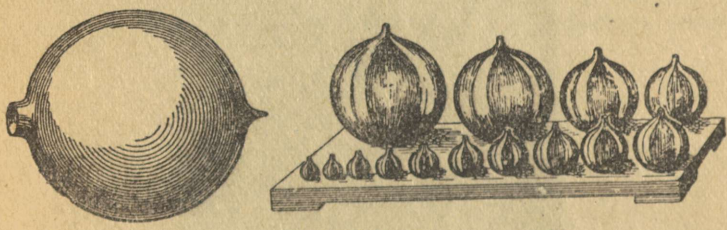
Kirjeldatud nähtust, kus üks võnkuv keha teise sama võnkeperioodiga keha ka võnkuma paneb, nimetatakse resonantsiks. Et siin oli tegemist mehaanilise liikumisega, siis nimetatakse sellist resonantsi ka mehaaniliseks resonantsiks.

Mehaaniline resonants omab suurt tähtsust tehnikas. Näiteks pikad massiivsed sillad võivad kui hiiglatugevad keeled või varvad resonantsi tõttu võnkuma hakata, kui nad saavad rütmilisi tõukeid, millede sagedus võrdub silla enese võnkumise sagedusega. Seejuures võib sild nii tugevasti võnkuma hakata, et ta kogunisti puruneb. Sellise võimaliku hädaohu vältimiseks ei lubata näiteks üle silla minnes suuremal inimeste rühmal (sõdureil) kõndida taktis. Ka laevade ehitamisel tuleb silmas pidada, et laeva kere enese võnkumised masinate võnkumisega resonantsis ei oleks.

123. Akustiline resonants. Resonantsinähtused esinevad õige sageli ka akustikas. Olgu meil antud näiteks kaks keelt, mis annavad ühesugust heli. Paneme ühe neist keeltest tugevasti võnkuma ja siis kohe seisma. Nüüd kuuleme, et ka seisev keel on helisema, järelikult ka võnkuma hakanud. Selle põhjuseks on resonants mõlemaid keeli ühendava õhu kaudu. Samalaadset nähtust võime tekitada ka kahe ühesuguse võnkesagedusega helihargiga.

Resonantsinähtusi võivad tekitada ka antud põhitooni ülemtoonid. Näiteks kui vabastada klaveri keeled pedaalist ja panna mõni neist tugevasti helisema ning siis kohe seisma, kuuleme terve rea helisid, mis resoneerivad võnkumapandud keele ülemtoonidele.

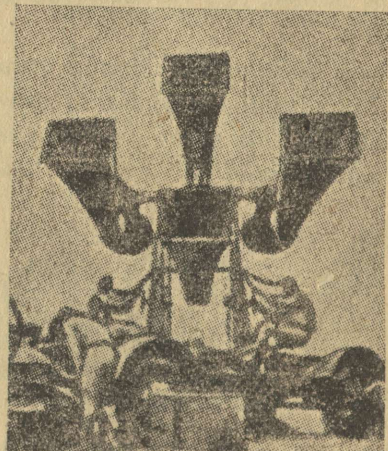
Resonantsinähtus omab suurt tähtsust muusikas. Nimelt heli tekitamisel muusikariistas püütakse saavutada võimalikult valju ja meeldivat kõla mitte üksi helisemapandud keha põhi- ja ülemtoonide, vaid ka nendega kaasaresoneerivate



Joon. 130. Helmholtzi resonaatorid.

teiste kehade abil. Selliste resonaatorite ülesannet täidab näiteks kandlel ja viiulil kere, inimese hääleorganis neelukoobas, suu, ninakoobas ja rinnakorv.

124. Kõla analüüs. Nagu teame, on kõla liitheli, mis koosneb üksikutest toonidest (põhi- ja ülemtoonid). Kuidas eraldada kõlast tema üksikuid komponenttoone ehk liidetavaid, s. o. teha kõla analüüsi? Saksa õpetlane *H. v. Helmholtz* kasutas selleks järgmist viisi. Ta ehitas rea kerakujulisi r e s o n a a t o r e i d (joon. 130). Neis olev õhk annab võnkudes ainult ühe, nimelt põhitooni, mitte aga ülemtoone. Seepärast just ongi resonaatorid tehtud kerakujulised, et nad resoneeriksid ainult ühele kindlale toonile. Tahame teada, kas antud kõla või üldse hääl sisaldab komponendina mõnd tooni, võtame vastava resonaatori, pistame ta toru otsapidi kõrva ja kuulame. Hakkab resonaator helisema (undama), on vastav toon komponendina olemas, vastasel korral aga mitte. Muidugi peab sellise analüüsi puhul olema iga otsitava tooni jaoks oma vastav resonaator (vt. joon. 130).



Joon. 131. Hääle suuna määraja.

Selliseid resonaatoreid kasutades läks Helmholtzil korda analüüsida vokaale ja konsonante ning, ümberpöördult, tekitada neid kunstlikult, pannes korraga helisema rea vastavaid heliharke.

125. **Kuulmine.** Resonants mängib tähtsat osa ka meie kuulmisprotsessis. Häälelained tungides väliskõrva panevad võnkuma kuul-

mekile, mille pindala on $\sim$ 0,5 cm^2. Kuulmekile võnkumine andub kuulmeluukeste kaudu edasi sisekõrva vedelikule. See omakorda paneb võnkuma nn. C o r t i organi, mis koosneb suurest hulgast (umbes 5 000) erilistest kiududest, mis on ühenduses peaajust tuleva kuulmiserguga. Corti organi kiud (kuulmisrakud) resoneerivad igaüks ainult teatud toonile, nende võnkumine ärritab kuulmisergu otsi ning andub edasi peaajule, ja me kuuleme häält.

Kõrv on sama tundlik kui silmgi, see tähendab: kõige nõrgema hääle- kui ka valgusmulje tekitamiseks läheb vaja sama palju energiat ($\sim 5 \cdot 10^{-17} \frac{W}{cm^2}$ sageduse juures 2300 Hz).

Kõrvadega me mitte ainult ei võta vastu hääle muljeid, vaid ühtlasi määrame ka suuna, kustpoolt hääl tuleb. Siin on oluline tähtsus sellel, et meil on k a k s kõrva. Kui hääl tuleb kõrvadesse otse eest, siis jõuab ta mõlemasse kõrva samaaegselt. Tuleb aga hääl küljepealt, siis jõuab ta ühte kõrva enne kui teise. See ajavahe nähtavasti ongi aluseks, mis võimaldab orienteerumist ruumis kuulmise järgi.

Samal põhimõttel, ainult suurendades täpsuse tõstmiseks „kõrvade“ vahekaugust, on ehitatud erilised aparaadid (joon. 131), mis võimaldavad täpselt määrata hääle suunda. Neid kasutatakse sõjaväes näiteks vaenlase patarei, lennuki või laeva asukoha kindlakstegemiseks.

Sisukord.

I. Hüdro- ja aeromehaanika.

Rõhumise nähtused vedelikkudes

Rõhumise nähtused gaasides

Voolamisnähtused ja lendamine

II. Molekulaarfüüsika.

Aine ehitus.

Aurustumine ja niiskus.

Keemine.

Gaasi ja auru töö.

IV. Mehaanika.

Kõverjooneline liikumine.

Gravitatsioon.

Võnkliikumine ja pendel.

Nimede ja mõistete juhataja.

(Arvud nimede ja mõistete taga tähendavad lehekülgi)

Vastutav toimetaja M. Usai. Ladumisele antud 19. X 1945. a. Trükkimisele antud 6. IV 1946. a. Paber 56 × 79, 1/16. Trükiarv 11.400. Trükipoognaid 10,75. Trükitähti trükipoognas 36 712. Arvutuspoognaid 9,6. MB 02755. Tellimise nr. 2070. Trükikoda „Tartu Kommunist", Tartus.

На эстонском языке. Физика для IX класса.

109

Rbl. 8.50

Rbl. 8.50

J. LANG ja A. MITT — FÜÜSIKA KESKKOOLI IX KL.

J. LANG ja A. MITT

FÜÜSIKA

KESKKOOLI IX KLASSILE

RK
„PEDAGOOGILINE KIRJANDUS"
TALLINN 1946